

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA

Robert ROBEK

**NOSILNOST VOZIŠČ GRAJENIH GOZDNIH
PROMETNIC V SLOVENIJI**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Ljubljana, 2015

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA

Robert ROBEK

**NOSILNOST VOZIŠČ GRAJENIH GOZDNIH
PROMETNIC V SLOVENIJI**

DOKTORSKA DISERTACIJA

**BEARING CAPACITY OF CONSTRUCTED
FOREST THOROUGHFARE CARRIAGEWAYS IN SLOVENIA**

DOCTORAL DISSERTATION

Ljubljana, 2015

Dragi ženi Idi

Doktorska disertacija je zaključek podiplomskega študija bioloških in biotehniških znanosti, znanstveno področje gozdarstvo. Terenske meritve so bile opravljene na raziskovalnih objektih v Sloveniji, laboratorijske analize in obdelave podatkov pa na Gozdarskem inštitutu Slovenije.

Na podlagi statuta Univerze v Ljubljani ter po sklepu Senata Biotehniške fakultete in sklepa 1. seje Komisije za doktorski študij UL (po pooblastilu 30. senata Univerze z dne 20. 1. 2009) je senat Biotehniške fakultete na seji 7. 1. 2010 odobril temo doktorske disertacije in za mentorja določil prof. dr. Igorja Potočnika.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik: prof. dr. Janez KRČ

Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire

Član: prof. dr. Janez ŽMAVC

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

Član: prof. dr. Dubravko HORVAT

Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet

Datum zagovora: 9. april 2015

Podpisani izjavljam, da je disertacija rezultat lastnega raziskovalnega dela. Izjavljam, da je elektronski izvod identičen tiskanemu. Na univerzo neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravici shranitve avtorskega dela v elektronski obliki in reproduciranja ter pravico omogočanja javnega dostopa do avtorskega dela na svetovnem spletu preko Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete.

Robert Robek

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Dd
DK	GDK 383:375.4(497.4)(043.3)=163.6
KG	gozdna cesta/traktorska vlaka /nosilnost/vozišče/voziščna konstrukcija prometna obremenitev/zrnavost/vlažnost tal/Slovenija
AV	Mag. ROBEK, Robert
SA	POTOČNIK, Igor (mentor)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Večna pot 83
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, podiplomski študij bioloških in biotehniških znanosti, znanstveno področje gozdarstvo
LI	2015
IN	NOSILNOST VOZIŠČ GRAJENIH GOZDNIH PROMETNIC V SLOVENIJI
TD	Doktorska disertacija
OP	XLII, 188 str., 26 pregl., 83 sl., 21 pril., 231 vir.
IJ	sl
JI	sl/en
AI	

Preučili smo nosilnost gozdnih prometnic, zgrajenih v Sloveniji v času od leta 2002 do 2008. Analizirane traktorske vlake so bile neutrjene, ceste pa utrjene z nosilnimi in obrabnimi plastmi, ki skupaj sestavljajo voziščno konstrukcijo. Usvojen je bil gradbeniški postopek za terensko točkovno določitev nosilnosti vozišča z dinamično obremenilno ploščo ZGF02. Leta 2009 je bilo na 18 prometnicah izmerjeno 1.936 vrednosti dinamičnega deformacijskega modula (E_{vd}), ki je mera za nosilnost vozišča. Najnižja povprečna nosilnost vozišča je bila ugotovljena spomladi na novih vlakah (pod 10 MN/m^2), najvišja pa na starih glavnih gozdnih cestah v sušnem obdobju poleti (preko 170 MN/m^2). Povprečne vrednosti izmerjene nosilnosti kolesnice v nasipu na glavnih gozdnih cestah so spomladi leta 2009 znašale $72,1 \text{ MN/m}^2$, na stranskih gozdnih cestah $47,5 \text{ MN/m}^2$ in na grajenih vlakih $10,7 \text{ MN/m}^2$. Poleti smo ugotovili povprečno 46 % višjo nosilnost na glavnih cestah in 40 % višjo nosilnost na stranskih cestah glede na spomladanske meritve. Na stranskih cestah na mešani podlagi smo ugotovili na kolesnici v nasipu značilno manjšo nosilnost od tiste na odkopu. Po gradbenih merilih je ugotovljena velikost zmesi zrn obrabnih plasti ustrezna, velikost zmesi zrn nosilnih plasti pa neustrezna. Z radarskimi meritvami prometa na dveh odsekih glavnih cest je bilo v letu 2009 evidentirano 19.422 vozil, od tega je bilo 73 % osebnih. Ugotovljena prometna obremenitev glavne gozdne ceste »Ravnik« znaša $179.872 \times 100 \text{ kN}$, kar je po gradbenih merilih zelo lahka prometna obremenitev. Z meritvami nismo dokazali kratkoročnega vpliva prometne obremenitve na nosilnost vozišča in prečno ravnost cest. V sušni dobi je bila ugotovljena povprečna nosilnost vlak na trdi podlagi manjša od spomladanske nosilnosti stranskih cest na mešani podlagi.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN	Dd
DC	FDC 383:375.4(497.4)(043.3)=163.6
CX	forest road/skid trail/ bearing capacity/carriageway/pavement structure traffic loading/grading/soil moisture/Slovenia
AU	ROBEK, Robert
AA	POTOČNIK, Igor (mentor)
PP	SI-1000 Ljubljana, Večna pot 83
PB	University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Postgraduate Studies of Biological and Biotechnical Sciences, Scientific Area Forestry
PY	2015
TI	BEARING CAPACITY OF CONSTRUCTED FOREST THOROUGHFARE CARRIAGEWAYS IN SLOVENIA
DT	Doctoral dissertation
NO	XLII, 188 p., 26 tab., 83 fig., 21 ann., 231 ref.
LA	sl
AL	sl/en
AB	

We studied bearing capacity of forest thoroughfares, constructed in Slovenia between 2002 and 2008. Analysed skid trails were unpaved while roads were paved with bearing and wearing courses that together consist pavement structure. The civil engineering procedure for spot field determination of carriageway bearing capacity with dynamic loading plate ZFG02 has been implemented. During the year 2009 altogether 1936 measurements of dynamic deforming module (E_{vd}) were collected as bearing capacity indicator. The lowest average carriageway bearing capacity have been measured in spring on new skid trails at embankment rut (below 10 MN/m²) and the highest on old primary roads during dry period in summer (over 170 MN/m²). The average bearing capacity values on primary forest roads in the spring of 2009 amounted to 72.1 MN/m², on secondary forest roads 47.5 MN/m² and on constructed skid trails 10.7 MN/m² respectively. During summer the average increase of 46% of bearing capacity on primary forest roads and 40% on secondary forest roads have been found regarding the corresponding measurements in spring time. Bearing capacity of the embankment rut has been significantly lower from the rut on excavation side of the carriageway but only on secondary roads on mixed base. The aggregate sizes for wearing course have been found adequate, and inadequate for bearing courses. One year traffic monitoring on two primary forest roads with radar traffic detector found 19422 vehicles, 73% of them were personal cars. The calculated design traffic loading for primary forest road »Ravnik« is 179872 nominal axel loads, which is very light traffic loading according civil engineering standards. Measurements have not proven significant short term impacts of the traffic on road carriageway bearing capacity and transverse evenness. Average bearing capacity of the skid trails on lime base in dry season have been significantly lower than on secondary roads on mixed base in spring time.

KAZALO VSEBINE

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA.....	III
KAZALO VSEBINE.....	V
KAZALO PREGLEDNIC.....	XV
KAZALO SLIK.....	XIX
KAZALO PRILOG	XXIX
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI	XXXIII
SLOVAR IZRAZOV.....	XXXVI
1 UVOD.....	1
2 OPREDELITEV PROBLEMA	3
3 PREGLED LITERATURE.....	6
3.1 VOZIŠČNE KONSTRUKCIJE MALOPROMETNIH CEST	6
3.1.1 Izvor in razvoj cest.....	6
3.1.2 Opredelitev in zgradba ceste.....	10
3.1.3 Maloprometne ceste.....	13
3.1.4 Vzroki propadanja vozišč	14
3.1.5 Posledice delovanja vplivnih dejavnikov na gramozne ceste.....	16
3.2 GRAJENE GOZDNE PROMETNICE V SLOVENIJI.....	18
3.2.1 Vrste in količina prometnic.....	18
3.2.1.1 Vrste grajenih gozdnih prometnic in merila za njihovo razvrščanje	18
3.2.1.2 Količina in stanje grajenih gozdnih prometnic v Sloveniji	20
3.2.2 Zgradba prometnic	21
3.2.2.1 Zgradba gozdne ceste	21
3.2.2.2 Zgradba traktorske vlake	22
3.2.3 Inženirske lastnosti tal – osnova za graditev v gozdarstvu	22
3.2.3.1 Osnovne fizikalne lastnosti gozdnih tal	22
3.2.3.2 Inženirska klasifikacija gozdnih tal	25

3.2.3.3	Osnove deformabilnosti in trdnosti tal	27
3.2.4	Razvoj omrežja grajenih gozdnih prometnic	30
3.2.4.1	Trendi rabe	30
3.2.4.2	Trendi graditve in vzdrževanja	31
3.3	DOLOČANJE NOSILNOSTI CEST V GRADBENIŠTVU	32
3.3.1	Opredelitev nosilnosti ceste	32
3.3.2	Postopki in oprema za točkovno terensko ugotavljanje nosilnosti cest	34
3.3.2.1	Postopek CBR	34
3.3.2.2	Postopka s krožno obremenilno ploščo in statičnim obremenjevanjem	35
3.3.2.3	Postopek z dinamično obremenilno ploščo	36
3.3.3	Ostali postopki določanja nosilnosti vozišč v gradbeništvu	37
3.4	PROUČEVANJE NOSILNOSTI PROMETNIC V GOZDARSTVU	38
3.4.1	Zgodovina raziskav nosilnosti v gozdarstvu	38
3.4.2	Ugotavljanje nosilnosti vozišč v gozdarstvu	40
3.4.3	Vplivi zunanjih dejavnikov na nosilnost vozišč v gozdarstvu	41
3.4.3.1	Prometna obremenitev	41
3.4.3.2	Klimatski pogoji	43
3.4.3.3	Hidrološki pogoji	44
3.4.4	Vplivi graditve na nosilnost vozišč v gozdarstvu	44
3.4.4.1	Projektiranje poteka in prečnega profila ceste	44
3.4.4.2	Izbira in lastnosti osnovnih gradbenih materialov	47
3.4.4.3	Veziva, dodatki in nadomestni gradbeni materiali	49
3.4.4.4	Projektiranje voziščne konstrukcije	51
3.4.4.5	Izvedba del	52
4	RAZISKOVALNI CILJI IN HIPOTEZE	54
4.1	RAZISKOVALNI CILJI	54
4.2	HIPOTEZE	54
5	MATERIALI IN METODE	56
5.1	PROUČEVANE LOKACIJE	56
5.1.1	Značilni odseki prometnic s karakterističnimi prečnimi profili	58
5.1.1.1	Lastnosti analiziranih odsekov na novih gozdnih cestah	59

5.1.1.2 Lastnosti analiziranih odsekov na starih gozdnih cestah	60
5.1.1.3 Lastnosti analiziranih odsekov na traktorskih vlakih	61
5.1.2 Opazovalno polje na gozdni cesti v gradnji	61
5.1.3 Transportno-gravitacijski enoti (TGE)	62
5.1.3.1 TGE Ravnik	63
5.1.3.2 TGE Soteska	63
5.2 METODE TERENSKEGA IN LABORATORIJSKEGA DELA	64
5.2.1 Prometna obremenitev ceste	64
5.2.2 Nosilnost vozišča	65
5.2.2.1 Merilna mesta za meritve nosilnosti	65
5.2.2.2 Protokol meritev dinamičnega deformacijskega modula	66
5.2.2.3 Dinamika meritev nosilnosti	67
5.2.3 Vsebnost vlage v voziščni konstrukciji	67
5.2.3.1 Gravimetrična vlažnost	67
5.2.3.2 Izotopska vlažnost voziščne konstrukcije	69
5.2.4 Prečni naklon in prečna ravnost vozišča	70
5.2.5 Zgradba voziščne konstrukcije gozdne ceste	71
5.2.5.1 Vzorčni izkopi na analiziranih gozdnih cestah	71
5.2.5.2 Debelina plasti voziščne konstrukcije na vzorčnih izkopih	72
5.2.5.3 Debelina vgrajenih plasti zmesi zrn pri gradnji ceste	72
5.2.6 Zrnavost materialov voziščne konstrukcije	73
5.2.6.1 Izbor in priprava vzorcev za sejalne analize	73
5.2.6.2 Sejalni protokol in izračun parametrov zrnivosti	74
5.3 NAČRT VZORČNIH POSKUSOV	75
5.4 METODE OBDELAV PODATKOV	76
6 REZULTATI	77
6.1 PROMETNA OBREMENITEV GLAVNE GOZDNE CESTE	77
6.1.1 Umeritev radarskih merilnikov prometa	77
6.1.2 Obseg, struktura in dinamika prometa na profilih Ravnik in Soteska	81
6.1.3 Povprečni letni dnevni promet transportno gravitacijske enote Ravnik	85
6.1.4 Izračun prometne obremenitve za glavno gozdno cesto Ravnik	87
6.2 NOSILNOST VOZIŠČ V SPOMLADANSKEM ČASU	90

6.2.1	Značilnosti meritev nosilnosti na karakterističnih prečnih profilih	90
6.2.1.1	Obseg izvedenih meritev nosilnosti in popis vplivnih dejavnikov	90
6.2.1.2	Viri variabilnosti nosilnosti znotraj obravnavanja	91
6.2.1.3	Merodajne vrednosti nosilnosti vozišča	94
6.2.2	Povprečna spomladanska nosilnost vozišč na traktorskih vlakih	95
6.2.3	Razlike v povprečni spomladanski nosilnosti vozišč na gozdnih cestah	98
6.2.3.1	Povprečna nosilnost glavnih gozdnih cest	98
6.2.3.2	Povprečna nosilnost stranskih gozdnih cest	102
6.3	SPREMEMBE NOSILNOSTI VOZIŠČ V ČASU	105
6.3.1	Mesečne spremembe nosilnosti dveh glavnih gozdnih cest	105
6.3.2	Razlike v povprečni nosilnosti traktorskih vlak po petih letih	107
6.3.3	Sezonske spremembe nosilnosti gozdnih cest	110
6.3.3.1	Sezonske spremembe povprečne nosilnosti glavnih gozdnih cest	110
6.3.3.2	Sezonske spremembe povprečne nosilnosti stranskih gozdnih cest	112
6.3.4	Spremembe nosilnosti vozišča med gradnjo gozdne ceste	114
6.3.4.1	Povprečna debelina vgrajenih plasti na opazovalnem odseku »Bajs«	114
6.3.4.2	Stopnjevanje nosilnosti med gradnjo voziščne konstrukcije	116
6.4	VPLIV VODE NA NOSILNOST	117
6.4.1	Določanje vsebnosti vlage v voziščni konstrukciji	117
6.4.1.1	Referenčna vrednost vsebnosti vlage v voziščni konstrukciji	117
6.4.1.2	Ocena vsebnosti vlage z gravimetričnimi vzorci materiala obrabne plasti	119
6.4.1.3	Ocena vsebnosti vlage z gravimetričnimi vzorci iz vzorčnih izkopov	120
6.4.2	Vpliv vsebnosti vlage na meritve nosilnosti vozišča	121
6.4.2.1	Vlažnostne razmere na cestah v času sezonskih meritev nosilnosti	121
6.4.2.2	Odvisnost nosilnosti vozišča cest od gravimetrične vlažnosti	122
6.4.2.3	Odvisnost nosilnosti vozišča cest od izotopske vlažnosti	124
6.4.2.4	Spremembe povprečne nosilnosti vozišča ob nevihti	125
6.5	VPLIV VGRAJENIH MATERIALOV NA NOSILNOST	126
6.5.1	Zrnavost materialov v voziščnih konstrukcijah	126
6.5.1.1	Značilnost zmesi zrn obrabne plasti na analiziranih odsekih cestah	128
6.5.1.2	Reprezentativnost vzorcev materialov iz vzorčnih izkopov	129
6.5.1.3	Zrnavost nosilnih plasti v vzorčnih izkopih	131
6.5.1.4	Zrnavost materialov na voznih površinah traktorskih vlak	133

6.5.1.5	Zrnavost obrabnih plasti vozišč gozdnih cest	134
6.5.2	Klasifikacija materialov v analiziranih gozdnih prometnicah	135
6.5.2.1	Klasifikacija materialov v nosilnih plasteh gozdnih cest in vlak	135
6.5.2.2	Klasifikacija zmesi zrn obrabnih plasti gozdnih cest	137
6.5.3	Zgradba voziščnih konstrukcij v vzorčnih izkopih gozdnih cest	138
6.5.4	Vpliv debeline nosilne plasti in vrste podlage na nosilnost	141
6.6	VPLIV RABE PROMETNIC NA NOSILNOST VOZIŠČNIH KONSTRUKCIJ	142
6.6.1	Ocena vpliva prometa na nosilnost gozdnih prometnic	142
6.6.2	Primernost traktorskih vlak za kamionski prevoz	143
6.6.3	Prečna ravnost vozišča kot ocena nosilnosti gozdnih cest.....	144
7	RAZPRAVA.....	146
7.1	UPORABNOST DINAMIČNE OBREMENILNE PLOŠČE	146
7.2	USTREZNOST VGRAJENIH MATERIALOV	148
7.3	VPLIVI VLAŽNOSTI IN DEBELINE VOZIŠČNE KONSTRUKCIJE NA NOSILNOST VOZIŠČA.....	151
7.4	SEZONSKA PRIMERNOST VLAK ZA KAMIONSKE PREVOZE	153
7.5	ENOVITOST NOSILNOSTI VOZIŠČA	154
7.6	VPLIV PROMETNE OBREMENITVE NA NOSILNOST VOZIŠČA.....	156
7.7	RAZVOJ METOD VZORČENJA IN MERJENJA	158
7.7.1	Vzorčenje za značilne meritve nosilnosti.....	158
7.7.2	Merjenje dinamičnega deformacijskega modula.....	159
7.7.3	Določanje vlažnosti v plasti voziščne konstrukcije	161
7.7.4	Sejalna analiza in kakovost finih delcev	162
7.7.5	Ugotavljanje prometne obremenitve.....	163
7.7.6	Ostale uporabljene metode terenskega dela	164
8	ZAKLJUČKI IN PRIPOROČILA.....	166
9	POVZETEK	170
10	VIRI	176
ZAHVALE		
PRILOGE		

TABLE OF CONTENT

KEY WORDS DOCUMENTATION	IV
TABLE OF CONTENT	X
LIST OF TABLES	XVII
LIST OF FIGURES	XXIV
LIST OF APPENDIX	XXXI
ABBREVIATIONS AND SYMBOLS	XXXIII
GLOSSARY	XXXVI
 INTRODUCTION	 1
PROBLEM DEFINITION	3
LITERATURE REVIEW	6
PAVEMENTS OF LOW VOLUME ROADS	6
Origin and development of roads	6
Definition and pavement structure of a road	10
Low-volume roads	13
Causes of pavement deterioration	14
Consequences of the influencing factors on gravel roads	16
CONSTRUCTED FOREST THOROUGHFARES IN SLOVENIA	18
Type and amount of thoroughfares	18
Type of constructed forest thoroughfares and the criteria for their classification	18
Quantity and condition of constructed forest thoroughfares in Slovenia	20
Thoroughfare structure	21
Forest road structure	21
Skid trail structure	22
Engineering properties of soils – basis for constructions in forestry	22
Basic physical properties of forest soils	22
Engineering classification of forest soils	25
Basis for deformability and strength of soils	27
Development of constructed forest thoroughfare network	30

Utilisation trends	30
Construction and maintenance trends.....	31
ROAD BEARING CAPACITY DETERMINATION IN CIVIL ENGINEERING	32
Road bearing capacity definition	32
Procedures and equipment for spot field determination of road bearing capacity	34
CBR Procedure	34
Procedures with circular loading plate and static loading	35
Procedure with the dynamic loading plate	36
Other procedures for carriageway bearing capacity in civil engineering.....	37
THOROUGHFARE BEARING CAPACITY STUDIES IN FORESTRY	38
History of bearing capacity research in forestry	38
Carriageway bearing capacity determination in forestry.....	40
Influence of the external factors on carriageway bearing capacity in forestry	41
Traffic loading	41
Climatic conditions.....	43
Hydrologic conditions	44
Engineering influences on pavement bearing capacity in forestry	44
Road layout and cross-section design.....	44
Selection and properties of the basic construction materials.....	47
Binders, additives and alternative building materials.....	49
Pavement structure design	51
Construction techniques	52
RESEARCH OBJECTIVES AND HYPOTHESIS.....	54
RESEARCH OBJECTIVES.....	54
HYPOTHESES.....	54
MATERIAL AND METHODS	56
STUDY SITES	56
Characteristic thoroughfare segments with typical cross-sections	58
Characteristics of analysed sections on new forest roads.....	59
Characteristics of analysed sections on old forest roads	60
Characteristics of the analysed sections on skid trails.....	61

Observational field on a forest road under construction	61
Transport gravity units (TGU).....	62
TGU Ravnik	63
TGU Soteska	63
FIELD AND LABORATORY METHODS	64
Road traffic loading.....	64
Pavement bearing capacity	65
Measurement locations for bearing capacity measurements	65
Measurement protocol for dynamic deformation module	66
Dynamics of bearing capacity measurements	67
Moisture content in the pavement.....	67
Gravimetric moisture	67
Neutron gauge moisture content of the road pavement	69
Carriageway transverse slope and evenness	70
Structure of a forest road pavement	71
Sampling pits on the analysed forest roads	71
Pavement layer thickness on the sampling pits	72
Thickness of the placed unbound granular materials during road construction	72
Particle size distribution of the road pavement materials	73
Selection and preparation of samples for sieving analysis	73
Sieving protocol and calculating the gradation parameters	74
NON-EXPERIMENTAL DESIGN	75
DATA PROCESSING METHODS	76
RESULTS.....	77
TRAFFIC LOADING OF PRIMARY FOREST ROAD	77
Calibration of the radar traffic detectors.....	77
Extent, structure and dynamic of the traffic on Ravnik and Soteska cross-sections..	81
Average daily traffic of the transport-gravity unit Ravnik	85
Calculation of the traffic loading on the primary forest road Ravnik	87
CARRIAGEWAY BEARING CAPACITY IN SPRING TIME	90
Characteristics of bearing capacity measurements on typical cross-sections.....	90

Extent of conducted bearing capacity measurements and influencing factor survey.....	90
Sources of bearing capacity variations within the treatment.....	91
Relevant values of carriageway bearing capacity.....	94
Average spring carriageway bearing capacity on tractor skid trails	95
Differences in average spring carriageway bearing capacity on forest roads	98
Average bearing capacity of primary forest roads.....	98
Average bearing capacity of secondary forest roads	102
PAVEMENT BEARING CAPACITY VARIATIONS IN TIME	105
Monthly variations in bearing capacity of two primary forest roads.....	105
Differences in average bearing capacity of skid trails after five years	107
Seasonal variations in the bearing capacity of forest roads	110
Seasonal variations in average bearing capacity of primary forest roads.....	110
Seasonal variations in average bearing capacity of secondary forest roads	112
Variations in pavement bearing capacity during forest road construction	114
Average thickness of constructed layers on observational track »Bajs«.....	114
Bearing capacity increment during pavement construction	116
EFFECTS OF WATER ON BEARING CAPACITY.....	117
Determination of moisture content in the pavement.....	117
Reference value of moisture content in the pavement.....	117
Estimating moisture content with gravimetric samples of wearing course material	119
Estimating moisture content with gravimetric samples from sampling pits	120
Effects of moisture content on carriageway bearing capacity measurements	121
Moisture conditions on roads during seasonal measurements of bearing capacity	121
Dependence of road carriageway bearing capacity on gravimetric moisture.....	122
Dependence of road carriageway bearing capacity on isotope moisture.....	124
Variations in average bearing capacity of the road in case of storm	125
EFFECTS OF INSTALLED MATERIAL ON BEARING CAPACITY	126
Aggregate gradations in pavements	126
Grading characteristics of wearing course aggregates on the analysed road sections.....	128
Representativeness of the material specimens form sample pits.....	129
Grading for bearing course materials in sample pits	131
Grading of the materials on skid trail driving lanes	133
Grading of the carriageway wearing course on the forest roads	134

Classification of pavement materials in the analysed forest thoroughfares	135
Classification of the materials in bearing courses of the forest roads and skid trails.....	135
Classification of the wearing course aggregates on forest roads.....	137
Pavement structure in sample pits of forest roads	138
Effects of bearing course thickness and subgrade type on bearing capacity	141
IMPACTS OF THOROUGHFARE USE ON PAVEMENT BEARING CAPACITY	142
Assessing the influence of traffic on forest thoroughfare bearing capacity	142
Suitability of skid trails for truck transport	143
Carriageway transverse evenness as forest road bearing capacity estimation	144
DISCUSSION.....	146
USABILITY OF THE DYNAMIC LOADING PLATE	146
SUITABILITY OF INSTALLED MATERIALS	148
EFFECTS OF MOISTURE CONTENT AND PAVEMENT THICKNESS ON CARRIAGEWAY BEARING CAPACITY	151
SEASONAL SUITABILITY OF SKID TRAILS FOR TRUCK TRANSPORT	153
PAVEMENT BEARING CAPACITY UNIFORMITY	154
IMPACT OF TRAFFIC LOADING ON PAVEMENT BEARING CAPACITY	156
DEVELOPMENT OF SAMPLING AND MEASUREMENT METHODS.....	158
Sampling for representative bearing capacity measurements	158
Dynamic deforming module measurement	159
Determination of moisture content in pavement layer	161
Particle size analysis and quality of fines	162
Traffic loading detection	163
Other used field methods	164
CONCLUSIONS AND RECOMENDATIONS	166
SUMMARY	173
REFERENCES	176
ACKNOWLEDGEMENTS	
APPENDIX	

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Osnovni podatki o analiziranih prometnicah na dan 1. januar 2009	56
Preglednica 2: Načrtovani vzorčni poskusi za preverjanje domnev o nosilnosti gozdnih prometnic	75
Preglednica 3: Obseg in struktura prometa za štiri tedne na profilu Ravnik (A: iz gozda; B: v gozd)	83
Preglednica 4: Obseg in struktura prometa za štiri tedne na profilu Soteska (A: iz gozda; B: v gozd)	85
Preglednica 5: Obseg prometa na profilu Ravnik glede na letni čas, delovni teden in kategorijo vozil	86
Preglednica 6: Obseg podatkov terenskih meritev nosilnosti, zbranih po štirih ciklikih in njihova razporeditev glede na kategorije in starost prometnic ter geološko podlago na profilu (K – karbonat, M – mešano)	90
Preglednica 7: Značilnost razlik povprečne spomladanske nosilnosti vlak med analiziranimi odseki in merilnimi mesti (značilni vplivi so označeni krepko)	96
Preglednica 8: Značilnost razlik povprečne spomladanske nosilnosti novih glavnih gozdnih cest glede na analizirane odseke in merilna mesta	99
Preglednica 9: Značilnost razlik povprečne spomladanske nosilnosti starih glavnih gozdnih cest glede na analizirane odseke in merilna mesta	100
Preglednica 10: Razlike v spomladanski nosilnosti glavnih cest glede na starost in geološko podlago	101
Preglednica 11: Značilnost razlik spomladanske povprečne nosilnosti novih stranskih gozdnih cest glede na analizirane odseke in merilna mesta	102
Preglednica 12: Značilnost razlik spomladanske povprečne nosilnosti stranskih gozdnih cest	104
Preglednica 13: Značilnost razlik v povprečni nosilnosti med dvema merilnima mestoma na glavnih gozdnih cestah »Ravnik« in »Soteska« tekom leta 2009	107
Preglednica 14: Razlike v povprečnem posedku med dvema kategorijama vlak in tremi termini meritev	109
Preglednica 15: Značilnost razlik v nosilnosti nasipne kolesnice med dvema različno starima skupinama glavnih cest v treh letnih časih leta 2009	111
Preglednica 16: Značilnost razlik v nosilnosti nasipne kolesnice med štirimi skupinami stranskih gozdnih cest v treh letnih časih leta 2009	113
Preglednica 17: Povprečne debeline plasti voziščne konstrukcije na opazovalnem odseku »Bajs«	116
Preglednica 18: Spremembe povprečne nosilnosti vozišča in njena variabilnost na opazovalnem polju »Bajs«	117

Preglednica 19: Povprečna sezonska vsebnost vlage obrabne plasti na analiziranih gozdnih cestah leta 2009.....	122
Preglednica 20: Padec nosilnosti vozišča dveh gozdnih cest na karbonatni podlagi ob nevihti 4. avgusta 2009	126
Preglednica 21: AC klasifikacija zemljin nosilnih plasti na analiziranih odsekih gozdnih cest	136
Preglednica 22: AC-klasifikacija zemljin v krovnii plasti (0–10 cm) na analiziranih grajenih vlakih.....	136
Preglednica 23: AC klasifikacija zmesi zrn obrabne plasti na analiziranih odsekih gozdnih cest	137
Preglednica 24: Nosilnost, debelina in vsebnost vode v vzorčnih izkopih na analiziranih cestah	139
Preglednica 25: Razlike v povprečni nosilnosti vlak v poletnem času in stranskih cest spomladi.....	143
Preglednica 26: Povprečne vrednosti parametrov zunanje morfologije cestišč na analiziranih novih cestah	145

LIST OF TABLES

Table 1: Basic parameters about analysed thoroughfares on January 1 st 2009	56
Table 2: Planned non-experimental designs for forest thoroughfare bearing capacity assumption validation	75
Table 3: Traffic scale and structure for four weeks on the cross-section Ravnik (A: out; B: into forest).....	83
Table 4: Traffic scale and structure for four weeks on the cross-section Soteska (A: out; B: into forest).....	85
Table 5: Traffic scale on the cross-section Ravnik according to the season, working week and vehicle class	86
Table 6: Extend of collected field measurement for bearing capacity data in four campaigns and their distribution according to the road category, road age and geologic base on a cross-section (K – lime, M – mixed).....	90
Table 7: Significance in average spring skid trail bearing capacity among analysed sections and measurement spots (significant factors are marked bold).....	96
Table 8: Significant differences in average spring bearing capacity on new primary forest roads regarding the analysed sections and measurement spots	99
Table 9: Significant differences in average spring bearing capacity on old primary forest roads regarding the analysed sections and measurement spots	100
Table 10: Differences in spring bearing capacity on primary roads regarding the age and geological base.....	101
Table 11: Significant differences in average spring bearing capacity on new secondary forest roads regarding analysed sections and measurement spots	102
Table 12: Significant differences in average spring bearing capacity on secondary forest roads.....	104
Table 13: Significant differences in average bearing capacity among two measurement spots on the primary forest roads »Ravnik« and »Soteska« during the year 2009	107
Table 14: Differences in average deflection among two skid trail classes and three measurement terms	109
Table 15: Significant differences in embankment rut bearing capacity among two differently old primary roads during three seasons in 2009	111
Table 16: Significant differences in embankment rut bearing capacity among four groups of secondary forest roads during three seasons in 2009.....	113
Table 17: Average thickness of pavement layers on observational track »Bajs«	116
Table 18: Differences in average carriageway bearing capacity and its variability on the observational track »Bajs«.....	117

Table 19: Average seasonal moisture content of wearing course on the analysed forest roads in 2009 ²⁰	122
Table 20: Drop in carriageway bearing capacity for two forest roads on lime base after a storm on August 4 th 2009.....	126
Table 21: AC soil classification of bearing courses on the analysed forest roads.....	136
Table 22: AC AC classification of surfacing layer (0–10 cm) on the analysed constructed skid trails.....	136
Table 23: AC classification of wearing course aggregate on the analysed sections of forest roads.....	137
Table 24: Bearing capacity, thickness and moisture content in sample pits on the analysed roads.....	139
Table 25: Differences in average bearing capacity of skid trails in summer and secondary roads in spring.....	143
Table 26: Average values of parameters of exterior roadway morphology for the analysed new roads	145

KAZALO SLIK

Slika 1: Gozdne ceste zgrajene v šestdesetih letih prejšnjega stoletja (levo, Hafner, 1956: naslovnica) uporabljamo danes; današnja gradnja mora ustrezati transportu lesa čez petdeset let (desno).	4
Slika 2: Lesene prometnice iz različnih obdobj človeške civilizacije: levo – neolitik (Bunning, 2014), sredina – železna doba (Corlea Trackway, 2013), desno – srednji vek (History of the road transport, 2014)	6
Slika 3: Značilne plasti rimske ceste (levo, Žmavc, 2007: 22) in sedanji videz ceste Via Appia (desno).....	7
Slika 4: Primerjava bistvenih sestavnih delov v gradbenih objektih (Žmavc, 2007: 12)....	10
Slika 5: Prečni prerez asfaltnega vozišča na regionalni javni cesti v Sloveniji ob prenovi konstrukcijskih elementov jeseni 2014.....	11
Slika 6: Prikaz porazdelitve napetosti v tleh pod gozdarskim vozilom po Boussinesqu	15
Slika 7: Shema dejavnikov propadanja vozišč	16
Slika 8: Kopičenje deformacij vozišča (prirejeno po Brown, 1990: A.6)	17
Slika 9: Tipične trajne poškodbe gramoznih vozišč na ravnih (levo) in strmih (desno) odsekih.....	17
Slika 10: Splošni model zgradbe gozdne ceste v prečnem profilu (Merkblatt Nr. 201. Unterbau: Begriffe, 1965).....	21
Slika 11: Prečni profil iz projektne dokumentacije za gozdno cesto na Kočevskem okoli leta 1980 (Poje, 1993: priloga 2)	21
Slika 12: Prikaz tipov zrnivosti in enega vzorca peščeno meljaste zemljine gozdnih tal...	24
Slika 13: Razmerja med strižno trdnostjo in togostjo zemljine.....	29
Slika 14: Trendi rabe grajenih vlak (levo) in kamionskega prevoza lesa (desno).....	30
Slika 15: Miniranje pri gradnji na težkih terenih (levo) in »in-situ« drobljenje lokalne kamnine (desno) kot glavna vira materiala nosilnih plasti gozdni cest v prihodnje	32
Slika 16: Razčlenitev vplivov na nosilnost vozni površin (Žmavc, 2007: 327).....	33
Slika 17: Različne naprave za merjenje togosti vozišč: A-Cleigg Hammer (Avstralija), B-Zorn ZFG02 (Nemčija), C-Dynatest 3301 (V. Britanija; Dynatest 3031 LWD, 2006), D-B&C (Madžarska; Tompai, 2008: 103)	37
Slika 18: Značilni modeli graditve gozdnih prometnic v Sloveniji v letih 2000-2010	46
Slika 19: Ključna območja (TSC 06.200 : 2003) in meje (Žmavc, 1970: 47) za hitro presojo zrnivosti materialov pri gradnji gozdnih cest (A: neprimerno za stabilizacijo, B: vse vrste stabilizacije, C: neprimerno za mehanično stabilizacijo, D: samo za stabilizacijo z apnom)	48
Slika 20: Ostanke telfordskega tlaka na gozdni cesti (levo) in neustrezna sanacija napačno izdelanega vozišča s prodnato obrabno plastjo (desno).....	52

Slika 21: Lega proučevanih grajenih gozdnih prometnic	57
Slika 22: Določitev možnih odsekov (puščica) in izžrebanih značilnih odsekov (rumena puščica) v načrtu ceste	58
Slika 23: Razporeditev karakterističnih prečnih profilov (KPP) na izbranih odsekih nove stranske gozdne ceste	59
Slika 24: Tipičen jesenski videz značilnih odsekov analiziranih kategorij gozdnih prometnic	60
Slika 25: Spremljanje poteka izdelave nosilne plasti na opazovalnem odseku ceste »Bajs« z označeno referenčno točko opazovalnega prečnega profila na odkopni brežini (v krogu)	62
Slika 26: Montaža števca prometa na cesti »Soteska« (levo) in komponente naprave (desno)	64
Slika 27: Oznake mest za meritve nosilnosti, zgoščenosti in vlažnosti vozišča	65
Slika 28: Terenska oprema za odvzem in obdelavo gravimetričnega vzorca iz obrabnega sloja ceste	68
Slika 29: Meritve vlažnosti z izotopsko sondo na cesti »Čutarovka«	69
Slika 30: Oprema za meritve dimenzij cestišča ter prečnega naklona in prečne ravnosti vozišča	70
Slika 31: Oblika in dimenzije vzorčnega izkopa (siva stena izkopa je vertikalna)	71
Slika 32: Izvedba vzorčnega izkopa (A) in popisa notranje morfologije voziščne konstrukcije (B)	72
Slika 33: Oprema za meritve oblike cestišča (levo) in postopek merjenja višin (desno)	73
Slika 34: Gozdarska transporta kompozicija brez tovora med zaznavo vozila	78
Slika 35: Viri napak meritev dolžine prometnega merilnika: smer vožnje (levo), lega na vozišču (sredina) in zasuk ohišja merilnika glede na os ceste (desno)	79
Slika 36: Značilna vozila na merilnem profilu Ravnik v času meritev prometa leta 2009 .	80
Slika 37: Korelacija med dejanskimi in zaznanimi vrednostmi dolžin opazovanih vozil na profilu Ravnik po nastavitvah merilnika iz leta 2009 (N = 9)	81
Slika 38: Frekvenčna porazdelitev dolžin vozil na profilu Ravnik v letu 2009	82
Slika 39: Povprečni letni dnevni promet na Ravniku leta 2009 za delovne (zgoraj) in nedelovne dneve (spodaj)	87
Slika 40: Posamezne vrednosti nosilnosti vozišča za tri merilna mesta (»a«, »b«, »c«) v slučajnem vzorcu devetih tipičnih prečnih profilov stranske gozdne ceste »Čutarovka«	91
Slika 41: Odstotek odstopanja nosilnosti vozišča na nasipu od meritve na odkopu za devet profilov na novi stranski gozdni cesti »Čutarovka«	92

Slika 42: Posamezne vrednosti nosilnosti vozišča za tri merilna mesta (črno – a, rumeno – b, zeleno – c) in tri sezone merjenj v vzorcu šestih prečnih profilov stranske gozdne ceste	93
Slika 43: Razlike v povprečni spomladanski nosilnosti odsekov glede na vrsto merodajne vrednosti nosilnosti v profilu (levo – G2, sredina – G3, desno – V1).....	94
Slika 44: Porazdelitev spomladanskih nosilnosti vlak na nasipu (levo) in intervalna ocena njihovih srednjih vrednosti (n = 9) na dveh analiziranih geoloških podlagah (desno)	96
Slika 45: Povprečja in intervalne vrednosti vseh meritev nosilnosti na odseku za analizirane vlake spomladi 2009	97
Slika 46: Neustrezna voziščna konstrukcija tretjega odseka na gozdni cesti »Knipajz« (cesta 4 v preglednici 9).....	100
Slika 47: Interakcije med geološko podlago in starostjo KPP na glavnih gozdnih cestah po 2 x 2 faktorskem vzorčnem poskusu za EVDbc (glej tudi preglednico 10)	101
Slika 48: Vpliv odseka in merilnega mesta na spomladansko nosilnost novih stranskih cest (senčeno: mešana podlaga)	103
Slika 49: Vpliv odseka in merilnega mesta na spomladansko nosilnost starih stranskih cest (senčeno: karbonatna podlaga)	104
Slika 50: Interakcije med geološko podlago in starostjo KPP na stranskih gozdnih cestah po 2 x 2 faktorskem vzorčnem poskusu (glej tudi preglednico 12).....	105
Slika 51: Primerjava letne dinamike povprečne nosilnosti dveh glavnih gozdnih cest na karbonatni podlagi	106
Slika 52: Razlike v nosilnosti vlak na karbonatni podlagi glede na sezono in merilno mesto	108
Slika 53: Razlike v izmerjenih posedkih pri vlakah na karbonatni podlagi glede na sezono in merilno mesto	108
Slika 54: Razlike v izmerjenih posedkih pri dveh skupinah vlakah v roku petih let	110
Slika 55: Razlike v nosilnosti voziščnih konstrukcij dveh skupin glavnih cest v treh letnih časih leta 2009	112
Slika 56: Razlike v nosilnosti voziščnih konstrukcij dveh skupin stranskih cest v treh letnih časih leta 2009	113
Slika 57: Vrsta materiala ter oblika spodnjega ustroja na opazovalnem polju »Bajs« (profil št. 61)	114
Slika 58: Oblike voziščne konstrukcije na opazovalnem polju »Bajs«: profili 51 – 53....	115
Slika 59: Izotopska vlažnost analiziranih voziščnih konstrukcij gozdnih cest 7. aprila 2009 ter primerjave vsebnosti vlage glede na referenčno lego »d« (med kolesnicami). 118	
Slika 60: Korelacija med izotopsko in gravimetrično vlažnostjo gramozne VK med kolesnicama	119

Slika 61: Indeksi vlažnosti za vzorce materialov voziščnih konstrukcij z vzorčnih izkopov .	120
Slika 62: Odvisnost nosilnosti kolesnice v nasipu od gravimetrične vsebnosti vlage obrabne plasti za staro stransko cesto na karbonatni podlagi (levo) in novo stransko cesto na mešeni podlagi (desno)	123
Slika 63: Odvisnost nosilnosti kolesnice v nasipu od gravimetrične vsebnosti vlage obrabne plasti za novo glavno cesto na karbonatni podlagi (levo) in novo glavno cesto na mešeni podlagi (desno)	123
Slika 64: Odvisnost nosilnosti vozišča (povprečje merilnih mest »b« in »c«) od izotopske vsebnosti vlage za staro glavno cesto na karbonatni podlagi (levo) in novo stransko cesto na mešeni podlagi (desno)	125
Slika 65: Zrnavost materialov voziščne konstrukcije enega izkopa gozdne ceste na mešani podlagi (levo: globina 0–10 cm; sredina: globina 10–30 cm; desno: globina 30–40 cm)	127
Slika 66: Potek krivulj zrnavosti zmesi zrn obrabne plasti na dveh profilih nove stranske gozdne ceste »Macesnova« (MA) v treh terminih izkopa gravimetričnih vzorcev (globina 0–10 cm)	128
Slika 67: Zrnavost zmesi zrn obrabne plasti šestih profilov na dveh odsekih stranske gozdne ceste »Planinca«	129
Slika 68: Primerjava zrnavosti odsekov in izkopov na glavni gozdni cesti »Ravnik« (globina 0–10 cm)	130
Slika 69: Primerjava zrnavosti odsekov in izkopov na glavni gozdni cesti »Ravnik« (globina 10–30 cm)	130
Slika 70: Zrnavosti treh plasti vzorčnega izkopa na stranski gozdni cesti »Lipovec« (mešana podlaga)	131
Slika 71: Primerjava povprečne zrnavosti izkopov v globini 20 cm za analizirane glavne gozdne ceste	132
Slika 72: Primerjava povprečne zrnavosti izkopov v globini 20 cm za analizirane stranske gozdne ceste	132
Slika 73: Zrnavost površinskega nivoja vozišča (0–10 cm) na analiziranih vlakih	133
Slika 74: Primerjava povprečne zrnavosti obrabnih plasti za analizirane glavne gozdne ceste	134
Slika 75: Primerjava povprečne zrnavosti obrabnih plasti za analizirane stranske gozdne ceste	134
Slika 76: Porazdelitev vzorčnih izkopov glede na povprečno vlažnost, nosilnost in debelino voziščne konstrukcije za stranske ceste na karbonatni (zgoraj) in nekarbonatni podlagi (spodaj)	140

Slika 77: Zveze med nosilnostjo vozišča, debelino voziščne konstrukcije in geološko podlago na vzorčnih izkopih.....	141
Slika 78: Povprečna nosilnosti vozišč gozdnih prometnic spomladi 2009 (S – stare, N – nove)	142
Slika 79: Razlike v srednjih vrednostih nosilnosti med vlakami poleti in stranskimi cestami spomladi.....	143
Slika 80: Odvisnost med globino kolesnice v nasipu in nosilnostjo vozišča za nove glavne gozdne ceste.....	145
Slika 81: Odstranjevanje neustreznih zrn (levo) in njihova vgradnja v nosilne plasti ceste (desno)	150
Slika 82: Sezonska nihanja nosilnosti vozišča stranske gozdne ceste na mešani podlagi.	152
Slika 83: Skeletno vozišče vlake lahko onemogoči meritve dinamičnega deformacijskega modula	160

LIST OF FIGURES

Figure 1: Forest roads built in the sixties from the last century are used nowadays (left, Hafner, 1956: cover page), contemporary construction works must fulfil wood transport after fifty years (right).	4
Figure 2: Wooden thoroughfares from different periods of human civilisation: left – Neolithic (Bunning, 2014), middle – Iron Age (Corlea Trackway, 2013), right – Middle Age (History of the road transport, 2014)	6
Figure 3: Typical layers of Roman road (left, Žmavc, 2007: 22) and present look of the road Via Appia (right)	7
Figure 4: Comparison of essential components in the civil engineering facilities (Žmavc, 2007: 12)	10
Figure 5: Cross-section of the asphalt pavement on a regional public road in Slovenia during structural renovation in autumn 2014	11
Figure 6: Illustration of the stress distribution under forestry vehicle according Boussinesq	15
Figure 7: Scheme of the pavement deterioration factors	16
Figure 8: Accumulation of the carriageway deformations (adapted according Brown, 1990: A.6)	17
Figure 9: Typical permanent damages of gravel roads on flat (left) and steep (right) sections	17
Figure 10: General model of pavement structure on forest road (Merkblatt Nr. 201. Unterbau: Begriffe, 1965)	21
Figure 11: Cross-section from forest road design from Kočevska area around the year 1980 (Poje, 1993: app. 2)	21
Figure 12: Illustration of grading types and one sample of sandy loam forest soil	24
Figure 13: Relations between shear strength and stiffness of soils	29
Figure 14: Trends in constructed skid trail utilisation (left) and truck transportation of timber (right)	30
Figure 15: Blasting in road construction on difficult terrains (left) and »in-situ« crushing of the local stones as a main source of aggregates for base layers of forest roads in the future	32
Figure 16: Structure of the impacts on carriageway bearing capacity (Žmavc, 2007: 327)	33
Figure 17: Various devices for pavement stiffness measurement: A-Cleigg Hammer (Australia), B-Zorn ZFG02 (Germany), C-Dynatest 3301 (G. Britain; Dynatest 3031 LWD, 2006), D-B&C (Hungary; Tompai, 2008: 103)	37
Figure 18: Typical models for forest thoroughfare construction in Slovenia during period 2000-2010	46

Figure 19: Key areas (TSC 06.200 : 2003) and limits (Žmavc, 1970: 47) for rapid evaluation of the materials used in forest road construction (A: unsuitable for stabilisation, B: all stabilisation methods, C: unsuitable for mechanical stabilisation, D: only for stabilisation with lime).....	48
Figure 20: Remnants of the Telford pavement on forest road (left) and wrong sanitation of improperly made carriageway with gravel wearing course (right).....	52
Figure 21: Location of analysed constructed forest thoroughfares	57
Figure 22: Determination of possible (arrow) and selected characteristic sections (yellow arrow) in the road design	58
Figure 23: Arrangement of typical cross-sections (TCP) on selected segments for new secondary road	59
Figure 24: Typical autumn appearance of the typical sections for the analysed forest thoroughfare categories	60
Figure 25: Monitoring bearing layer construction on one of the observational tracks at road »Bajs« with marked reference point for observational cross-section on cut slope (within the circle).....	62
Figure 26: Installation of the traffic counter on the road »Soteska« (left) and parts of the device (right).....	64
Figure 27: Codes of locations for pavement bearing capacity, compactness and moisture measurements	65
Figure 28: Field equipment for deprivation and processing of the gravimetric sample from the road wearing course	68
Figure 29: Moisture measurements using neutron gauge on the road »Čutarovka«	69
Figure 30: Equipment for roadway dimension, carriageway transverse slope and road evenness measurement.....	70
Figure 31: Shape and dimensions of a sampling pit (grey wall of the pit is vertical)	71
Figure 32: Realization of the sampling pit (A) and the pavement inner morphology survey (B)	72
Figure 33: Tools for carriageway shape measurements (left) and procedure of height reading (right)	73
Figure 34: Forestry transport composition without load during vehicle detection	78
Figure 35: Sources of length errors of traffic detector: direction of driving (left), position on carriageway (middle), and rotation of the instrument regarding the road line (right)	79
Figure 36: Typical vehicles on the test cross-section Ravnik during the traffic measurements in the year 2009.....	80
Figure 37: Correlations between true and detected lengths of the observed vehicles on the test cross-section Ravnik according to the detector setting from 2009 (N = 9)	81

Figure 38: Frequency distribution of the vehicle lengths on the cross-section Ravnik in year 2009	82
Figure 39: Average daily traffic on cross-section Ravnik for working days (above) and non-working days (below)	87
Figure 40: Individual values of pavement bearing capacity for three measurement spots (»a«, »b«, »c«) in random sample of nine typical cross-sections on the secondary forest road »Čutarovka«	91
Figure 41: Percentage of deviation in carriageway bearing capacity on fill according to the measurements on cut side for nine cross-sections on the new secondary forest road »Čutarovka«	92
Figure 42: Individual values of carriageway bearing capacity for three measurement spots (black – a, yellow – b, green – c) and three measurement periods in a sample of six typical cross-sections on a secondary forest road	93
Figure 43: Variations in average section bearing capacity in spring regarding the type of relevant bearing capacity value on the cross-section (left – G2, middle – G3, right – V1)	94
Figure 44: Distribution of the spring values of the pavement bearing capacity on fill (left) and interval estimation of their average values (n = 9) on two analysed geological basis (right)	96
Figure 45: Averages and interval values for all bearing capacity measurement within the section on analysed skid trails in spring 2009	97
Figure 46: Inappropriate pavement of the third section on the forest road »Knipajz« (road No. 4 in table 9)	100
Figure 47: Interactions among geological base and road age for TCP on primary forest roads according to 2 x 2 factorial non-experimental design for EVD _{bc} (see also table 10)	101
Figure 48: Influence of the section and measurement spot on the bearing capacity of new secondary roads in spring (shaded: mixed base)	103
Figure 49: Influence of the section and measurement spot on the bearing capacity of old secondary roads in spring (shaded: lime base)	104
Figure 50: Interactions among geological base and road age for TCP on primary forest roads according to 2 x 2 factorial non-experimental design (see also table 12)....	105
Figure 51: Comparison of annual dynamic in average bearing capacity for two primary forest roads on lime base	106
Figure 52: Variations in skid trail bearing capacity on lime base regarding the season and measurement spot	108
Figure 53: Variations in skid trail bearing capacity on lime base regarding the season and measurement spot	108

Figure 54: Variations in measured deflections on two groups of skid trails in five-year period.....	110
Figure 55: Variations in pavement bearing capacity for two groups of primary roads during three seasons in 2009.....	112
Figure 56: Variations in pavement bearing capacity for two groups of secondary roads during three seasons in 2009.....	113
Figure 57: Type of material and shape of the subgrade on observational track »Bajs« (cross-section No. 61).....	114
Figure 58: Pavement shapes on observational track »Bajs«: cross-sections 51 – 53.....	115
Figure 59: Isotope moisture content on April 7 th 2009 for the analysed forest road pavements and comparisons of moisture content according to the reference position »d« (between wheel ruts).....	118
Figure 60: Correlation between isotope and gravimetric moisture content of gravel pavement between wheel ruts.....	119
Figure 61: Moisture indexes for pavement aggregate samples from sampling pits.....	120
Figure 62: Dependence of bearing capacity at wheel rut in embankment from wearing course gravimetric moisture content for an old secondary road on lime base (left) and a new secondary road on mixed base (right)	123
Figure 63: Dependence of bearing capacity at wheel rut in embankment from wearing course gravimetric moisture content for a new primary road on lime base (left) and a new primary road on mixed base (right).....	123
Figure 64: Dependence of carriageway bearing capacity (average of measurement spots »b« and »c«) from isotope moisture content for an old primary road on lime base (left) and a new secondary road on mixed base (right)	125
Figure 65: Gradation of the pavement material from a single test pit of the forest road on mixed base (left: depth 0–10 cm; middle: depth 10–30 cm; right: depth 30–40 cm)..	127
Figure 66: Course of grading curves for wearing course aggregate on two cross-sections of the new secondary forest road »Macesnova« (MA) on three dates of extraction the gravimetric samples (depth 0–10 cm).....	128
Figure 67: Gradation for wearing course aggregate on six cross-sections of the secondary forest road »Planinca«	129
Figure 68: Comparison of gradations between sections and test pits on the primary forest road »Ravnik« (depth 0–10 cm)	130
Figure 69: Comparison of gradations between sections and test pits on the primary forest road »Ravnik« (depth 10–30 cm)	130
Figure 70: Gradations of three layers from test pits on the secondary forest road »Lipovec« (mixed base).....	131

Figure 71: Comparison of test pit average gradations at 20 cm depth for the analysed primary forest roads	132
Figure 72: Comparison of test pit average gradations at 20 cm depth for the analysed secondary forest roads	132
Figure 73: Gradation of the carriageway surface course (0–10 cm) on the analysed skid trails	133
Figure 74: Comparison of the average gradation of wearing courses for the analysed primary forest roads	134
Figure 75: Comparison of the average gradation of wearing courses for the analysed secondary forest roads	134
Figure 76: Arrangement of sample pits according to the average moisture content, bearing capacity and pavement thickness for the secondary roads on lime (above) and mixed base (below).....	140
Figure 77: Relations between carriageway bearing capacity, pavement thickness and geologic base on test pits	141
Figure 78: Average carriageway bearing capacity of forest thoroughfares in spring 2009 (S – old, N – new)	142
Figure 79: Differences in average bearing capacity among skid trails in summer and secondary roads in spring	143
Figure 80: Dependence between wheel rut on embankment and bearing capacity for new primary forest roads	145
Figure 81: Removal of inadequate grains (left) and their placement into bearing courses of road (right)	150
Figure 82: Seasonal variations in carriageway bearing capacity of secondary forest road on mixed base	152
Figure 83: Coarse grains on carriageway can disable dynamic deforming module measurements	160

KAZALO PRILOG

- Priloga A: AC klasifikacija zemljin – skupina grobozrnatih zemljin
- Priloga B: AC klasifikacija zemljin – skupina drobno zrnatih zemljin in šote
- Priloga C: Prikaz območij zrnivosti za različne vrste stabilizacije zemljin v Sloveniji leta 1968 (Brand, 1967 cit. po Žmavc, 1970)
- Priloga D: Odvisnosti ostalih kazalnikov nosilnosti za voziščne konstrukcije cest od dinamičnega deformacijskega modula E_{vd} (Žmavc, neobjavljeno)
- Priloga E: Podrobnejša lokacija analiziranih vlak na predelu Predmeja (zgoraj) in predelu Rogatec (spodaj)
- Priloga F: Analizirani odseki na gozdni cesti 'Bajs' (beli krogi – značilni odseki, črni krogi – opazovalno polje)
- Priloga G: Karta transportno-gravitacijske enote Ravnik – 1113 ha gozdov (JZ Slovenija)
- Priloga H: Karta transportno-gravitacijske enote Soteska – 1914 ha gozdov (JV Slovenija)
- Priloga I: Povprečne vrednosti faktorjev ekvivalentnosti za reprezentativna vozila, določene na podlagi induktivnih števecv prometa na javnih cestah (TSC 06.511 : 2009)
- Priloga J: Izgled odsekov grajenih vlak na mešani podlagi leta spomladi 2009 in spomladi 2014
- Priloga K: Izgled odsekov grajenih vlak na karbonatni podlagi leta spomladi 2009 in spomladi 2014
- Priloga L: Oblike voziščne konstrukcije na opazovalnem polju »Bajs«: profili 41 – 43
- Priloga M: Oblike voziščne konstrukcije na opazovalnem polju »Bajs«: profili 61 – 63
- Priloga N: Odvisnost nosilnosti vozišča (povprečje merilnih mest »b« in »c«) od izotopske vsebnosti vlage za novo stransko cesto na karbonatni podlagi (levo) in staro stransko cesto na karbonatni podlagi (desno)
- Priloga O: Primerjava zrnivosti odsekov in izkopov na dveh stranskih gozdnih cestah na mešani podlagi (zgoraj: »Zlaka«, globina 0-10 cm; spodaj: »Strešni«, globina 10-30 cm)
- Priloga P: Primerjava povprečne zrnivosti izkopov v globini 35 cm za analizirane glavne (zgoraj) in stranske gozdne ceste (spodaj)
- Priloga Q: Slike vzorčnih izkopov za ceste »Bajs«, »Knipajz«, »Ravnik« in »Soteska«
- Priloga R: Slike vzorčnih izkopov za ceste »Macesnova«, »Čemerje«, »Čutarovka« in »Planinca«
- Priloga S: Slike vzorčnih izkopov za ceste »Lipovec«, »Zlaka«, »Strešni« in »Kovkovo«
- Priloga T: Porazdelitev vzorčnih izkopov glavnih cest glede na povprečno vlažnost, nosilnost in debelino voziščne konstrukcije

Priloga U: Odvisnost med globino kolesnice v nasipu in nosilnostjo vozišča za nove stranske ceste na karbonatu (zgoraj) in nove stranske ceste na mešani podlagi (spodaj)

LIST OF APPENDIX

- Appendix A: AC- soli classification - coarse grained group
- Appendix B: AC- soli classification – fine grained group and peat soil
- Appendix C: Grading zones for different soil stabilisation techniques in Slovenia during 1968 (Brand, 1967 cit. after Žmavc, 1970)
- Appendix D: Dependence of other bearing capacity indicators for road pavements from dynamic deforming module E_{vd} (Žmavc, neobjavljeno)
- Appendix E: Detailed location of analysed skid trails on study area Predmeja (above) and on study area Rogatec (below)
- Appendix F: Analysed segments on forest road 'Bajs' (white circles – typical segments, black circles – observation track)
- Appendix G: Map of the transport-gravity unit Ravnik – 1113 hectares of forests (SW Slovenia)
- Appendix H: Map of the transport-gravity unit Soteska – 1914 hectares of forests (SE Slovenia)
- Appendix I: Average values of the equivalency factors for representative vehicles, determined on the basis of inductive traffic counter on public roads (TSC 06.511 : 2009)
- Appendix J: Appearance of the constructed skid trail sections on mixed base during spring 2009 and 2014
- Appendix K: Appearance of the constructed skid trail sections on mixed base during spring 2009 and 2014
- Appendix L: Pavement shapes on observational track »Bajs«: cross-sections 41 – 43
- Appendix M: Pavement shapes on observational track »Bajs«: cross-sections 61 – 63
- Appendix N: Dependence of carriageway bearing capacity (average of measurement spot »b« and »c«) from isotope moisture content for new secondary road on lime base (left) and old secondary road on lime base (right)
- Appendix O: Comparison of gradations between sections and test pits on two secondary forest roads on mixed base (above: »Zlaka«, depth 0-10 cm; below: »Strešni«, depth 10-30 cm)
- Appendix P: Comparison of test pit average gradations at 35 cm depth for analysed primary (above) and secondary forest roads (below)
- Appendix Q: Photos of sample pits for roads »Bajs«, »Knipajz«, »Ravnik« and »Soteska«
- Appendix R: Photos of sample pits for roads Macesnova«, »Čemerje«, »Čutarovka« and »Planinca«
- Appendix S: Photos of sample pits for roads »Lipovec«, »Zlaka«, »Strešni« and »Kovkovo«

Appendix T: Arrangement of sample pits form primary roads according average moisture content, bearing capacity and pavement thickness

Appendix U: Dependence between wheel rut on embankment and bearing capacity for new secondary roads on lime base (above) and new secondary roads on mixed base (below)

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

ABBREVIATIONS AND SYMBOLS

Okrajšave imen analiziranih cest / Abbreviated names of analysed roads:

BA	Cesta Bajs – Goli Cirnik Road Bajs – Goli Cirnik
CE	Cesta Veliki Češevik Road Veliki Češevik
CU	Cesta Čutarovka Road Čutarovka
KN	Cesta Knipajz – Krekovše Road Knipajz – Krekovše
KO	Cesta Kovkovo Road Kovkovo
LI	Cesta Lipovec – Sotla Road Lipovec – Sotla
MA	Cesta Macesnova – Jelendol Road Macesnova – Jelendol
PL	Cesta Jezero – Planinca Road Jezero – Planinca
RA	Cesta Ravnik – Krožna cesta Road Ravnik – Krožna cesta
SO	Cesta Soteska – Kočevski rog Road Soteska – Kočevski rog
ST	Cesta Strešni vrh Road Strešni vrh
ZL	Cesta Osojna – Zlaka Road Osojna – Zlaka

Ostale okrajšave / Other abbreviations:

GC	Gozdna cesta (Forest road)
GIS	Gozdarski inštitut Slovenije (Slovenian Forestry Institute)
KPP	Karakteristični prečni profil (TCS Typical cross-section)
MPC	Manjprometna cesta (Low-volume road)
NOO	Nominalna osna obremenitev (NAL Normal axel load)
NPP	Normalni prečni profil (Normal cross-section)

OECD	Organizacija za ekonomsko sodelovanje in razvoj (Organisation for economic cooperation and development)
OPP	Opazovalni prečni profil (OCS Observed cross-section)
PDLP	Povprečna dnevna letna prometna obremenitev (ADT Average daily annual traffic loading)
SIST	Slovenski inštitut za standardizacijo (Slovenian Institute for standardisation)
TGE	Transportno gravitacijska enota (Transport gravity unit)
TSC	Tehnična specifikacija za javne ceste (Technical specifications for public roads)
VK	Voziščna konstrukcija (Pavement)
ZGS	Zavod za gozdove Slovenije (Slovenian Forest Service)

Seznam simbolov / List of symbols:

m	Mg	Masa vzorca tal / Mass of the soil sample
m_s	kg	Masa trdnega dela tal (Mass of the solids)
m_w	kg	Masa vode (Mass of the water)
V	(m ³)	Prostornina vzorca (Volume of the sample)
V_s	(m ³)	Prostornina trdne snovi (Volume of the solids)
V_w	(m ³)	Prostornina vode (Volume of the water)
V_g	(m ³)	Prostornina plinaste faze (Volume of the gases)
V_v	(m ³)	Prostornina votlin (Volume of the voids)
n	---	Poroznost, delež por (Porosity)
W	(kN)	Teža vzorca (Sample weight)
W_s	(kN)	Teža trdne snovi (Weight of the solids)
W_w	(kN)	Teža vode (Weight of the water)
γ	(kNm ⁻³)	Prostorninska teža tal (Bulk weight of the soil)
γ_D	(kNm ⁻³)	Suha prostorninska teža (Dry bulk weight)
γ_s	(kNm ⁻³)	Specifična teža trdne snovi (Specific weight of the solids)
γ_w	(kNm ⁻³)	Specifična teža vode (Specific weight of the water)
ρ_s	(kgm ⁻³)	Gostota snovi (Density of solids)
ρ_w	(kgm ⁻³)	Gostota vode (Density of the water)
g	(ms ⁻²)	Zemeljski pospešek (Gravity)
w	(m. - %)	Vsebnost vlage (Moisture content)
w_{OPT}	(%)	Optimalna vsebnost vlage (Optimal moisture content)
w_L	(%)	Meja židkosti (Liquid limit)
w_P	(%)	Meja plastičnosti (Plastic limit)
w_S	(%)	Meja krčenja (Swelling limit)

Seznam simbolov – nadaljevanje / List of symbols - continued:

I_P	(%)	Indeks plastičnosti (Plastic index)
I_C	---	Indeks konsistence (Consistency index)
D_{10}	mm	Dolžina stranice sita (mm) skozi katero se preseje 10 m.% zmesi – učinkoviti premer (Mesh size that pass 10 m.- % of aggregate – effective diameter)
D_{30}	mm	Dolžina stranice sita skozi katero se preseje 30 m.% zmesi (Mesh size that pass 30 m.- % of aggregate)
D_{60}	mm	Dolžina stranice sita skozi katero se preseje 60 m. % zmesi - prevladujoči premer (Mesh size that pass 10 m.- % of aggregate – prevailing diameter)
C_c	---	Količnik ukrivljenosti (Coefficient of curvature)
C_u	---	količnik neenakomernosti (Uniformity coefficient)
E	MPa	Modul elastičnosti (Elastic module)
E_{v1}	MN/m ²	Statični deformacijski modul E_{v1} (Static deforming module E_{v1})
E_{v2}	MN/m ²	Statični deformacijski modul E_{v2} (Static deforming module E_{v2})
E_{vd}	MN/m ²	Dinamični deformacijski modul (Dynamic deforming module)
M_E	MN/m ²	Modul stisljivosti (Compressibility module)
M_r	(kgm ⁻¹ s ⁻²)	Prožnostni modul (Resilience module)
ν	---	Poissonovo razmerje (Poisson ratio)
σ	kPa	Totalna normalna napetost (Total tensile stress)
σ'	kPa	Efektivna normalna napetost (Effective tensile stress)
ε	mm	Raztezek (Strain)
τ	kPa	Totalna strižna napetost (Total shear strength)
ϕ	°	Strižni kot (Friction angle)
CI	kPa	Konusni indeks (Cone index)
CI_{10}	kPa	Konusni indeks v globini 10 cm (Cone index at 10cm depth)
CI_{20}	kPa	Konusni indeks v globini 20 cm (Cone index at 20cm depth)
NGP	kPa	Nominalni tlak na podlago (Normal ground pressure)

SLOVAR IZRAZOV GLOSSARY

- Asfaltna voziščna konstrukcija** (Asphalt pavement) je del utrditve prometne površine z asfaltno krovno plastjo; vrsta preostalih nosilnih plasti v voziščni konstrukciji ni opredeljena.
- Benkelmanova gred** (Benkelman-beam) je naprava za določitev elastičnega ali celokupnega posedka vozne površine pod kolesom vozila z določeno statično obremenitvijo (praviloma 50 kN).
- Brežina** (Slope) je naravno nastala ali zgrajena nagnjena površina zemljišča ob cestnem telesu. Ločimo odkopne in nasipne brežine.
- Cestišče** (Roadway) je del ceste, ki ga lahko sestavljajo vozišče, odstavní, ločilni in robni pasovi, kolesarske steze in pločniki, bankine in naprave za odvodnjavanje tik ob vozišču ali robnemu pasu ter odstavní površine.
- Cestno telo** (Road body) sestavljajo vsi materiali, uporabljeni za nasipe in utrditev ceste med planumom temeljnih tal in vozno površino ali drugo zaključeno površino.
- Delež kamnitih zrn** (Aggregate content) pomeni masni delež kamnitih zrn določene velikosti v zmesi (m.-%).
- Dimenzioniranje voziščne konstrukcije** (Pavement design) zajema izbiro plasti voziščne konstrukcije, izbiro materialov za posamezne plasti ter določanje debelin plasti in načina njihove izdelave.
- Dinamični deformacijski modul** (Dynamic modulus of deformation) je značilna vrednost za deformabilnost materiala pri definirani sunkoviti obremenitvi krožne plošče s padajočo lahko utežjo, določena na osnovi izmerjene amplitude posedka plošče s.
- Doba trajanja voziščne konstrukcije** (Pavement life time) je čas načrtovane primerne uporabnosti vozne površine v pogledu varnosti, udobnosti in gospodarnosti vožnje.
- Drobljenec** (Crushed aggregate) je zmes popolnoma drobljenih kamnitih zrn velikosti do 63 mm, ki imajo najmanj 90% lomljenih ploskev.
- Ekvivalentna prometna obremenitev** (Equivalent traffic load) je obremenitev, izražena z enakovrednim številom prehodov nazivne (nominalne) osne obremenitve.
- Enakozrnata zmes zrn** (Single-sized aggregate) sestoji iz kamnitih zrn zelo podobne velikosti (enega razreda).
- Evrokod** (Eurocode) je sistem evropskih standardov za projektiranje gradbenih konstrukcij.

Faktor ekvivalentnosti (Equivalency factor) pomeni enakovreden vpliv na utrujanje v odnosu na nazivno (nominalno osno) obremenitev.

Fini delci (Fines) je označba za frakcijo v zmesi kamnitih zrn, ki gre skozi sito 0,063 mm.

Frakcija kamnitih zrn (Aggregate size) je označba zmesi zrn na osnovi spodnje (d) in zgornje (D) velikosti stranice kvadratne odprtine sita, izražena kot d/D ; ta označba vključuje možnost, da nekatera zrna ostanejo na zgornjem situ (nadmerna zrna) in da gredo skozi spodnje sito (podmerna zrna).

Geotehnika (Geotechnical engineering) je veja gradbeništva in inženirske geologije, ki se ukvarja z inženirskimi lastnostmi zemeljskih materialov ter uporablja principe mehanike tal in mehanike hribin za reševanje praktičnih problemov, temeljenja, stabilnosti in zemeljskih del.

Globina zmrzovanja (Frost depth) je največja globina, do katere seže izoterma 0°C v dolgotrajnem mrazu.

Gozdna cesta (Forest road) je grajena gozdna prometnica, ki je namenjena predvsem gospodarjenju z gozdom, je nekategorizirana v skladu s predpisi, ki urejajo javne ceste, omogoča racionalen prevoz gozdnih lesnih sortimentov, je javnega značaja in je vodena v evidenci gozdnih cest.

Gozdna vlaka (Skid trail) je grajena ali negrajena gozdna prometnica, namenjena spravilu lesa s pravilnimi sredstvi.

Graditev objekta (Construction) obsega projektiranje, gradnjo in vzdrževanje objekta. Je investicijski proces, ki ga usmerjamo s tehnikami projektnega vodenja.

Gradnja objekta (Building) je izvedba del, s katerimi se zgradi nov objekt oziroma se objekt dogradi ali nadgradi in zaradi katerih se bistveno spremeni njegov zunanji izgled.

Gramoz (Gravel) je skupno splošno ime za drobljenec in prodec.

Gramozna cesta (Gravel road) je grajena prometnica, katere voziščna konstrukcija je v celoti sestavljena iz nevezanih zmesi zrn.

Gravimetrična vlažnost (Gravimetric moisture content) pomeni delež vode glede na delež suhe snovi (m. %) ugotovljen s porušnim vzorcem.

Hidrološki pogoji (Hydrological conditions) so pogoji, ki opredeljujejo stanje vode v tleh v bližini ceste.

Indeks mraza (Frost index) je vsota srednjih (negativnih) dnevnih temperatur zraka od začetka do konca obdobja zmrzovanja; označuje trajanje in intenzivnost mraza na določenem kraju.

Izotopski merilnik (Isotope gauge) je naprava za nedestruktivno merjenje gostote in vlage gradbenih materialov; v osnovni sestoji iz vira sevanja (gama žarki, hitri nevtroni) in detektorja.

Kamnina (Rock) trdni sestavni del zemeljske skorje s stalno mineralno sestavo.

Kamnita posteljica (Mineral capping layer) je vrhnja plast nasipa ali temeljnih tal, ki je sestavljena iz mehansko stabilizirane naravne, mešane ali drobljene zmesi kamnitih zrn.

Karakteristični prečni profil (Typical cross-section) je aplikacija normalnega prečnega profila v primeru dodajanja elementov ceste v prečnem prerezu ali v različnih reliefnih pogojih.

Kolesna obremenitev (Wheel load) je normalna sila teže, ki preko koles učinkuje na voziščno konstrukcijo.

Kolesnica (Rut) je vzdolžni žleb, ki nastane v območju kolesne sledi zaradi preoblikovanja v voziščno konstrukcijo in/ali v podlago vgrajenega materiala.

Konusni indeks (Cone index) je značilna vrednost deformabilnosti materiala pri posedanju pritisknega bata, določena na osnovi obremenitve, ki povzroči vnaprej določen posedek.

Ledena leča (Ice lens) je značilna oblika porne vode, ki pri zmrzovanju nastane zaradi povečanja vsebnosti vode v materialu.

Maloprometna cesta (Low-volume road) je regionalna cesta, lokalna cesta ali pot ter nekategorizirana cesta, ki ima prometno obremenitev do 500 vozil na dan.

Mejne krivulje zrnivosti (Grading curve limits) so krivulje, ki omejujejo območje dovoljenega nihanja sestave zmesi kamnitih zrn.

Merodajna prometna obremenitev (Design traffic loading) je značilna vrednost za prometno obremenitev voziščne konstrukcije enega voznega pasu v načrtovani dobi trajanja, določena na osnovi povprečnega letnega dnevnega prometa (števila vozil) in rasti le-tega ter dodatnih vplivov: števila in širin voznih pasov, največjega vzdolžnega nagiba vozišča in morebitnih dinamičnih učinkov; pomeni vsoto števila prehodov nazivne osne obremenitve (100 kN).

Modul reakcije tal (Modulus of subgrade reaction) je značilna vrednost za deformabilnost materiala pri določeni obremenitvi krožne plošče, določena na osnovi nastalega posedka.

Nasip (Embankment) je del cestnega telesa med posteljico in temeljnimi tlemi, zgrajen iz zemljin in/ali kamnin.

Nazivna osna obremenitev (Nominal axle load) je obremenitev enojne osi vozila s 100 kN, ki se prenaša z dvojnimi kolesi (4 x 25 kN) na vozno površino; opredeljena je kot osnova za primerjave vpliva različnih osnih obremenitev.

Nevezana nosilna plast (Unbound bearing course) je praviloma najnižja nosilna plast v voziščni konstrukciji, ki je mehansko stabilizirana in sestavljena iz zmesi naravnih, drobljenih ali mešanih kamnitih zrn.

Nevezana obrabna plast (Unbound wearing course) predstavlja obrabno plast voziščne konstrukcije za zelo lahko prometno obremenitev ali začasno ureditev vozne površine iz čimbolj skeletne in zaklinjene zmesi zrn na vozni površini.

Nevezana zmes kamnitih zrn (Mineral aggregate) je označba za zrnati material, običajno določene zrnivosti, predvsem uporabljan za spodnje nosilne plasti v voziščnih konstrukcijah.

Normalni prečni profil (Normal cross-section) je za posamezno cesto izbrana sestava elementov ceste v prečnem prerezu in njihovih dimenzij ter višinskih razmerij.

Nosilna plast (Bearing course) je plast v voziščni konstrukciji med obrabno plastjo in posteljico ali planumom podlage, vgrajena za zagotovitev raznosa prometnih obremenitev.

Nosilnost (Bearing capacity) pomeni mehansko odpornost planuma vgrajenega materiala proti (kratkotrajnim) obremenitvam.

Objekt (Facility) je s tlemi povezana zgradba ali gradbeni inženirski objekt, narejen iz gradbenih proizvodov ali naravnih materialov, skupaj z vgrajenimi inštalacijami in tehnološkimi napravami.

Obrabna plast (Wearing course) je obstojna in prometno varna vrhnja plast voziščne konstrukcije, ki zaradi sestave preprečuje pronicanje vode.

Odkop (Excavation) je del cestnega telesa zgrajen v temeljnih tleh.

Optimalna vsebnost vode (Optimum moisture content) je vsebnost vode v materialu pri največji gostoti, določeni s postopkom po Proctorju.

Oсна obremenitev (Axle load) je sila, ki se preko koles na eni osi vozila prenaša na vozišče.

Pesek (Sand) je zmes kamnitih zrn v območju velikosti od (na spodnji meji) 0 mm, 0,063 mm ali 0,09 mm do (na zgornji meji) 2 mm ali 4 mm.

Planum (Formation) pomeni površino z določenimi predpisanimi značilnostmi kakovosti (višina, ravnost, zgoščenost, podajnost).

Podajnost (Deflection) je posedek površine pod določeno obremenitvijo kot merilo stanja (razpoložljive nosilnosti) konstrukcije v času meritve; sestoji iz elastične in plastične komponente.

Podlaga (Substrate) je celotno območje pod plastjo, ki ga gradimo.

Pora (Pore / void) je zaprt prostor v trdnem materialu, napolnjen z zrakom.

Posteljica (Capping layer) je vrhnja (zaključna) plast nasipa ali temeljnih tal, debela do 50 cm, s posebnimi lastnostmi, doseženimi z ustreznimi gradbenotehničnimi ukrepi.

Postopek z letvo (Measuring rod method) je postopek za določanje globine kolesnice ali za meritev odstopanja od ravne referenčne linije med dvema točkama na vozni površini.

Povprečni letni dnevni promet (Average daily traffic) je na osnovi podatkov štetij prometa izvedenoteno povprečno dnevno število motornih vozil, ki je v določenem letu prečilo izbrani prerez ceste.

Prečni profil ceste (Road cross-section) je prerez skozi cestno telo z vsemi spremljajočimi objekti, pravokoten na vzdolžno os ceste.

Preskus s ploščo (Plate bearing test) je postopek preskusa, pri katerem je material s krožno ploščo in ustrezno dodatno opremo obremenjen in razbremenjen; povprečne obremenitve plošče p in pripadajoči posedki s določajo krivuljo posedanja (deformacije).

Prod (Coarse gravel) je zmes naravnih zaobljenih kamnitih zrn velikosti nad 2 do 63 mm.

Prodec (Gravel) je zmes naravnih zaobljenih kamnitih zrn velikosti do 63 mm.

Profilometer (Profile meter) je naprava za meritve profila vozišča na posameznih prometnih pasovih v prečni ali vzdolžni smeri.

Projektiranje voziščne konstrukcije (Pavement design) zajema določanje postopkov za zagotavljanje minimalne nosilnosti temeljnih tal in nasipa ceste ter dimenzioniranje voziščne konstrukcije in ostalih cestnih objektov.

Prometna obremenitev (Traffic loading) je obremenitev, izražena s številom vozil (PLDP) ali številom prehodov nazivne (nominalne) osne obremenitve (NOO 100 kN), ki bo prečilo izbrani prerez ceste v izbrani dobi trajanja.

Prostorska gostota (Bulk density) je količnik mase (zgoščenega) materiala in njegove prostornine, vključno z votlinami in v trdni snovi vključenimi porami.

Ravnost vozne površine (Carriageway evenness) je geometrijska lastnost (vozne površine), ki vpliva na varnost vožnje in trajnost voziščne konstrukcije; merodajna je tudi za udobnost vožnje.

Sestava zmesi kamnitih zrn (Particle size distribution) pomeni v razrede porazdeljeno zmes kamnitih zrn, ponazorjeno s krivuljo v ustreznem diagramu.

Spodnji ustroj (Formation) skupno ime za posteljico in nasip.

Stabiliziranje (Stabilization) je postopek, pri katerem je z vmešanjem veziva in vode v obstoječ material in primerno zgostitvijo pripravljene zmesi ali mešanice trajno povečana odpornost vgrajene zmesi ali mešanice proti vplivom prometnih obremenitev ter proti škodljivim klimatskim in hidrološkim vplivom.

Statični deformacijski modul (Static modulus of deformation) je značilna vrednost za deformabilnost materiala pri postopnem večkratnem obremenjevanju krožne plošče, določena na osnovi nagiba sekante krivulje posedanja v določenem območju prve, druge ali tretje obremenitve.

Stopnja zgoščenosti (Compaction degree) je razmerje med izmerjeno (suho) gostoto in največjo (suho) gostoto materiala, določeno po ustreznem postopku (npr. po Proctorju).

Suha gostota (Dry density) je masa suhega materiala v enoti prostornine, ki jo zavzema material, vključno s parami, zapolnjenimi z zrakom in/ali vodo.

Štetje prometa (Traffic counting) je način ugotavljanja števila in vrste vozil, ki prevozijo izbrani prerez ceste v določenem času.

Temeljna tla (Subgrade) so zemljine in/ali kamnine praviloma v naravnih tleh, ki neposredno mejijo na nasip, voziščno konstrukcijo ali temelj gradbenega objekta.

Teramehanika (Terramechanics) je disciplina strojništva, ki proučuje medsebojne vplive vozila in deformabilne podlage.

Tla (Soil) Pedološka definicija: so naravna tvorba na površju zemeljske skorje, ki je nastala in se razvijala pod vplivom matične podlage, klime, organizmov, reliefa in časa. Pod vplivom litosfere, atmosfere, hidrosfere in biosfere so dobila novo kvalitativno lastnost - rodovitnost, to je sposobnost, da oskrbuje rastline z vodo, mineralnimi hranili in kisikom ter jim obenem nudijo oporo za rast in razvoj.

Transport lesa (Wood transport) je kompleksen proces premikanja in koncentriranja gozdnih lesnih sortimentov po zraku, po naravnih gozdnih tleh in po zgrajenih prometnicah različne kakovosti.

Transportno gravitacijska enota (Transport gravity unit) je prostorsko zaokrožen predel gozda z enotno glavno smerjo izvoza lesa.

Udarne jama (Pothole) je poškodba obrabne ali krovne plasti lokalnega značaja, zaradi katere nastane na vozišču jama, velika do 2 m² ter globoka nad 2 cm.

Utrditev tal (Stabilization) je postopek, pri katerem se z vmešavanjem veziva v obstoječa tla in primerno zgostitvijo pripravljene zmesi ali mešanice trajno poveča odpornost vgrajene plasti proti škodljivim vplivom vode.

Vozišče (Carriageway) je enakomerna neprekinjeno utrjeni del cestišča, primeren za vožnjo vozil, vključno z razširitvami.

Voziščna konstrukcija (Pavement) je del utrditve vozišča, ki sestoji iz ene ali več nosilnih plasti in obrabne plasti. Sinonim je zgornji ustroj.

Zemljina (Soil) je vrhnji del zemeljske skorje (sedimenti in tvorbe preperevanja), ki sestoji iz nepovezanih ali slabo povezanih mineralnih in/ali deloma organskih delcev, ki jih je mogoče z mehničnimi sredstvi razgraditi brez uporabe sile (npr. z nasipavanjem v vodo).

Zgoščevanje (Compaction) je postopek, pri katerem material, razprostrt v plast, z uporabo zgoščevalnih sredstev (valjarjev, vibracijskih plošč) doseže zahtevano zgoščenost.

1 UVOD

INTRODUCTION

Gozdne prometnice potrebujemo za racionalen dostop v gozdni prostor in za rabo dobrin, ki jih nudijo gozdni ekosistemi. Prilagojene so zahtevam transporta lesa v gozdarstvu, ekonomskim možnostim investitorjev in prostoru, po katerem potekajo (Douglas, 1999). V primerjavi z drugimi infrastrukturnimi objekti so grajene gozdne prometnice videti preproste. Ker povečujejo stroške pridobivanja lesa (Maxwell, 1942) in povzročajo številne ekološke motnje (Gucinski in sod., 2001), njihovi izgradnji, rabi in vzdrževanju stroka po svetu še vedno namenja precej pozornosti (Keller in Sherar, 2003; Larcombe, 1999).

V Sloveniji je danes zanimanje za gozdne prometnice majhno, kar še posebej velja za tehnične vidike gradnje. Povsem drugače je bilo v osemdesetih letih prejšnjega stoletja, v času največjega obsega gradenj gozdnih prometnic pri nas. Takrat smo iz gradbene stroke sproti prenašali v gozdarsko prakso nova spoznanja o gradbenih materialih (Dretnik, 1984) in gradbenih tehnikah (Dobre, 1982). Po zadnji veliki reorganizaciji gozdarstva v devetdesetih je gozdno gradbeništvo po obsegu del in strokovnosti močno nazadovalo (Robek in sod., 2006). Danes je usmerjeno v vzdrževanje obstoječih prometnic in v gradnjo vlak. Gozdnih cest skoraj ne gradimo več, če pa že, se pri tem skoraj vedno srečujemo z nerealnimi zahtevami investitorjev po zniževanju stroškov. Izvedene rešitve gredo pogosto na račun kakovosti, neredko pa tudi na račun nepoznavanja osnovnih inženirskih zakonitosti gradbenih materialov in načinov izvedbe del. Stroške novogradenj cest znižujemo z neustrezno utrditvijo vozišč, stroške vzdrževanja znižujemo na račun opuščanja obnove utrditve cest. Pozabljamo, da so gramozne ceste zelo ranljive prometnice, za katere velja (Earth and aggregate surfacing design guide for low-volume roads, 1996): »Česar vanje ne vložimo danes, nas bo doletelo jutri.«

Z Resolucijo o nacionalnem gozdnem programu (2007) smo v Sloveniji potrdili pomembnost lesa za naš trajnostni razvoj in se zavezali k večjemu izkoriščanju proizvodnega potenciala. To simbolno dejanje predstavlja priložnost za renesanso gozdne tehnike in inženirskih znanj v gozdarstvu. Javni pomen in raba gozdnih cest naraščata (Hribernik, 2013; Potočnik, 1996b) in narekujejo višje standarde vozniš površin gozdnih cest (npr. rekreativno kolesarjenje), kot ga zahteva gospodarjenje z gozdom. Povečevanje voženj pri spravilu lesa narekuje spremembe v poteku in zgradbi stranskih grajenih gozdnih prometnic (Košir, 2008). Večje količine spravila lesa iz gozdov narekujejo večje kamione (Lindhqvist in Bengtsson, 2010), ne vemo pa, ali nosilnost naših cest zadošča prihodnjim potrebam za prevoz lesa.

Gradnja cest je bila pretežni del civilizacije izkustvena znanost (Žmavc, 2007: 11). Sodobna naravoslovna spoznanja so ji dala nove možnosti in številna orodja za boljše razumevanje nosilnosti vozišč v razmerah eksponentno naraščajočega prometa v zadnjih desetletjih. Priča smo velikemu razkoraku med razpoložljivim in izkoriščenim znanjem o dimenzioniranju in nosilnosti grajenih gozdnih prometnic. Razpoložljivo znanje izvira iz graditve sodobnih javnih cest. Zanj so značilni analitičen pristop ter obsežne raziskave na terenu in v laboratorijih (Cezar, 2007). Zadnje temeljitejšje raziskave s področja nosilnosti gozdnih cest na ozemlju nekdanje Jugoslavije so bile narejene ob uvajanju metod kemične stabilizacije temeljnih tal in zemljin pred vsaj tremi desetletji (Beneš, 1969; Lovrič, 1971). Ker je gradnja gozdnih cest pri nas praktično zamrla, na gradnjo vlak pa se spozna prav vsak lastnik gozda, se zdijo raziskave nosilnosti vozišč gozdnih prometnic nepotrebne. Gradbena dela v gozdarstvu danes usmerja in izvaja kader, katerega inženirska znanja so simbolična, problemi okoli njih pa izrazito inženirski. Nič dosti drugače ni na področju projektiranja in dimenzioniranja vozišč. Še vedno se držimo šablonskih pristopov projektiranja vozišč, kar ni več sprejemljivo niti po strokovni niti po ekonomski plati.

Nosilnost vozišč ni glavni izziv slovenskega gozdarstva v naslednjih letih, ima pa kompleksne vplive tako na nivo storitev, ki jih zagotavlja gozdarstvo (Diaci in Golob, 2009), kot na stroške gradnje in vzdrževanja. Velik izziv ostaja prenos znanj in metod za vrednotenje nosilnosti vozišč iz gradbeništva v gozdarstvo. Gre za vprašanje stopnje poenostavitve, ki še dajejo ekonomsko merljive učinke in jih je mogoče sčasoma vpeljati v gozdno-tehniško prakso. Bistvo praktičnega gozdnega gradbeništva ostaja graditev z izjemno omejenim proračunom, uporabo »nepopolnih gradbenih materialov« in »prebranih graditeljskih prijemov«. Grajene gozdne prometnice kljub svoji preprostosti ostajajo gradbeni objekti, za katere veljajo tako ekonomska (Potočnik in sod., 1991) kot tehnična merila. Med slednje sodijo tudi inženirska znanja o nosilnosti vozišč grajenih gozdnih prometnic.

Ta raziskava na stežaj odpira vrata temeljnemu znanju mehanike tal pod obremenitvijo (Terzaghi in sod., 1996). Z njo želimo celovito osvetliti problematiko nosilnosti vozišč grajenih gozdnih prometnic. Verjamemo, da bomo s tem ustvariti pogoje za argumentirano obravnavo strokovnih vprašanj, povezanih z nosilnostjo, kot so uvajanje neutrjenih cest, asfaltiranje glavnih gozdnih cest, pocenitev gradnje vozišč z izboljšanjem lokalnih materialov in še bi lahko naštevali. Bližnjic do kakovostnih odgovorov na taka vprašanja ni. Tudi razkoraka med sodobno gradnjo cest in prakso gozdnega gradbeništva ni možno odpraviti takoj, treba pa ga je začeti zmanjševati že danes.

2 OPREDELITEV PROBLEMA PROBLEM DEFINITION

Osnovno omrežje grajenih gozdnih prometnic v Sloveniji predstavljajo gozdne ceste, katerih bistvo je z nevezanim materialom utrjeno vozišče za vožnjo različnih gozdarskih transportnih kompozicij (Petkovšek, 2010). Dopolnjujejo ga grajene neutrjene vlake za mehanizirano spravilo lesa do ceste, na katerih se vse bolj uveljavlja vožnja zgibnih prikoličarjev in traktorskih prikolic (Košir, 2010).

V Sloveniji je bilo osnovno omrežje gozdnih prometnic zgrajeno v zadnjih štiridesetih letih, največ v osemdesetih letih prejšnjega stoletja. V času najbolj intenzivne gradnje je bilo letno zgrajenih preko tristo kilometrov cest in čez tisoč kilometrov vlak (Robek in sod., 2006: 511). Tak tempo odpiranja gozdov je šel pogosto na račun nizke kakovosti del in vgrajenih materialov. V devetdesetih letih smo v Sloveniji vzpostavili sistem sofinanciranja grajenih gozdnih prometnic, ki vključuje sofinanciranje države pri vzdrževanju gozdnih cest, v zadnjem času pa tudi sofinanciranje gradnje gozdnih cest in vlak. Kljub temu je sredstev za gozdno infrastrukturo premalo (Poročilo Zavoda za gozdove Slovenije o gozdovih za leto 2012, 2013), zato je bitka s stroški stalnica gozdnega gradbeništva.

Novogradnje cest danes potekajo po strmih terenih, zato je delež gradbenih stroškov pri izdelavi spodnjega ustroja ceste praviloma večji od stroškov utrditve vozišča. Stroške spodnjega ustroja ceste zmanjšujemo s pravilnim vodenjem trase po terenu in racionalno izvedbo zemeljskih del. Utrditev gozdnih prometnic v tujini (Kuonen, 1983) in pri nas (Smernice za projektiranje gozdnih cest, 1982) pomeni izdelavo zgornjega ustroja ali voziščne konstrukcije¹ (VK). Skupne stroške pri gradnji gozdnih prometnic znižujemo s prihranki pri izgradnji VK, bodisi s količino vgrajenega materiala v VK, z uporabo manj kakovostnih materialov ali pa z opuščanjem VK in izdelavo neutrjenih cest. Pri vzdrževanju obstoječega omrežja cest del stroškov izvira iz obrabe VK pod vplivi prometa in vremenskih razmer, del pa iz neakovostne gradnje v preteklosti. Stroške vzdrževanja cest znižujemo predvsem na račun pogostosti tekočega vzdrževanja manj prometnih odsekov in opuščanja investicijskega vzdrževanja cest, torej spet na račun VK.

Kakovost VK ne pomeni nujno višjih stroškov, zahteva pa boljše razumevanje nosilnosti tal, togosti in deformabilnosti vgrajenih materialov ter bistvenih zvez med njimi (Malick in El-Korchi, 2009: 42). Utrditev vozišč asfaltnih cest z nevezanimi zmesmi zrn je uveljavljen postopek graditeljev javnih cest v Sloveniji. Tehnične specifikacije za javne ceste za kamnite posteljice (TSC 06.100 : 2003) in nevezane nosilne plasti (TSC 06.200 : 2003) predstavljajo

¹ Čeprav je v gozdarstvu za voziščno konstrukcijo uveljavljen izraz zgornji ustroj, bomo zaradi skladnosti z gradbeniško literaturo v tej raziskavi dosledno uporabljali pojem voziščna konstrukcija in kratico VK.

osnovo za sodobno dimenzioniranje voziščnih konstrukcij. Trajne deformacije v teh plasteh se tako kot pri gozdnih cestah kažejo kot kolesnice in so lahko znak slabe nosilnosti, torej tudi slabe kakovosti. Nosilnosti VK gozdnih cest pri graditvi ne preverjamo, pri vzdrževanju pa ne rešujemo, saj nimamo jasnih odgovorov na vprašanja, kot so: Ali je nosilnost ceste prava mera za ovrednotenje dolgotrajnih (kumulativnih) obremenitev v njeni življenjski dobi? Kako jo meriti tekom gradnje in uporabe in kako zagotoviti ravno tisto nosilnost, ki jo pri določeni prometnici v času transporta še potrebujemo? Kakšna so razmerja med nosilnostjo in togostjo vozišča gozdnih prometnic? Z vprašanjem o nosilnosti je povezano tudi vprašanje o rabi lokalnih materialov pri gradnji gozdnih cest. Zadnjih dvajset let pri gradnji nosilnih plasti na gozdnih cestah ne uporabljamo več certificirane zmesi zrn iz kamnolomov, temveč največkrat vgrajujemo sortiran material izkopa. To že dolgo ne pomeni, da je ta material neuporaben, le več strokovnega znanja pri njegovi vgradnji potrebujemo (Dretnik, 1984; Eisbacher, 1976).

Zgrajene gozdne prometnice so gradbeno-inženirski objekti, ki za dolgo časa ostajajo v prostoru. Manj jasno spoznanje je, da danes kamionski odvoz lesa iz gozda poteka po prometnicah, ki so bile večinoma zgrajene pred pol stoletja, s takratnim znanjem in možnostmi ter za takratne tehnologije prevoza lesa (slika 1, levo).



Slika 1: Gozdne ceste zgrajene v šestdesetih letih prejšnjega stoletja (levo, Hafner, 1956: naslovnica) uporabljamo danes; današnja gradnja mora ustrezati transportu lesa čez petdeset let (desno²).

Figure 1: Forest roads built in the sixties from the last century are used nowadays (left, Hafner, 1956: cover page), contemporary construction works must fulfil wood transport after fifty years (right³).

² Slikovno gradivo, pri katerem ni naveden vir, je izdelek avtorja. To velja za vsa slikovna gradiva in priloge v nadaljevanju.

³ Figures without quoted reference are made by author. This is valid for all figures and appendices hereafter.

Iz tega izhaja osnovno vprašanje pričujoče raziskave: Ali uveljavljene strokovne prakse projektiranja in izvedbe VK grajenih gozdnih prometnic v Sloveniji ustrezajo sedanjim ter pričakovanim prometno-klimatskim obremenitvam ob koncu njihove uporabne dobe oziroma kakšna bi morala biti nosilnost gozdnih cest danes, da bi predvidenim pogojem zadostile (slika 1, desno)? Za strokovno argumentiran odgovor na postavljeno vprašanje potrebujemo grajenim gozdnim prometnicam prilagojeno merilno opremo in postopke ter temeljna znanja o učinkih bistvenih vplivnih dejavnikov na nosilnost vozišč.

Namen te raziskave je spoznati nosilnosti vozišč obstoječih grajenih gozdnih prometnic v Sloveniji, proučiti odvisnost nosilnosti vozišč od temeljnih tal, vremenskih razmer, uporabljenih materialov, geometrijskih lastnosti prometnic in prometne obremenitve ter podati usmeritve za racionalno zagotavljanje nosilnosti prihodnjih gozdnih cest v praksi, zlasti najmanj in najbolj obremenjenih.

Pri proučevanju obstoječih gozdnih prometnic smo se osredotočili na tiste, ki so bile zgrajene v zadnjem desetletju po veljavnih gozdarskih in gradbenih predpisih. Raziskava je usmerjena v probleme slovenskega gozdarstva. Izraz »Slovenija« je v raziskavi uporabljen kot najširše območje raziskovanja in prostor določenih gozdno-tehniških praks. Prostorsko specifične ugotovitve se nanašajo na Slovenijo, zveze med proučevanimi dejavniki ter metodološka spoznanja pa imajo splošno veljavnost.

V raziskavi proučujemo grajene gozdne prometnice. V nadaljevanju bomo pridevnik »grajena« dosledno izpuščali oziroma bomo tam, kjer bo govora o »negrajenih« prometnicah, to izrecno poudarili. Pridevnik »gozdna« bomo v besedilu dosledno uporabljali, v slikah in preglednicah pa zaradi večje preglednosti izpuščali. Posebno pozornost namenjamo izrazoslovju, zato smo naslove podpoglavij, preglednice in vso slikovno gradivo opremili dvojezično ter dodali obširen slovar strokovnih izrazov.

3 PREGLED LITERATURE LITERATURE REVIEW

3.1 VOZIŠČNE KONSTRUKCIJE MALOPROMETNIH CEST PAVEMENTS OF LOW VOLUME ROADS

3.1.1 Izvor in razvoj cest Origin and development of roads

Gibanje je v človeški naravi. Na začetku civilizacije je bilo ljudi malo, premikali so se brez transportnih naprav. Uporabljali so steze divjih živali ali pa uhodili svoje poti. Z mrežo poti so se ponašale pravicivilizacije na indijskem podkontinentu, med njimi območje Harrapa (današnji Pakistan), o njih govorijo davne risbe in ohranjeni pisni viri. Prave ostanke grajenih poti so arheologi odkrili na gorskih prelazih ali močvirjih, kjer prehod brez gradbenih posegov ni bil mogoč, ali pa na območjih starodavnih mest. Najstarejše ohranjene grajene prometnice so iz 4. tisočletja pred našim štetjem in zajemajo s kamnom tlakovane ulice mesta Ur v Mezopotamiji, na območju današnjega Iraka (History of the road transport, 2014).

Na območju sedanje Evrope datirajo najstarejši ostanki grajene prometne infrastrukture v obdobje med mlajšim neolitikom in bronasto dobo. Na močvirnih in težko prehodnih terenih današnje severne Evrope so pri arheoloških izkopavanjih šotišč in močvirij odkrili ohranjene ostanke lesenih konstrukcij, ki so služile za hojo po nenosilnem terenu. Po podatkih dendrokronoloških analiz je najstarejša ohranjena lesena steza »Sweet track« (slika 2, levo) nastala v letu 3807 pred našim štetjem (Brunning, 2014). Nahaja se v kraju Glostenbourny v jugozahodni Angliji in je del mreže brunčanih poti na šotnih ravnicah Somerseta.



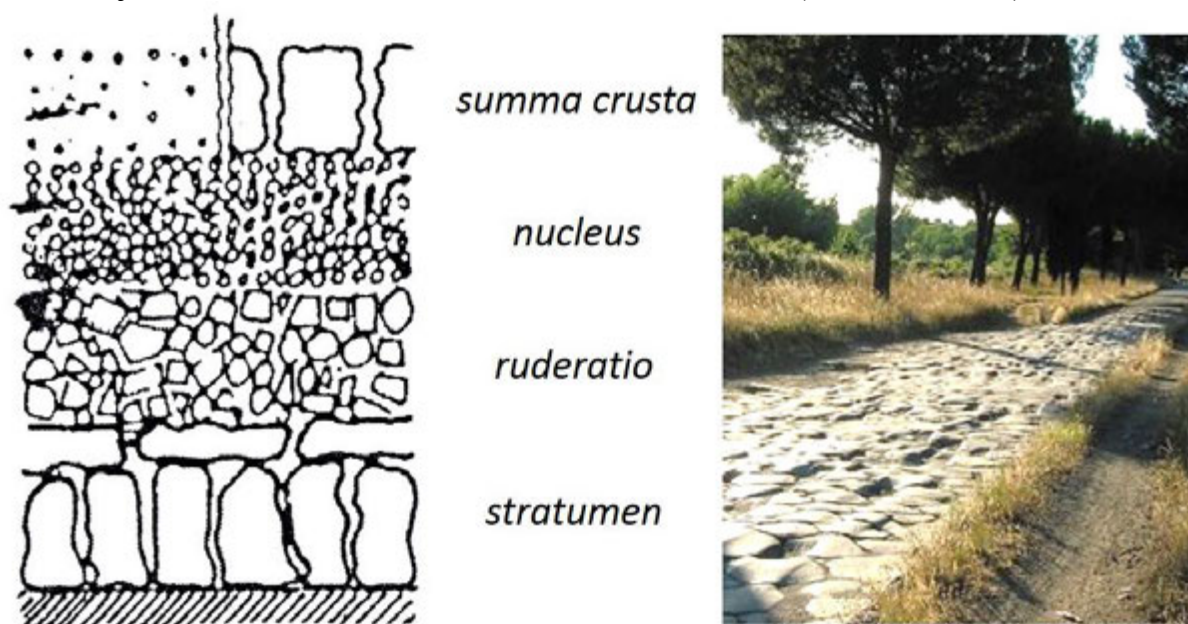
Slika 2: Lesene prometnice iz različnih obdobj človeške civilizacije: levo – neolitik (Brunning, 2014), sredina – železna doba (Corlea Trackway, 2013), desno – srednji vek (History of the road transport, 2014)

Figure 2: Wooden thoroughfares from different periods of human civilisation: left – Neolithic (Brunning, 2014), middle – Iron Age (Corlea Trackway, 2013), right – Middle Age (History of the road transport, 2014)

Dobro ohranjeni ostanki brunčanih poti iz železne dobe so na Irskem (Corlea Trackway, 2013) (slika 2, sredina), iz srednjega veka pa na severu Nemčije (Corduoy road, 2014) (slika 2, desno). Fragmenti lesenih prometnic za premostitve slabo nosilnih tal so bili najdeni tudi na Ljubljanskem barju, vendar je najbolj dragocen dokaz voznega prometa na slovenskem v mlajši kameni dobi nedavno odkrito leseno kolo in njemu pripadajoča os (Ficko, 2014: 39). Danes lesene poti najdemo v naravnih parkih na močvirjih. Služijo istemu namenu kot pred davnimi stoletji, to je zmanjševanje pritiska na slabo nosilno podlago, oziroma povečevanju nosilnosti poti.

S stopnjevanjem trgovanja med antičnimi ljudstvi so velik pomen dobile utrjene ceste. Tehniko gradnje in vzdrževanja kamnitih cest so razvili Rimljani, ki so se osnov gradnje učili pri Etruščanih in Latinih, starih mojstrih na področju zlaganja materiala za vožnjo z vozovi. Rimljani so gradnjo cest postavili na povsem novo raven, nekatere tedanje ceste pa so se ohranile tudi do današnjih dni. Osnovni namen gradnje cest v dobi Rimljanov so bili premiki in oskrba vojaških enot. Prva grajena rimska cesta je bila zgrajena leta 312 pred našim štetjem, v času samnitskih vojn. Gradili so jih vojaki in vojni ujetniki. Ob koncu rimskega imperija je bilo znanih 29 glavnih cest, ki so se vse začenjale v Rimu.

Rimske ceste so bile zasnovane v prostoru premočrtno in zgrajene praviloma iz štirih plasti *strata*, kar je etimološki izvor besed *stradale*, *street* in *strassen* (shema na sliki 3).



Slika 3: Značilne plasti rimske ceste (levo, Žmavc, 2007: 22) in sedanji videz ceste Via Appia (desno)

Figure 3: Typical layers of Roman road (left, Žmavc, 2007: 22) and present look of the road Via Appia (right)

Opise značilnih plasti rimske ceste (od površja navzdol) povzemamo po Žmavcu (2007: 22):

- plast *summa crusta*: debelina 20–25 cm, grušč in pesek ali kamen v malti;
- plast *nucleus*: debelina 30–32 cm, zrna proda v velikosti oreha v malti (za glavne ceste pa beton s tolčencem in mastnim apnom);
- plast *rudratio*: debelina 30–60 cm, zrna v velikosti pesti (za glavne ceste v malti);
- plast *stratumen*: 20–30 cm, ena do dve vrsti ploščatega kamna, za glavne ceste pa še podloga iz položenega lomljenca v malti.

Vse rimske ceste so bile na sredini dvignjene, zato niso postale zablatene, najnižja plast je bil praviloma položena na steptano ilovico. Pomembnejše ceste, kot je znamenita Via Appia (slika 3, desno), so bile zgrajene še iz dodatnih plasti, na vrhu katerih so bili šesterokotni sklepniki, ki so onemogočali dvigovanje prahu in hkrati zmanjševali trenje koles.

V Sloveniji je precej sledov rimskih cest, saj je preko našega ozemlja potekalo več glavnih rimskih cest. Številne izmed njih so danes skrite v gozdovih, nekatere celo še služijo za transport lesa (Dobre in Robek, 1998). Od navadnih vlak ali stranskih cest jih loči značilen potek nivelete, ki je upošteval zmogljivosti vlečnih živali. Z zatonom rimskega cesarstva se je v Evropi bistveno zmanjšala migracija ljudi in posledično je za več stoletij zamrla skrb za vzdrževanje in gradnjo utrjenih daljinskih cest. Nekdaj vzorne prometnice so v bližini naselij postale vir gradbenega materiala, redke nove prometnice so imele utrjeno samo vrhnjo plast vozišča.

Vsebinske premike pri novodobni gradnji cest je prinesla renesansa, ki je znova spodbudila zanimanje za trgovanje na daljših razdaljah. V začetku 17. stoletja se pri gradnji cest uveljavijo gramozna cestišča, ki so bila v različnih državah izvedena po različnih postopkih. Vrhunec razvoja novih postopkov gradnje gramoznih vozišč predstavlja konec 18. stoletja, ko so delovali trije veliki graditelji: Tresaguet, Telford in MacAdam. Francoz Pierre Tresaguet velja za prvega postrimskega znanstvenega graditelja cest. Posebnost njegove voziščne konstrukcije so veliki prečni nakloni⁴ vozne površine in zložba zaklinjenega piramidnega lomljenca v spodnji nosilni plasti. Idejo zlaganja lomljenca je v začetku 19. stoletja naprej razvil Anglež Thomas Telford, pri tem pa ohranil raven planum spodnjega ustroja in namesto piramidnega lomljenca uporabil prizmatičnega.

Zamudno in drago zlaganje materiala v voziščno konstrukcijo je presegel Telfordov sodobnik, Škot John MacAdam, ki je svojo tehniko izgradnje gramoznega vozišča razvil po skrbnem opazovanju vzrokov poškodb koles vozov in kopit konj. Ugotovil je, da mora biti

⁴ V gozdarstvu uporabljamo izraz naklon, ki ima enak pomen kot nagib v gradbeništvu. V nadaljevanju bomo uporabljali izraz naklon.

granulacija kamenja na vrhnji plasti debeline 5 cm, torej v velikosti oreha (premer zrn do 2,5 cm), in mora imeti na vrhu droben pesek za zapiranje površja, namesto kamnitih blokov pa se enako dobro lahko uporabi drobljenec enakozrnate granulacije velikosti pesti (premer zrn 7,5 cm) in debeline 20 cm. Ključno za njegovo vozišče je bilo, da je spodnja plast vsaj 10 cm nad koto talne vode oziroma dnom stranskega jarka. Danes pravih makadamskih cest v Sloveniji ni več, nadomestile so jih gramozne ceste, katerih voziščna konstrukcija je v celoti sestavljena iz nevezanih zmesi zrn.

V primerjavi z ostalima dvema načinoma gradnje gramoznih vozišč je bila izvedba makadamskega vozišča cenejša, vožnja s kočijami pa hitrejša in udobnejša, zato se je makadamsko vozišče hitro uveljavilo v Evropi, Ameriki in drugod po svetu. Gramozna vozišča so ustrezala vozovom in kočijam. S pojavom težjih in hitrejših prevoznih sredstev, zlasti pa s pojavom neprimerno hitrejšega avtomobila ob koncu 19. stoletja, so zaprašena gramozna vozišča postajala vse bolj neprimerna. Za zmanjševanje prašenja so vozišča polivali s katranskimi vezivi, bolj prometne ceste pa oblagali s kamnitimi kockami.

Do uporabe bitumenskega veziva⁵ za izdelavo fleksibilnega vozišča je prišlo leta 1829 v Lyonu in leto kasneje v Parizu (Žmavc, 2006). Leta 1865 je bilo na Škotskem zgrajeno prvo cementnobetonsko vozišče. Obe sta bili izvedeni kot krovna plast na nosilno plast, izdelano po principih makadamskega vozišča. Z nadaljnjim povečevanjem mas in števila vozil so v prvi polovici 20. stoletja prevladale asfaltna utrditve, za najbolj obremenjene daljinske ceste pa cementnobetonske utrditve voznih površin.

Danes razlikujemo klasične in sodobne voziščne konstrukcije. Med klasične sodijo gramozne (npr. po McAdamu, Telfordu) in tlakovane voziščne konstrukcije, med sodobne pa asfaltna in cementnobetonske. Ceste z gramoznimi, s tlakovanimi ali z asfaltnimi plastmi imenujemo fleksibilna vozišča, ceste s pretežno cementnobetonskimi plastmi pa toga vozišča. Po študiji, ki jo je leta 2002 opravil Omega Consult, d. o. o., za Direkcijo RS za ceste, je bilo takrat v Sloveniji še skoraj 500 km javnih cest makadamskih (Gregorc in Dolinar, 2002: 3).

Od pradavnine do danes je razvoj cest v bistvu razvoj voziščnih konstrukcij glede na potrebe transportnih naprav, ki so se na cestah uporabljale. Že graditelji gramoznih vozišč so poznali bistvene principe, ki so pri gradnji sodobnih cest v veljavi še danes.

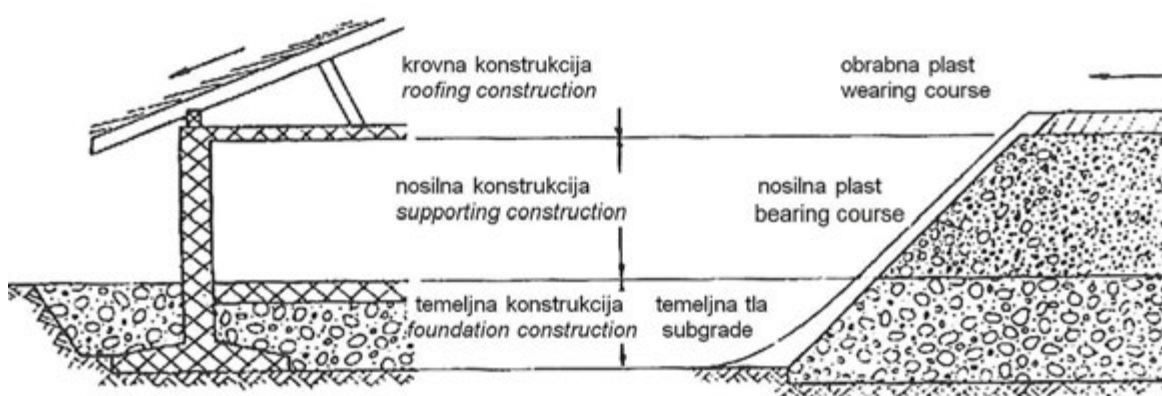
⁵ V asfaltu predstavlja 92–96 masnih odstotkov zmes kamnitih zrn, le 4–6 m.-% je bitumna.

3.1.2 Opredelitev in zgradba ceste

Definition and pavement structure of a road

Slovar slovenskega knjižnega jezika (2014) pozna več pomenov pojma »cesta«. Za našo raziskavo je pomembna naslednja: »Cesta je širša, načrtno speljana pot, zlasti za promet z vozili«. Enciklopedija Britannica (2014) med več pomeni pojma »cesta« navaja, da je ta namenjen za manj prometne poti⁶. Zakon o javnih cestah (2002) opredeljuje cesto kot »vsako tako zgrajeno ali utrjeno površino, da jo kot prometno površino lahko uporabljajo vsi ali določeni udeleženci v prometu pod pogoji, določenimi z zakonom ali drugim predpisom«. V disertaciji bomo pojem »cesta« uporabljali za grajen objekt, namenjen vozilom.

V Sloveniji graditev zajema načrtovanje, projektiranje in gradnjo cest (Zakon o graditvi objektov, 2002). Z vidika nosilnosti sta zlasti pomembna projektiranje in izvedba del. Zakon o graditvi objektov (2002) opredeljuje projektiranje kot izdelovanje projektne dokumentacije in z njim povezano tehnično svetovanje, v okviru katerih je treba določiti tehnične elemente ceste. Veljavne zakonske podlage (Pravilnik o projektiranju cest, 2005) in strokovne podlage (Juvanc, 2005) za projektiranje javnih cest delijo elemente ceste na geometrijsko-tehnične in konstrukcijske. Med prvimi so elementi cestne osi v situaciji in niveletu, vrsta in gabariti elementov prečnega profila ter objekti na cesti. Konstrukcijski elementi ceste so obrabne in nosilne plasti voziščne konstrukcije, katerih kakovost in debelina ustrezata pričakovani prometni obremenitvi ob upoštevanju klimatskih in geomehanskih pogojev območja. Po mednarodnih standardih (Uredba o klasifikaciji ... državnega pomena, 2011) je cesta gradbeno-inženirski objekt, ki je v bistvenih elementih primerljiv s stavbo (slika 4).



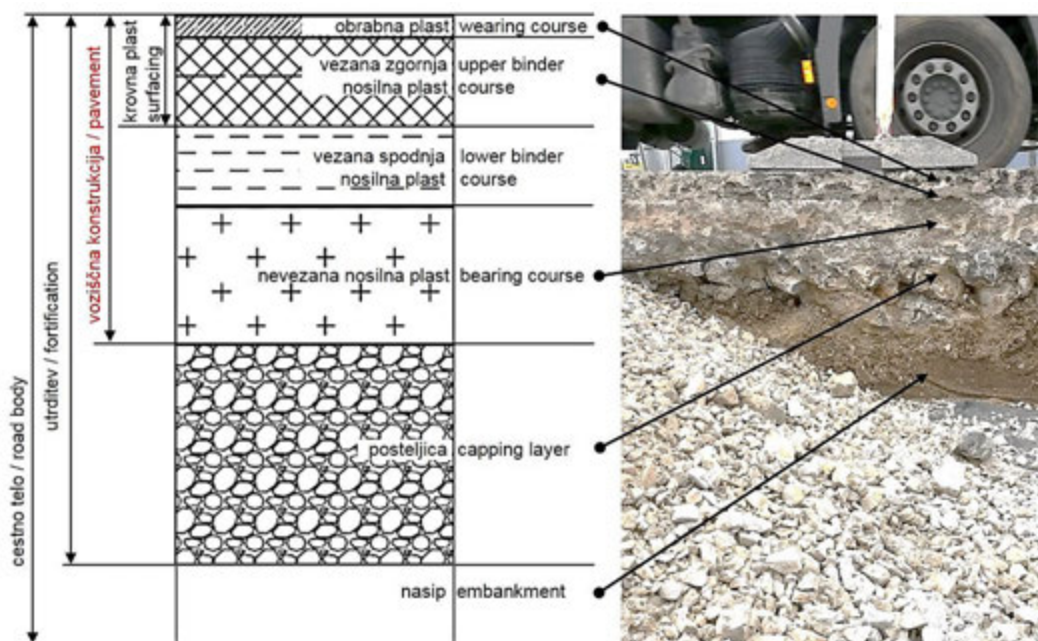
Slika 4: Primerjava bistvenih sestavnih delov v gradbenih objektih (Žmavc, 2007: 12)

Figure 4: Comparison of essential components in the civil engineering facilities (Žmavc, 2007: 12)

⁶ 'In modern usage the term road describes a rural, lesser travelled way, while the word street denotes an urban roadway. Highway refers to a major rural travelled way'.

Voziščne konstrukcije (VK) gradimo zaradi statičnih in dinamičnih obremenitev, ki jih vozila prenašajo na tla (Malick in El-Korchi, 2009). Osnovni namen VK kot celote je doseči raznos prometne obremenitve na podlago. Z zaporedjem plasti v VK želimo doseči zveznost zmanjševanja togosti plasti od površine v globino in zveznost zmanjševanja prepustnosti od spodaj navzgor. Vsaka plast VK opravlja več nalog in nalogam primerna je njihova zgradba.

Prečni prerez sodobne regionalne javne ceste v Sloveniji prikazuje slika 5. Cestno telo⁷ sestavljajo vsi materiali, uporabljeni za nasipe in utrditev ceste med planumom temeljnih tal in vozno površino. Utrditev vozišča je skupni izraz za vse plasti voziščne konstrukcije in v posteljico vgrajen material. Voziščna konstrukcija ali zgornji ustroj ceste je del utrditve vozišča, ki je sestavljen iz ene ali več nosilnih plasti in obrabne plasti. Posteljica je vrhnja plast nasipa ali temeljnih tal, debela do 50 cm, s posebnimi lastnostmi (povečana nosilnost, zmanjšana občutljivost za učinke mraza), doseženimi z ustreznimi gradbenotehničnimi ukrepi – z izboljšavo, utrditvijo in s stabiliziranjem. Nasip je del cestnega telesa med posteljico in temeljnimi tlemi, zgrajen iz zemljin in/ali kamnin. Spodnji ustroj ceste je skupno ime za posteljico in nasip. Temeljna tla so zemljine in/ali kamnine v naravnih tleh, ki neposredno mejijo na nasip, voziščno konstrukcijo ali temelj gradbenega objekta.



Slika 5: Prečni prerez asfaltnega vozišča na regionalni javni cesti v Sloveniji ob prenovi konstrukcijskih elementov jeseni 2014

Figure 5: Cross-section of the asphalt pavement on a regional public road in Slovenia during structural renovation in autumn 2014

⁷ V gozdarstvu uporabljamo pojem cestno telo kot sinonim za zazidano površino ceste. V nadaljevanju bomo pojem cestno telo uporabljali, kot je v uporabi v gradbeništvu.

Krovne plasti ceste morajo zagotoviti udobno vožnjo pri velikih hitrostih sodobnih vozil ter hkrati prenesti največje osne in strižne obremenitve. Naloge nevezanih nosilnih plasti so nadaljnji raznos osnih obremenitev preko stikov med zrn in učinkovito preprečevanje kapilarnega dviga talne vode iz temeljnih tal. Obremenitve sodobnih vozil so glede na naravno nosilnost temeljnih tal tako velike, da morajo biti vgrajeni materiali zelo kakovostni, zaradi česar pa so ceste zelo drage. Visoke stroške sodobnih voziščnih konstrukcij zmanjšujejo tako, da nasip ali temeljna tla prekrijejo z debelo, a cenejšo plastjo (t. i. posteljico) ustrezno izboljšanega lokalnega materiala, ki dodatno utrdi VK. Posteljica je zelo dobrodošla že tekom gradnje, saj prevzema obremenitve gradbene mehanizacije med izdelavo VK.

Lastnosti posameznih plasti sodobnih VK javnih cest so v Sloveniji predpisane s tehničnimi specifikacijami – TSC (Zakon o graditvi objektov, 2002). Za našo raziskavo so pomembne specifikacije nevezanih zmesi zrn (TSC 06.100 : 2003; TSC 06.200 : 2003) ter tiste, ki določajo merilne postopke za njihovo vgrajevanje (npr. za podajnost TSC 06.720 : 2003) ali za vrednotenje stanja VK (npr. ravnost vozišča, TSC 06.610 : 2003).

Prometna obremenitev je najpomembnejša osnova za dimenzioniranje VK (TSC 06.511 : 2009) in hkrati osnova za zaračunavanje dodatnih stroškov uporabnikom, ki prekomerno obremenjujejo ceste s tovornimi vozili (Pravilnik o metodologiji za določitev..., 2005). Prometna obremenitev je obremenitev, izražena s številom vozil (PLDP) ali številom prehodov nazivne osne obremenitve (NOO 100 kN), ki bo prečila izbrani prerez ceste v izbrani dobi trajanja (TSC 06.511 : 2009). Osnova za določanje prometne obremenitve je štetje prometa, ki ga v Sloveniji na javnem cestnem omrežju izvajajo že preko 50 let z ročnim štetjem, avtomatskimi števci prometa, na najbolj obremenjenih cestnih odsekih avtocest v zadnjem času tudi s sistemi za tehtanje vozil med vožnjo (Malovrh, 2009).

Čeprav temeljna tla niso del cestnega telesa, so njihove mehanske lastnosti bistvene za izdelavo trajnega cestnega telesa. Poleg tega se fizikalne lastnosti temeljnih tal vzdolž linijskih objektov močno spreminjajo. Voziščna konstrukcija naj bi te razlike izravnala. Bolj kot popolnost raznosa sil vozila na posameznem mestu je pomembna enakomernost voziščne konstrukcije vzdolž prometnice (Žmavc, 2007).

Slika 5 razkriva, da imajo sodobne javne in gozdne ceste več skupnega, kot se zdi na prvi pogled. Več kot 80 % debeline telesa sodobne VK sestavljajo nevezane zmesi zrn, ki so praviloma edini material utrditve gozdnih cest. Zanje veljajo enake zakonitosti raznosa prometnih obremenitev na podlago, bistveno različne pa so prometne obremenitve.

3.1.3 Maloprometne ceste

Low-volume roads

Organizacija za ekonomsko sodelovanje in razvoj (OECD, 1986 cit. po Ašič, 2006) je za maloprometne ceste (MPC) določila tiste, pri katerih prometni volumen ne presega 1500 vozil na dan. Ker je večina cest takih, se je po svetu izraz hitro uveljavil, vrsta in vrednost merila pa sta se prilagajala lokalnim razmeram. Osnova za določanje MPC v svetu je danes prometna obremenitev, izražena s povprečnim letnim dnevnim prometom – PLDP⁸, pri tem pa mejna vrednost niha od 400 do 2000.

V Sloveniji veljavna zakonska regulativa (Pravilnik o projektiranju cest, 2005) navaja mejno vrednost za MPC 500 PLDP, predlog tehnične specifikacije za maloprometne ceste pa 1500 PLDP (TSC 03.325 : osnutek 2003). V predlogu tehnične specifikacije je podana delitev MPC na dve kategoriji. MPC1 so maloprometne ceste prve kategorije. So prometno pomembnejše (regionalne, turistične ali lokalne ceste, ki povezujejo naselja), po njih pa pogosto poteka javni potniški promet. MPC2 so prometno manj pomembne, PLDP je praviloma pod 200, predstavljajo pa skupino dostopnih cest v razpršeni poselitvi ter nekategorizirane ceste.

Berčič (2002) deli MPC po prometni funkciji in v tej delitvi navaja tudi gozdne ceste kot eno vrsto MPC. Velik del problematike MPC je bil v Sloveniji v zadnjih desetih letih posvečen vodenju trase in geometrijskim elementom (Ročenovič, 2002), manjši pa dimenzioniranju voziščnih konstrukcij MPC.

V predlogu tehnične specifikacije za MPC in njeni predstavitvi strokovni javnosti (Cezar, 2002) so bile podane štiri osnove za dimezioniranje MPC:

- prometna obremenitev,
- nosilnost podlage,
- lastnosti in kakovost vgrajenih materialov,
- klimatski in hidrološki pogoji.

Pri dimenzioniranju VK maloprometnih cest v Sloveniji so glavni izzivi pri določanju prometne obremenitve in globine zmrzovanja (Posinek, 2006). Pri višjeležečih maloprometnih cestah (sem praviloma sodijo tudi gozdne ceste) predlog tehnične specifikacije kot najpomembnejši pogoj za dimenzioniranje navaja zmrzlinško obstojnost, ki jo je treba doseči s primerno debelino VK. Ta naj bi v najugodnejših pogojih znašala 0,6 m, v najbolj neugodnih pa 0,8 m (ne upoštevaje debelino nasipa in posteljice). Nekateri drugi

⁸ PLDP je na osnovi podatkov štetij prometa vrednoteno povprečno dnevno število motornih vozil, ki so v določenem letu prevozila izbrani prerez vozišča.

avtorji navajajo znatno manjše potrebne dimenzije VK maloprometnih cest (Posinek, 2006) ali pa predlagajo geotehnične preiskave terena za čim bolj diferencirano in s tem bolj ekonomično gradnjo MPC (Svetličič, 2002).

MPC niso gozdne niti nujno makadamske ceste. V svetu, zlasti v ZDA, Avstraliji, na Novi Zelandiji ter v nekdanjih kolonijah Združenega kraljestva, sta gradnja in vzdrževanje maloprometnih cest predmet kontinuirane pozornosti zadnjih petindvajset let (Guidelines for geometric design of very low-volume local roads, 2001; Beaudry, 1992; Clough, 1993; Cook in sod., 2013; Dawson in sod., 2006). Na področju maloprometnih gramoznih cest so gozdarji pogosto naročniki raziskav (Transport modeling for RUTT project: final report, 2008; Dawson in sod., 2008; Killer, 1993) ali pa jih izvajajo celo sami (Earth and aggregate surfacing design guide for low-volume roads, 1996).

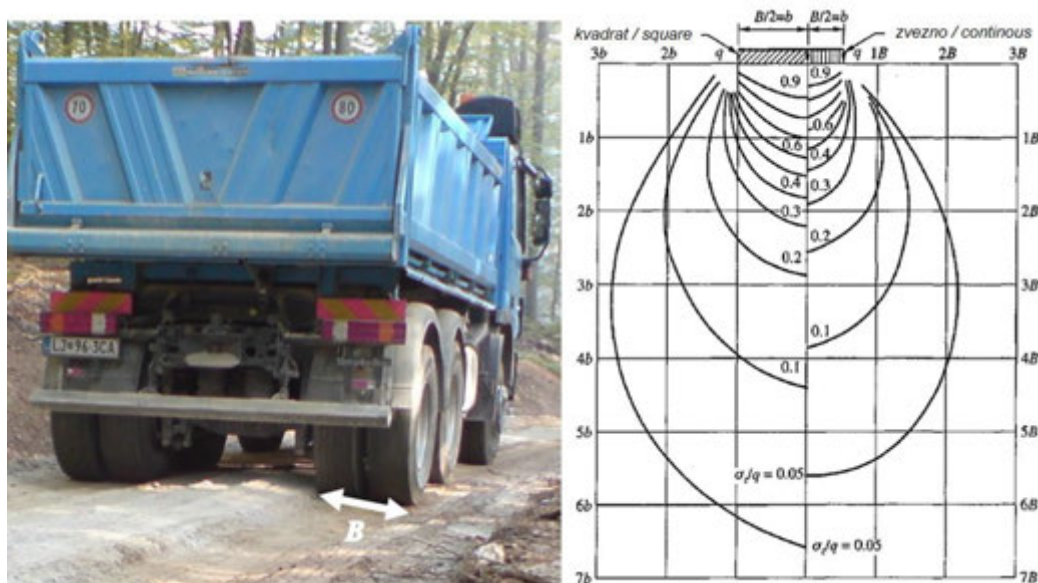
MPC so danes dragocen vir informacij za projektiranje grajenih gozdnih prometnice in še posebej za dimenzioniranje njihovih VK glede na številne podobne vzroke in posledice propadanja vozišč.

3.1.4 Vzroki propadanja vozišč

Causes of pavement deterioration

Vozišče je enakomeren, neprekinjeno utrjen del cestišča, primeren za vožnjo vozil. Vozišče zgrajene ceste je v bistvu planum⁹ obrabne plasti. Osnovni vzrok propadanja večine vozišč so prometne obremenitve. Napetosti in deformacije, ki jih kolo vozila prenaša na podlago, je teoretično leta 1885 razdelal francoski matematik in fizik Joseph Valentin Boussinesq (cit. po Terzaghi in sod., 1996). Njegova prvotna rešitev se nanaša na krožno obremenilno ploščo in predpostavlja tla kot homogen, elastičen in izotropen polprostor. Kasneje so model razširili tudi na kontinuirano obremenitev pod kolesnico in je bil s pridom uporabljen na različnih področjih raziskav interakcij med kolesom vozila in podlago. Značilno porazdelitev napetosti za točkovno in zvezno prometno obremenitev prikazuje slika 6.

⁹ Planum je skupen izraz za različne površine kot npr.: planum temeljnih tal, planum nasipa ali pa planum spodnjega ustroja ceste.



Slika 6: Prikaz porazdelitve napetosti v tleh pod gozdarskim vozilom po Boussinesqu

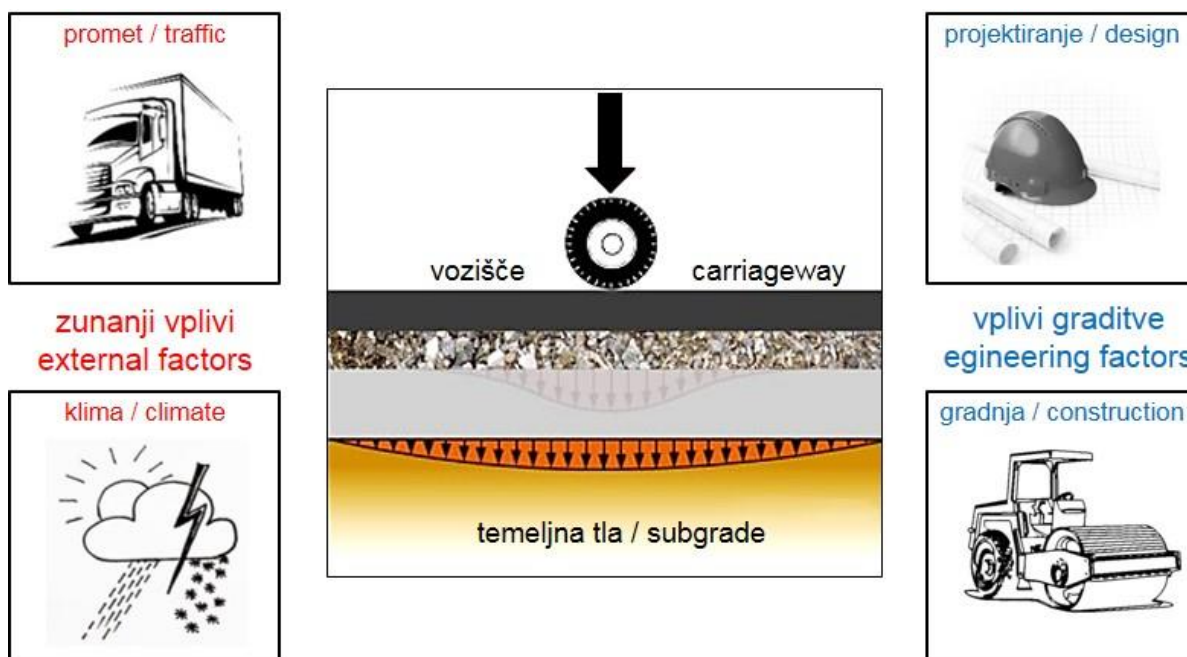
Figure 6: Illustration of the stress distribution under forestry vehicle according Boussinesq

Za zvezne obremenitve lahko teoretično pričakujemo v tleh napetosti izven tlorisa kolesnice in vse do globine petkratnika širine kolesa oziroma gosenice. Bekker (1956, cit. po Horvat, 1993: 12) navaja, da tokovnice napetosti na stiku s površjem oklepajo kot 45° , tlak pa se prepolovi na globini, ki je enaka širini kolesa. To velja za vožnjo zgibne prikolice po naravnih tleh kot tudi za kamion na gozdni cesti ali na avtocesti. Podlaga mora imeti zadostno togost, da se po razbremenitvi vrne v prvotni položaj, ali pa je treba obremenitev ustrezno zmanjšati.

Na VK in cestno telo kot celoto delujejo poleg prometne obremenitve še zunanje sile, pogojene s klimatskimi in hidrološkimi pogoji. Voda v cestni zgradbi je večna, a nevšečna spremljevalka klasičnih in sodobnih cest (Petkovšek, 2013: 19). Klimatske in hidrološke pogoje (TSC 06.512 : 2003) je poleg prometnih obremenitev treba obvezno upoštevati pri projektiranju tako geometrijskih (TSC 03.200 : predlog 2003), kot tudi konstrukcijskih elementov javne ceste (TSC 06.520 : 2003; TSC 06.541 : 2003).

Vplive zunanjih dejavnikov na vozišča cest so celostno proučevali v okviru evropskega programa COST 351 (European Cooperation in Science and Technology), rezultate pa objavili leta 2008 v monografiji »*Water in road structures*« (Dawson, 2008a). V monografiji so predstavili model vzrokov propadanja sodobnih vozišč, kjer je izpostavljen vpliv klimatskih dejavnikov, zlasti vseh oblik vode v cestnem telesu. Temu sicer ne gre oporekati, vendar Žmavc (2007) in nekateri drugi avtorji (Dawson in sod., 2006; Douglas, 1999) opozarjajo na podcenjen vpliv gradbene stroke pri projektiranju (izbira materialov, vrste in

debeline plasti) in izvedbi del (način oblikovanja strukture). Vplivi graditve predstavljajo protiutež pri obvladovanju zunanjih vzrokov propadanja vozišč. Slika 7 predstavlja sintezo bistvenih dejavnikov propadanja vozišč in jo bomo v nadaljevanju uporabili kot model vplivnih dejavnikov, ki vplivajo na stanje gramoznih vozišč.



Slika 7: Shema dejavnikov propadanja vozišč

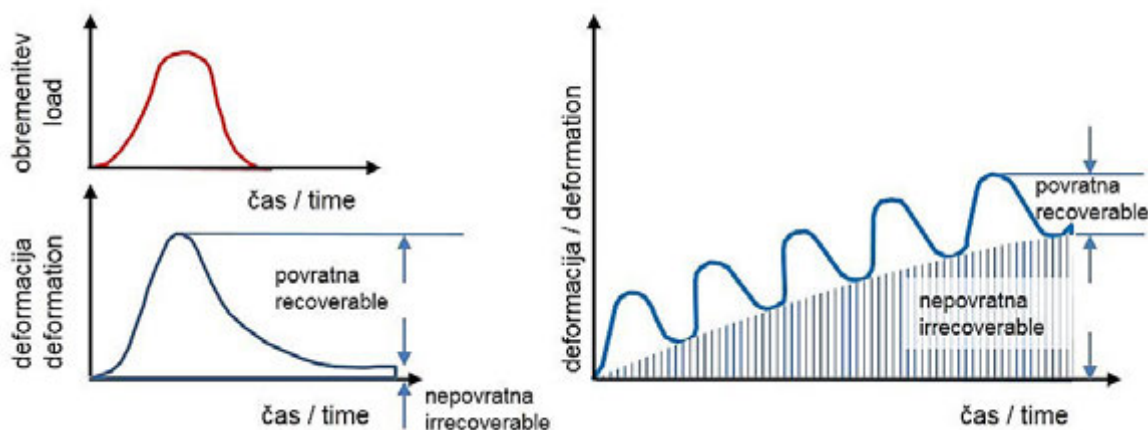
Figure 7: Scheme of the pavement deterioration factors

3.1.5 Posledice delovanja vplivnih dejavnikov na gramozne ceste Consequences of the influencing factors on gravel roads

Voziščne konstrukcije so podvržene sočasnim vplivom vseh dejavnikov, pri tem pa cestno telo deluje kot celota. Napake ali poškodbe v eni plasti vplivajo na druge in se prej ali slej vizualizirajo na vozišču. Za razliko od sodobnih vozišč so prometne obremenitve na maloprometnih cestah praviloma manjše, vplivi klimatskih in hidroloških dejavnikov pa večji (Earth and aggregate surfacing design guide for low-volume roads, 1996). Raziskav o vplivih neustreznega projektiranja in pomanjkljive izvedbe ni, velja pa splošno prepričanje, da na ceneno zgrajenih maloprometnih cestah ni mogoče pričakovati boljšega delovanja voziščnih konstrukcij. To še posebej velja za nekategorizirane gramozne ceste, kamor sodi večina gozdnih cest in kjer je dimenzioniranje VK največkrat prepuščeno izvajalcu.

Temeljna tla, nasipi in nevezane nosilne plasti gramoznih VK so pod obremenitvami zaradi prometa podvrženi deformacijam, ki jih obravnava mehanika tal z različnimi modeli. V

primeru gramoznih cest v voziščni konstrukciji prevladujejo nekoherentne zemljine in zmesi zrn. Preoblikovanje vozišča je elasto-plastično. Po razbremenitvi se tla skoraj v celoti povrnejo v prvotno stanje (slika 8, levo), velikost trajne deformacije je večja na manj nosilnih voziščih (O'Mahony in sod., 2000) in po večjih obremenitvah (Dawson, 2003).



Slika 8: Kopičenje deformacij vozišča (prirejeno po Brown, 1990: A.6)

Figure 8: Accumulation of the carriageway deformations (adapted according Brown, 1990: A.6)

S ponavljanjem obremenitev v neugodnih klimatskih pogojih se plastične deformacije kopičijo (slika 8, desno). Spremenita se oblika in stanje vozišča, najbolj izrazita posledica so različni tipi kolesnic (Dawson, 1997; Dawson in sod., 2008). Nadaljnji razvoj poškodb vozišča je odvisen od poteka ceste ter oblike in opreme ceste v prečnem profilu (slika 9).



Slika 9: Tipične trajne poškodbe gramoznih vozišč na ravnih (levo) in strmih (desno) odsekih

Figure 9: Typical permanent damages of gravel roads on flat (left) and steep (right) sections

Odseki cest z majhnimi nakloni nivelete in neustreznim odvodnjavanjem dobijo »grbo« na sredini vozišča in zablatene kolesnice, na odsekih z večjimi nakloni nivelete pa se pojavijo erozijski žlebovi (Potočnik, 1993). V obeh primerih prihaja do dodatnega namakanja VK z vodo, kar dodatno zmanjšuje nosilnost vozišča ter na mešanih profilih povečuje možnosti porušitve nasipnega dela cestnega telesa in neprevoznosti ceste.

Prečna in vzdolžna neravnost sta pomembni lastnosti vozne površine, ki vplivata na nivo voznega udobja in varnosti. Kolesnice so element prečne neravnosti vozišč. Na asfaltnih voziščih kolesnice povečujejo dinamične obremenitve voziščne konstrukcije, kar pospešuje nadaljnje deformacije VK (Kalin in sod., 2006). Metode določanja ravnosti vozišč so standardizirane (TSC 06.610 : 2003). Postopek merjenja kolesnic na asfaltnih voziščih ni zahteven, predvidevanje, kje bodo nastale, pa je zapleten problem (Hribar, 2008). Pri določanju vzdolžne neravnosti se uporablja mednarodni indeks ravnosti IRI (Sayers in sod., 1986), ki ga je mogoče uporabiti tudi za makadamske ceste (Keller, 1989; Lovrić, 1983).

Na stranskih gozdnih cestah v Sloveniji je večji problem prečna neravnost, kolesnice pa so eden od pogostejših virov prečne neravnosti vozne površine (Robek, 1996). V zadnjem času so nastajanje kolesnic na gramoznih voziščih celovito proučevali za potrebe gozdarstva na Škotskem (Dawson in Killer, 2009) ter ugotovili, da je kolesnice na gozdnih cestah lahko meriti, težje pojasniti in zelo težko napovedati.

Ravnost in togost vozišča sta bistveni lastnosti vozne površine gramoznih cest, ki se spreminjata zaradi dolgotrajnih prometnih in klimatskih vplivov. Velikost teh sprememb je merilo stanja in obrabljenosti tudi pri gozdnih prometnicah (Kosztka, 1998). Za razliko od ravnosti je nosilnost vozišča neposreden kazalnik strukturne funkcionalnosti VK.

3.2 GRAJENE GOZDNE PROMETNICE V SLOVENIJI CONSTRUCTED FOREST THOROUGHFARES IN SLOVENIA

3.2.1 Vrste in količina prometnic Type and amount of thoroughfares

3.2.1.1 Vrste grajenih gozdnih prometnic in merila za njihovo razvrščanje Type of constructed forest thoroughfares and the criteria for their classification

Po Zakonu o gozdovih (1993) so gozdne prometnice v Sloveniji gozdne ceste, vlake in stalne žičnice. Gozdne ceste in vlake podrobno določa Pravilnik o gozdnih prometnicah (2009), ki pravi, da je grajena gozdna prometnica tista, pri kateri kote planuma v mešanem profilu odstopajo od kote terena za več kot 0,5 m na pretežni dolžini trase. Gozdna cesta je grajena

gozdna prometnica, ki je namenjena predvsem gospodarjenju z gozdom, po predpisih, ki urejajo javne ceste, je nekategorizirana, omogoča racionalen prevoz gozdnih lesnih asortimentov, je javnega značaja in je vodena v evidenci gozdnih cest. Gozdna vlaka je grajena ali negrajena gozdna prometnica, namenjena spravilu lesa s praviimi sredstvi.

Osnova za kategorizacijo gozdnih cest v Sloveniji je kombinacija strukture prometa in ocenjene prometne obremenitve (Potočnik, 1996b). Pravilnik o gozdnih prometnicah (2009) določa tri kategorije gozdnih cest. Kategorija G1 je predvidena za gozdne ceste, kjer lahko vsakodnevni javni promet po številu presega promet, ki je neposredno povezan z gospodarjenjem z gozdovi. Kategorija G2 je predvidena za glavne gozdne ceste, na katere gravitira preko 1000 ha zaledja gozdov in na njih prevladuje promet, namenjen gospodarjenju z gozdovi. Kategorija G3 je predvidena za stranske gozdne ceste, na katere gravitira do 1000 ha zaledja gozdov in na njih prevladuje promet, namenjen gospodarjenju z gozdovi. Omenjeni pravilnik razlikuje med grajenimi in pripravljenimi vlakami. Med slednje uvršča vse tiste, ki ne ustrezajo kriteriju grajene gozdne prometnice. Pravilnik med gozdne prometnice uvršča tudi protipožarne preseke 1. reda in protipožarne preseke 2. reda. Prve so po tehničnih elementih podobne gozdnim cestam, druge pa grajenim vlakam.

V tujini je delitev gozdnih prometnic zelo različna. Delijo se glede na funkcijo, način gradnje, pomembnost, lego v prostoru in še marsikaj. Za namene naše raziskave so pomembne kategorije prometnic in merila za določanje kategorij. Po mednarodni klasifikaciji gozdnih cest FAO (Manual for the planning, design and construction of forest roads in steep terrain, 1998) so kriteriji za klasifikacijo namenska raba, prometni volumen in terenski značaj. Posebej obravnava dostopne ceste, ki potekajo do gozdnih predelov. Med gozdne ceste uvršča tudi traktorske ceste in celo traktorske vlake (Manual for the planning, design and construction of forest roads in steep terrain, 1998: 9). Na Hrvaškem je eden od kriterijev za kategorizacijo gozdnih cest prometna obremenitev (Lovrič, 1989: 26). Na Češkem in Slovaškem med gozdne ceste štejejo tudi vlake. Merili za njihovo kategorizacijo sta načrtovana vozna hitrost in prostorski značaj prometnice (Kristan, 2008).

Zanimive so tudi kategorizacije gozdnih cest v anglosaksonskem svetu. V Kanadi so pogoste snežne ceste, kriterij za delitve grajenih cest pa je čas njihove predvidene uporabe; ločijo enoletne ceste in petletne ceste (Forest road engineering guidebook, 2002). Priročnik za gradnjo gozdnih cest na Novi Zelandiji uporablja za kategorizacijo gozdnih cest projektirano vozno hitrost, širino ceste in letni prometni volumen (Larcombe, 1999: 34).

V evropskem prostoru kot glavni kriterij za kategorizacijo gozdnih cest prevladuje namen prometnice (glavne, stranske itd.), tega pa pojasnjuje več kazalnikov, med katerimi je

praviloma vsaj posredno tudi ocena prometne obremenitve. Nosilnost ceste običajno ni kriterij za kategorizacijo gozdnih cest, čeprav se vselej skriva v ozadju.

3.2.1.2 Količina in stanje grajenih gozdnih prometnic v Sloveniji

Quantity and condition of constructed forest thoroughfares in Slovenia

Podatke o količini in stanju gozdnih cest v Sloveniji zbira Zavod za gozdove Slovenije (ZGS), ki v letnih poročilih objavlja podatke o skupnih dolžinah gozdnih cest in protipožarnih presekah 1. reda (t. i. protipožarnih cest) ter o novogradnjah in rekonstrukcijah teh prometnic v zadnjem letu. Po poročilu ZGS (2013) je bilo leta 2012 v Sloveniji 12.046 km gozdnih cest in 489 km protipožarnih cest. V zadnjem desetletju se je v Sloveniji v povprečju zgradilo med 10 in 20 km novih cest ter približno toliko tudi rekonstruiralo.

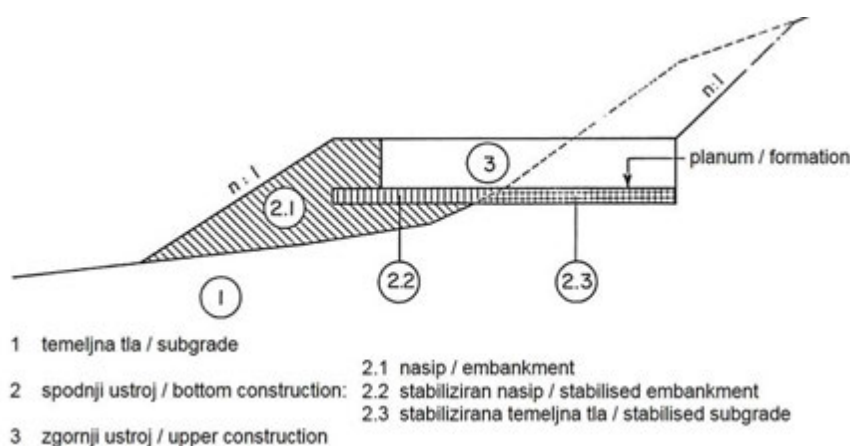
Podatkov o skupni količini zgrajenih vlak ZGS ne objavlja, v letnih poročilih pa poroča o letnem prirastu pripravljenih in grajenih vlak. Leta 2007 je bilo na novo pripravljenih 468 km vlak oziroma na novo zgrajenih ali rekonstruiranih 211 km vlak (Poročilo Zavoda za gozdove Slovenije o gozdovih za leto 2007, 2008). Leta 2012 je bilo na novo pripravljenih 249 km vlak oziroma na novo zgrajenih ali rekonstruiranih 422 km vlak (Poročilo Zavoda za gozdove Slovenije o gozdovih za leto 2012, 2013). Skupna količina grajenih vlak v Sloveniji ni znana, leta 2006 je bila ocenjena na preko 50.000 km (Robek in sod., 2006).

Informacijski sistem za gozdne ceste v Sloveniji (Beguš, 2006) vsebuje podatke o utrditvi gozdne ceste in stanju vozišča. V informacijskem sistemu za gozdne ceste zaenkrat ni podatka o prečni ravnosti vozišča ali njegovi nosilnosti, so pa podatki o omejitvah prometa na posamezni cesti. V letnih poročilih ZGS poroča o opravljenih delih na gozdnih cestah, iz katerih je mogoče sklepati o stanju omrežja. Med opravljenimi deli (v urah) v obdobju 2009–2012 prevladuje profiliranje vozišča, sledi čiščenje naprav za odvodnjavanje, komprimiranje vozišča in ročno čiščenje cestišča, med količino porabljenega materiala pa navoz gramoza (Poročilo Zavoda za gozdove Slovenije o gozdovih za leto 2012, 2013: 53). Po tujih izkušnjah so podatki o stanju vozišč in VK pomemben element za optimiziranje vzdrževanja gozdnih cest (Kosztka, 1998; Pellegrini in sod., 2013).

3.2.2 Zgradba prometnic Thoroughfare structure

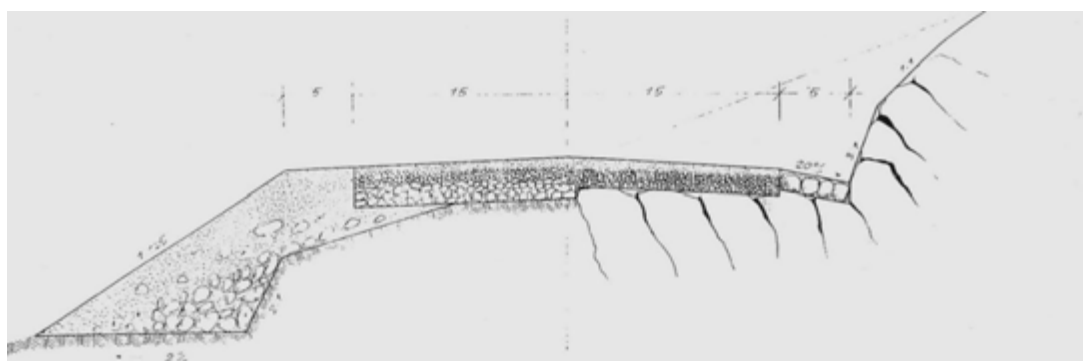
3.2.2.1 Zgradba gozdne ceste Forest road structure

Gozdarji v Evropi delijo zgradbo gozdne ceste v prečnem prerezu na spodnji in zgornji ustroj (slika 10). To logiko smo prevzeli tudi v Sloveniji (Smernice za projektiranje gozdnih cest, 1982). Delitev izvira s področja graditve železnic, kjer je še vedno v uporabi (Sukič, 2013).



Slika 10: Splošni model zgradbe gozdne ceste v prečnem profilu (Merkblatt Nr. 201. Unterbau: Begriffe, 1965)
Figure 10: General model of pavement structure on forest road (Merkblatt Nr. 201. Unterbau: Begriffe, 1965)

Slika 11 je historičen primer normalnega prečnega profila gozdne ceste na trdi podlagi v mešanem profilu (Poje, 1993), ki v Sloveniji prevladuje (Dobre, 1974). Kaže delitev vozišča na del v odkopu¹⁰ in del v nasipu ter je zelo podobna modelu na sliki 10. Razlike so v stabilizaciji temeljnih tal ali nasipov, ki jih pri gozdnih cestah v Sloveniji ne izvajamo več.



Slika 11: Prečni profil iz projektne dokumentacije za gozdno cesto na Kočevskem okoli leta 1980 (Poje, 1993: priloga 2)

Figure 11: Cross-section from forest road design from Kočevska area around the year 1980 (Poje, 1993: app. 2)

¹⁰ V gozdarstvu ima pojem odkop enak pomen kot vkop v gradbeništvu. Mi bomo uporabljali izraz odkop.

Pri gradnji gozdnih cest so pomembni skupni stroški in razmerja med glavnimi skupinami stroškov. Razmerja se z uvajanjem novih tehnologij spreminjajo. Poje (1993: 15) poroča, da so v devetdesetih letih prejšnjega stoletja večino stroškov predstavljali stroški zgornjega ustroja oziroma VK gozdne ceste. Vzrok temu je bila dobava zmesi zrn za nosilni ustroj izven območja gradnje. Robek in sodelavci (2006: 521) ugotavljajo, da so v obdobju, ki ga obravnava ta raziskava, glavni strošek zemeljska dela oziroma izdelava spodnjega ustroja. Možni vzrok za tako spremembo strukture stroškov je gradnja na vse bolj strmih terenih z več izkopi in višjimi stroški odvoza nevgrajenega materiala.

Zgradba in vrste materialov VK gozdnih cest v tujini so podobne. Precej več je razlik v pojmovanju potrebne debeline VK, pri tem pa ni vselej jasno, ali gre za debelino zgornjega ustroja (torej VK) ali pa debelino celotne utrditve oziroma celotnega cestnega telesa. Larcombe (1999) predvideva debelino utrditve med 8 in 50 cm, odvisno od vrednosti CBR temeljnih tal. Lovrić (1989) predvideva debelino VK med 20 in 45 cm glede na izbiro materiala in stopnjo prometne obremenitve, a predvideva utrjeno posteljico nasipa.

3.2.2.2 Zgradba traktorske vlake

Skid trail structure

Grajene traktorske vlake so neutrjene, kar pomeni, da imajo samo spodnji ustroj. Promet poteka neposredno po zemljini, pridobljeni med oblikovanjem planuma. Kakovost vozne površine in trajnost vlake je odvisna od vrste tal ter geometrijskih elementov (zlasti nivelete) in opreme vlake za odvod meteorne vode (prečnih jarkov). Pravilnik o gozdnih prometnicah (2009) ne navaja nobenih zahtev za nosilnost temeljnih tal, na katerih poteka gradnja vlak, določa pa maksimalno širino planuma spodnjega ustroja, ki ne sme presegati 3,5 m. Traktorske vlake se vse bolj uporabljajo za vožnjo pri spravilu lesa (Žlogar, 2007).

3.2.3 Inženirske lastnosti tal – osnova za graditev v gozdarstvu

Engineering properties of soils – basis for constructions in forestry

3.2.3.1 Osnovne fizikalne lastnosti gozdnih tal

Basic physical properties of forest soils

Gozdne prometnice gradimo v gozdnem prostoru, kjer je prevladujoči ekosistem gozd. Dobre (1986) je analiziral naravne danosti za gradnjo gozdnih prometnic v Sloveniji in ugotovil, da se 70 % površine gozdov nahaja na naklonih nad 20 stopinj, pri čemer je v razredu 20–35 stopinj kar 36 % površine gozdov. Največja površina gozdov je na nadmorskih višinah 400–800 m. Kar 56 % površine vseh gozdov je na karbonatnih geoloških

podlagah (apnenci in dolomiti), 32 % na nekarbonatnih in 12 % na mešanih podlagah. Po podatkih ZGS (cit. po (Urbančič in Simončič, 2005)) raste v Sloveniji 80 % gozdov na karbonatnih podlagah in kar 49 % gozdov na plitvih karbonatnih tleh (rendzinah).

Tla v gozdarstvu običajno obravnavamo s pedološkega vidika, pri katerem je rodovitnost tal izpostavljena kot njena bistvena lastnost (Ćirić, 1984). Naravna gozdna tla se od travniških ali njivskih ločijo po svojih zunanjih in notranjih morfoloških lastnostih. Pri zunanji morfologiji gre za trajno pokritost površja z organsko snovjo, pri notranji morfologiji pa za zgradbo in zaporedje talnih horizontov. Notranja morfologija je osnova za pedološko klasifikacijo gozdnih tal v Sloveniji (Urbančič in Simončič, 2005). Mehanske lastnosti tal za pedološko razvrščanje niso odločilne. Proučevanje mehanskih lastnosti gozdnih tal se največkrat nanaša na zbitost zaradi uporabe gozdarske mehanizacije (Intihar, 2014; Mali in Košir, 2007; Mihelič, 2013; Robek, 1994). Pri tem so za kazalnik zbitosti uporabili fizikalne ali pa morfološke lastnosti tal, za razvrščanje tal pa pedološko klasifikacijo. Podobno velja tudi za opise tal, povezanih z grajenimi prometnicami (Robek, 1994; Žlogar, 2007).

Za potrebe pedoloških raziskav v mednarodnem programu spremljanja stanja gozdov (ICP Forest) se uporablja prilagojena ameriška teksturna klasifikacija mineralnega dela tal (FAO, 1990 cit. po Cools in De Vos, 2010: 150), pri kateri se tekstura določa samo za delce, manjše od 2,0 mm (SIST ISO 11277:2012).

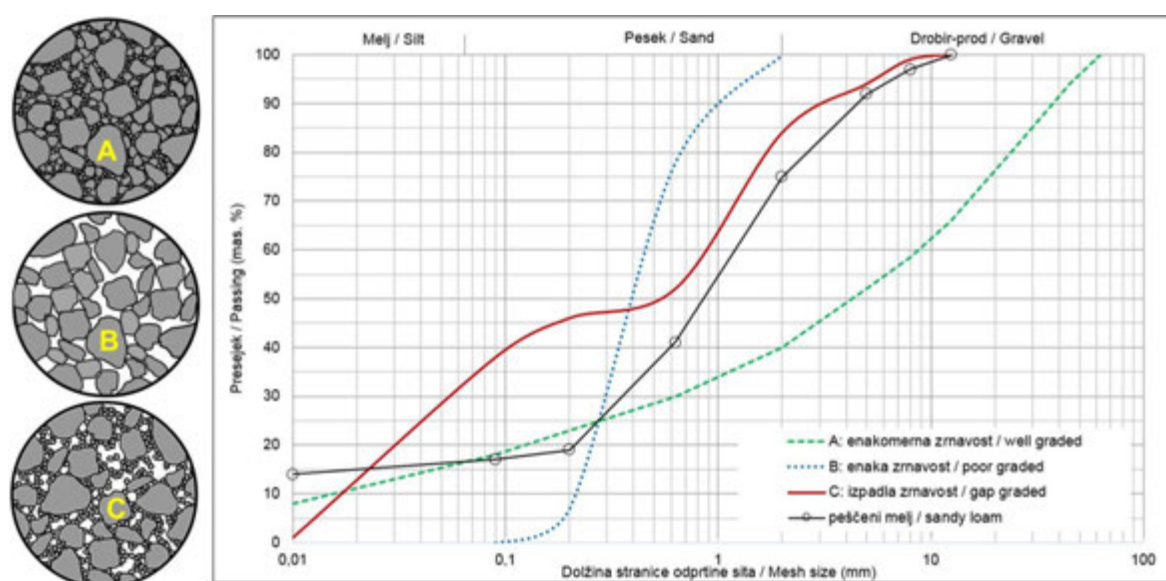
Na različnih področjih gozdne tehnike je pogostejša od pedološke inženirska obravnava tal. Znanstvena podlaga inženirske obravnave tal je mehanika tal, ki tla opredeljuje kot vrhnji del zemeljske skorje, sestavljen iz nepovezanih ali slabo povezanih mineralnih in/ali deloma organskih delcev, ki jih je mogoče razgraditi brez uporabe sile (npr. z nasipavanjem v vodo) (Terzaghi in sod., 1996). Osnova inženirske obravnave zemljine je koncept zmesi, trofazna sestava (trdna, tekoča in plinasta faza) zemljine in zanemarjanje živalske komponente tal. Mehanika tal opisuje tla z znaki, ki omogočajo razvrščanje in spreminjanje tal za potrebe geotehnike (Holtz in Kovacs, 1981) in teramehanike¹¹ (Wong, 2009).

Pri graditvi gozdnih prometnic v tujini uporabljajo inženirsko pojmovanje tal (Merkblatt Nr.201. Unterbau: Begriffe, 1965) in razlikujejo tri vidike zemljine: kot gradbeno podlago, kot vir statične obtežbe ali kot podpora prometnim obremenitvam (Kuonen, 1983).

Podlaga za inženirsko obravnavo tal so osnovne fizikalne lastnosti tal. Te so zrnavost, gostota, poroznost, vlažnost, zasičenost in konsistenca. Zrnavost ali granulometrijska

¹¹ Teramehanika je disciplina strojništva, ki proučuje medsebojne vplive vozila in podlage.

sestava se nanaša na trdno fazo tal in pri naravnih gozdnih tleh vključuje tako mineralne kot tudi organske delce v različnih stopnjah razpada. Zrnavost tal je rezultat zrnitve, ki je ločevanje zmesi naravnih delcev na velikostne razrede s pomočjo suhega ali mokrega sejanja in sedimentiranja. Postopki priprave reprezentativnega vzorca naravnih tal so določeni s standardom SIST EN 1997-2:2007. Postopek suhega sejanja določa SIST EN 933-1:2012. Zrnavost zmesi zrn prikazujemo s sejalno krivuljo (slika 12) in količniki zrnivosti.



Slika 12: Prikaz tipov zrnivosti in enega vzorca peščeno meljaste zemljine gozdnih tal

Figure 12: Illustration of grading types and one sample of sandy loam forest soil

Glede na obliko presejne krivulje ločimo enakomerno zrnave zemljine (položna krivulja), enako zrnave (strma krivulja) in izpadlo zrnave zemljine (krivulja ima sedlo). Enakomerno zrnave zemljine so dobro nosilne in prepustne ter težke za zbijanje. Enako zrnave zemljine so dobro prepustne za vodo, slabo nosilne in težke za zbijanje. Izpadlo zrnave zemljine so slabo nosilne in jih je težko zgostiti. Značaj zrnivosti opisujeta količnik neenakomernosti C_u (enačba 1) in količnik zakrivljenosti presejne krivulje C_c (enačba 2).

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad \dots (1)$$

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{(d_{10} \times d_{60})} \quad \dots (2)$$

d_{10} dolžina stranice sita (mm), skozi katero se preseje 10 m.% zmesi – učinkoviti premer/mesh size (mm) with 10 m.-% passing – efficient diameter

d_{30}	dolžina stranice sita (mm), skozi katero se preseje 30 m.-% zmesi/mesh size (mm) with 30 m.-% passing
d_{60}	dolžina stranice sita (mm), skozi katero se preseje 60 m.-% zmesi – prevladujoči premer/mesh size (mm) with 60 m.-% passing – prevalent diameter
C_u	količnik neenakomernosti/non-uniformity coefficient
C_c	količnik ukrivljenosti/coefficient of curvature

Zrnava vpliva na fizikalne lastnosti tal, zlasti na stisljivost, strižno trdnost in hidravlično prevodnost zemljine. Zrnava je posebej pomembna za fizikalne lastnosti grobo zrnavih zemljin, pri katerih večino mase sestavljajo zrna velikosti nad 0,063 mm. Delci velikosti 2–63 mm predstavljajo gramoz. Če je gramoz naravnega izvora, ga imenujemo prod, če pa je pridobljen z drobljenjem, je drobir. Če po masi prevladujejo zrna velikosti do 0,063 mm, govorimo o drobno zrnavih zemljinah, pri katerih ima poleg zrnivosti velik vpliv na inženirske lastnosti voda.

Za drobno zrnave zemljine določamo konsistenco. Konsistenca zemljine je njena odpornost na spremembo oblike glede na vsebnost vode. Določajo jo tri mejna stanja zemljine (tudi »lezne meje«) – meja židkosti, meja plastičnosti in meja krčenja ter dva indeksa – indeks plastičnosti in indeks konsistence, ki jih je določil švedski kemik Atterberg (Terzaghi in sod., 1996). Pri enaki naravni vlažnosti so lahko zemljine v različni konsistenci. Ista zemljina ima vedno iste lezne meje. Indeks plastičnosti se s časom ne spreminja. Indeks konsistence je za židke zemljine manjši od nič, za poltrdne zemljine pa nad ena. Pod obtežbo se s časom spreminja naravna vlažnost in konsistenca zemljine.

Zrnava zmesi zrn, njihova mineraloška sestava, oblika in mehanske lastnosti ter stopnja zgoščenosti imajo velik vpliv na strižno trdnost in odpornost proti trajnim deformacijam (Cheung in Dawson, 2002). Čeprav se analize mehanskih in geometrijskih lastnosti tal in zmesi zrn priporočajo pri gradnji gozdnih cest že preko trideset let (Eisbacher, 1976), so za investitorje stroškovno nesprejemljive in se v praksi ne izvajajo.

3.2.3.2 Inženirska klasifikacija gozdnih tal

Engineering classification of forest soils

Zrnava in konsistenca sta osnova za poenoten sistem klasificiranja zemljin – USCS, ki ga je predlagal Američan Arthur Casagrande (1948 cit. po Holtz in Kovacs, 1981: 47). Že preko 30 let je USCS priznana kot merodajna klasifikacija zemljin tudi v gozdarstvu v Evropi (na primer Kuonen, 1983: 327; Lovrič, 1989). Prednost USCS-klasifikacije pred nekaterimi drugimi klasifikacijami (npr. American Society for Testing and Materials: ASTM D 3282 -

83, 1988) je nedvoumnost razvrščanja. USCS-klasifikacija je danes najpogosteje uporabljen sistem klasificiranja zemljin v inženirski praksi, ima pa zato tudi največ izvedenk.

V Sloveniji je klasificiranje zemljin del geotehničnega projektiranja in od leta 2007 regulirano s krovnim standardom Evrokod 7¹² (SIST EN 1997-2:2007, 2007). Načela in pravila geotehničnega razvrščanja zemljin določata dva standarda (SIST EN ISO 14688-1:2004, 2004; SIST EN ISO 14688-2:2004, 2004), katerih principi so podobni USCS, a imajo nomenklaturu skupin zemljin povsem drugačno. Majes (2014) navaja, da je pri nas danes najbolj uveljavljena modificirana AC-klasifikacija zemljin, ki je zelo podobna USCS.

Modificirana AC-klasifikacija (priloga A in priloga B) deli zemljine na debelo zrnate (nekoherentne, sipke), drobno zrnate (koherentne, vezljive) in organske zemljine (šote). Osnova za podrobno klasifikacijo nekoherentnih zemljin so delež proda, količnik neenakomernosti in količnik zakrivljenosti. Osnova za klasifikacijo koherentnih zemljin sta meja židkosti in indeks plastičnosti, pri organskih zemljinah pa še barva in vonj (smrad).

AC skupno razlikuje 15 vrst različnih zemljin, ki so praktično identične z USCS:

- nekoherentne zemljine ločimo v 8 različnih vrst¹³:
 - gramoz (G): GW, GP, GC, GM,
 - peski (S): SW, SP, SC, SM;
- koherentne zemljine ločimo v 6 različnih vrst¹⁴:
 - melji (M): ML in MH,
 - organske zemljine (O): OL in OH,
 - gline (C): CL in CH;
- šote ne delimo v podskupine. PT

Holtz in Kovacs (1981) izpostavljata, da je smisel dobre inženirske klasifikacije povezava vrst zemljin z njihovimi inženirskimi lastnostmi. Ker večino gozdnih prometnic zgradimo iz

¹² Sistem evropskih standardov za projektiranje gradbenih konstrukcij.

¹³ Drugi indeksi pri označbah debelozrnatih zemljinah imajo sledeč pomen:

W ... dobro stopnjevana zrnavaost,
P ... slabo stopnjevana zrnavaost,
M ... gramoz s preobilno količino melja (zameljen material),
C ... gramoz s preobilno količino gline (zaglinjen material).

¹⁴ Drugi indeksi pri označbah drobnozrnatih zemljin imajo naslednji pomen:

H ... zelo stisljiva zemljina,
L ... malo stisljiva zemljina.

zemljin, je z vidika nosilnosti izbira prave klasifikacije zemljin zelo pomembna. V tem smislu je zanimiv standard Ameriškega združenja za testiranje in materiale (ASTM D 3282 - 83), ki v klasifikaciji materialov za gradnjo cest navaja mešanico zemljine in mineralnih zmesi. Omenjeni standard se v Sloveniji ne uporablja.

Nekdanje strokovne podlage za projektiranje gozdnih cest v Sloveniji (Smernice za projektiranje gozdnih cest, 1982) v navodilih za sestavo projektne dokumentacije za gradnjo gozdne ceste navajajo potrebo po opisu geološke podlage v tehničnem poročilu, ne dajejo pa usmeritev za razvrščanje zemljin na območju gradnje. Predlog novih smernic za projektiranje cest v smernici št. 401 »Zemeljska dela pri gradnji gozdnih cest – osnutek« (Petkovšek in sod., 2002) izpostavlja potrebo po geološko-geotehničnih preiskavah, podaja razvrstitev hribin na zemljine in kamnine, za razvrščanje zemljin predlaga AC-klasifikacijo ter priporoča njeno uporabo za oceno trdnosti, občutljivosti, vgradljivosti in deformabilnosti. Predlagana smernica kaže na veliko uporabnost AC-klasifikacije tal v gozdarstvu, za njeno praktično uporabo pa je treba razumeti zakonitosti deformabilnosti gozdnih tal.

3.2.3.3 Osnove deformabilnosti in trdnosti tal

Basis for deformability and strength of soils

Na realna telesa v mirovanju delujejo sile, te pa povzročajo deformacije. V mehaniki ravnovesnih stanj je pomembna odvisnost med napetostmi in deformacijami. Za večino trdnih teles odvisnost ni linearna; ločimo območje elastičnosti, plastičnosti in porušitev. Za razliko od trdnih teles, kjer so značilna območja dokaj dobro napovedljiva, so gozdna tla nelinearni večfazni sistemi. Zveze med napetostmi in deformacijami so zelo zapletene (Šuklje, 1984). Pri deformacijah tal razlikujemo posedanje (konsolidacijo) in trdnost tal.

Posedanje tal nastane zaradi lastne teže zemljine ali pa zaradi statične obtežbe (npr. s temelji stavbe). Velikost in hitrost posedanja sta odvisni od časa obremenjevanja, vrste zemljine ter količine vode v zemljini. Skupni posedek je seštevek trenutnega posedka zaradi obremenitve ter primarnega in sekundarnega konsolidacijskega posedka. Pri nevezljivih (grobozrnatih) zemljinah je najpomembnejši trenutni posedek, ki je posledica drobljenja zrn, stiskanja vode v pore ter iztisnjenja zraka in vode iz por pod mestom obremenitve. Če je bila obremenitev nevezljive zemljine majhna in kratkotrajna, se bo ta skoraj v celoti povrnila v prvotno lego. Pri statični obremenitvi dodatnih posedkov v daljšem času ni pričakovati.

V vezljivi zemljini nastane ob primerljivi obremenitvi manjši trenutni posedek, končni skupni posedek po daljšem časovnem obdobju pa bo večji od tistega v sipki zemljini. Vzrok je ustalitveni posedek, ki je posledica iztisnjenja vode iz sistema kapilarnih por. Osnovne

značilnosti posedanja zemljine ugotavljamo v laboratoriju z edometrom pri določanju modulov stisljivosti oziroma s triosnimi preiskavami kompresijskega in strižnega modula.

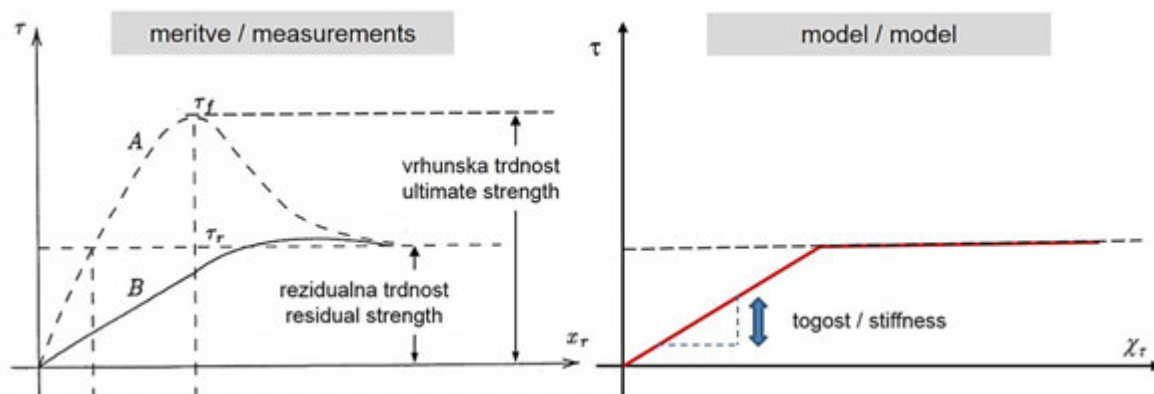
Poseben vidik posedanja tal je zbijanje tal, pri katerem gre za načrtno (zavestno) zgoščevanje zemljine z uporabo mehanske energije (Holtz in Kovacs, 1981). Pri tem praviloma spreminjamo vlažnost zemljine, ki jo zgoščamo, lahko pa spreminjamo tudi njeno zrnavost. Cilj zgoščevanja je povečati suho gostoto zemljine, saj s tem izboljšamo inženirske lastnosti tal (večja strižna trdnost tal, večja nosilnost tal, zmanjšana prevodnost tal za vodo).

Povečanje suhe gostote tal gre vedno na račun zmanjšanja volumna por. Stopnja zgoščenosti tal pri dani energiji je odvisna od vlažnosti. Optimalno vlažnost zemljine za mehansko zgostitev zemljine ugotovimo s Proktorjevim preizkusom. V praksi zahtevamo, da se s Proktorjevim preizkusom doseže določen odstotek maksimalne suhe prostorninske mase (običajno 95 %). Za zgoščevanje z vibriranjem so posebej primerne nekoherentne zemljine. Zgoščevanje koherentnih zemljin je manj učinkovito.

Zgoščevanje zemljine je posebej pomembno, kadar zemljino uporabljamo za gradbeni material nasipov in nosilnih plasti voziščnih konstrukcij. Tekom vgrajevanja zgoščenost preverjamo s točkovnimi in kontinuiranimi meritvami. Osnovna naprava za točkovno meritev zgoščenosti zemljine je izotopski merilnik (TSC 06.711 : 2001). Njegovi glavni prednosti sta neporušna meritev gostote in sočasna meritev vlage, slabost pa sevanje in posledično zapleteno prenašanje in shranjevanje naprave. Standardni nadomestni postopki za točkovne meritve gostote temeljijo na zapolnitvi mesta izkopanega vzorca s kalibriranim peskom ali vodo (TSC 06.712 : 2002). Prednost nadomestnih točkovnih postopkov je enostavnost izvedbe, slabost pa njihova zamudnost.

Pri praktičnem zgoščevanju zemljine so se v zadnjem času z velikim uspehom uveljavili postopki kontinuiranih površinskih dinamičnih meritev gostote, pri katerih določamo zgoščenost vgrajenega materiala na površini plasti z opremo, nameščeno na merilnem valjarju s kolesom z jeklenim obročem (TSC 06.713 : 2005).

Strižna trdnost zemljine je najpomembnejša mehanska lastnost za geotehniko (Terzaghi in sod., 1996). Nosilnost temeljev, stabilnost pobočij, dimenzije opornih sten ter posredno tudi dimenzije voziščnih konstrukcij so odvisne od strižne trdnosti zemljine. Vrhunska strižna trdnost zemljine je skrajna strižna trdnost, ki jo tla prenesejo pred porušitvijo (slika 13). Za dimenzioniranje ne računamo z vrhunsko strižno trdnostjo, pač pa jo zmanjšamo za ustrezen varnostni faktor, pri tem pa upoštevamo tudi razmerje med vrhunsko in rezidualno strižno trdnostjo, ki je svojevrsten spomin zemljine za preteke obremenitve (Holtz in Kovacs, 1981).



Slika 13: Razmerja med strižno trdnostjo in togostjo zemljine

Figure 13: Relations between shear strength and stiffness of soils

Strižna trdnost zemljine je odvisna od vlažnosti, stopnje konsolidacije, normalnih napetosti, efektivnih tlakov, vrste materiala, časa striženja in načina stopnjevanja obremenitve. Zveza med strižno trdnostjo in normalnimi napetostmi je dana s posplošenim Coulombovim zakonom za nekonsolidirano zemljino. V nevezanih zmesih zrn je trenje med zrn glavni faktor odpora proti delovanju zunanjih sil. V koherentnih zemljinah je natezna trdnost vodnih open glavna sila zoper delovanje zunanjih sil. Bliže kot so zrna med sabo, večja je gostota zemljine, večje so adhezijske sile med delci in večja je strižna trdnost zemljine.

Strižno trdnost ugotavljamo v laboratoriju z neposrednim strižnim preizkusom ali s triosnimi preiskavami. Laboratorijske preiskave strižne trdnosti so drage in zamudne. Strižno trdnost zemljine v laboratoriju ocenjujemo s CBR-testom. Strižno trdnost zemljine ocenjujemo na terenu posredno s pomočjo krilne sonde, penetrometrom ali terensko različico CBR-testa.

Če je trdnost tal merilo njihove odpornosti proti porušitvi, je togost odpornost tal proti plastičnim deformacijam (slika 13). Togost tal se izraža z deformacijskimi moduli, ki predstavljajo napetostno-deformacijske relacije pri majhnih obremenitvah, podobne tistim, ki nastopajo ob posamični vožnji kamiona po gramozni cesti.

Zveze med trdnostjo in togostjo so osnova za dimenzioniranje voziščnih konstrukcij. Predstavljajo povezavo s cenejšimi postopki terenskih in laboratorijskih preiskav zemljin. Ta zveza je dana z modelom obremenitve pod ploščo, kjer ugotavljamo elastične deformacije z moduli reakcije tal kot razmerjem med pritiskom in elastično deformacijo.

3.2.4 Razvoj omrežja grajenih gozdnih prometnic

Development of constructed forest thoroughfare network

3.2.4.1 Trendi rabe

Utilisation trends

V naslednjem desetletju je v Sloveniji predvideno povečevanje poseka lesa (Poljanec, 2011). Z novo finančno perspektivo (PRP 2014-2020, 2013) se bodo nadaljevala vlaganja v gozdarsko mehanizacijo in gozdno infrastrukturo v zasebnih gozdovih in gozdovih lokalnih skupnosti. V zasebnih gozdovih bo naraščala uporaba traktorskih prikolic za prevoz lesa. Velikost traktorskih kompozicij raste (Šušnjar in sod., 2008), s tem pa rastejo njihova masa in obremenitve voznih površin vlak. Pričakovati je naraščanje dolžin neutrjenih cest in večanje deleža vožnje pri spravilu lesa (slika 14 levo), omejevanje strojne sečnje na nenosilnih tleh (Horn in sod., 2007) in večjo skrb za zniževanje stroškov transporta lesa v državnih gozdovih po tujih vzorih (Douglas, 1999).



Slika 14: Trendi rabe grajenih vlak (levo) in kamionskega prevoza lesa (desno)

Figure 14: Trends in constructed skid trail utilisation (left) and truck transportation of timber (right)

Naraščajoče potrebe po lesu v Evropi in vse boljša mobilnost dobrin in storitev bodo na področju gozdarstva povečevale daljinski transport okroglega lesa in lesa za energijo. Glavni izzivi logistike so v smeri povečevanja ekonomičnosti in varnosti transportnih storitev. Varnost je višja pri večjih kamionih (Vierth in sod., 2008), enako velja za gospodarnost prevozov (Lumsden, 2004).

Skandinavci že danes na svojih cestah dovoljujejo skupne mase vozil do 50 t (slika 14 desno), razmišljajo pa tudi o dovoljenih masah gozdarskih transportnih kompozicij (t. i.

avtovlakov) do 90 t (Lindhqvist in Bengtsson, 2010) pri enakih osnih obremenitvah. V pripravi je evropska direktiva za povečanje največje dovoljene skupne mase kamionov.

V Sloveniji v kratkem ne pričakujemo drastičnih sprememb pri prevozu lesa s kamioni (Petkovšek, 2010). Z določenim zamikom je tudi v slovenskih gozdovih pričakovati kamione večjih dimenzij. Še naprej bo naraščal promet z osebnimi vozili po gozdnih cestah (Hribernik, 2013). Zaradi staranja omrežja in neugodnega trenda vlaganj v vzdrževanje gozdnih cest (Poročilo Zavoda za gozdove Slovenije o gozdovih za leto 2012, 2013) je pričakovati nadaljnje slabšanje VK grajenih gozdnih prometnic.

3.2.4.2 Trendi graditve in vzdrževanja

Construction and maintenance trends

V Sloveniji je v pripravi nov zakon o gozdovih, ki naj bi temeljito spremenil organiziranost gozdarstva. Njegov vpliv na kategorizacijo gozdnih prometnic ter nove sisteme njihove graditve in vzdrževanja je težko napovedati. Veljavni območni gozdnogospodarski načrti so zelo smeli (Poljanec 2011), vendar strokovne podlage za načrtovanje prednostnih tras ne vključujejo geološke podlage ali nosilnost tal (Krč in Beguš 2013).

V tujini se povečuje ozaveščenost javnosti za negativne vplive gozdnih prometnic (Gucinski in sod. 2001). Proces graditve postaja socialno vse bolj kompleksen (Killer in sod. 2003). Posledica je manj novogradenj in več vzdrževanja ter rekonstrukcij (Swift in Burns 1999).

Trende graditve gozdnih prometnic na Hrvaškem v prihodnosti zaznamuje problematika povečevanja gostote cest zlasti na kraškem terenu (Hodić in Jurušić, 2011), kjer pa v kontekstu meril za projektiranje in izbor prioriteten tras ni govora o nosilnosti voziščnih konstrukcij. Podobno je tudi drugod po svetu, saj je večina sedanjih raziskav usmerjena v iskanje optimalne gostote prometnic za dane tehnologije spravila lesa (Ghaffarian in Stampfer 2010, Pellegrini in sod. 2013). Problematika kakovosti voziščnih konstrukcij bo še naprej potisnjena v ozadje oziroma v okvir racionalizacije stroškov gradbenih del.

Na področju tehnologij gradnje in materialov, ki jih uporabljamo pri gradnji in vzdrževanju gozdnih prometnic ni pričakovati večjih tehnoloških novosti, povečeval pa se bo delež uporabe lokalnih materialov (slika 15). V tujini je tudi na gozdnih prometnicah pričakovati naraščanje uporabe nekontaminiranih gradbenih odpadkov in alternativnih veziv (Bohm in Stampfer 2014). V Sloveniji ni pričakovati bistvenih premikov v sistemu periodičnega vzdrževanja in obnove gozdnih cest (Beguš 2014). Ugotavljanje nosilnosti vozišč pri gospodarjenju z omrežjem obstoječih gozdnih prometnic ni uveljavljeno.



Slika 15: Miniranje pri gradnji na težkih terenih (levo) in »in-situ« drobljenje lokalne kamnine (desno) kot glavna vira materiala nosilnih plasti gozdnih cest v prihodnje

Figure 15: Blasting in road construction on difficult terrains (left) and »in-situ« crushing of the local stones as a main source of aggregates for base layers of forest roads in the future

3.3 DOLOČANJE NOSILNOSTI CEST V GRADBENIŠTVU ROAD BEARING CAPACITY DETERMINATION IN CIVIL ENGINEERING

3.3.1 Opredelitev nosilnosti ceste Road bearing capacity definition

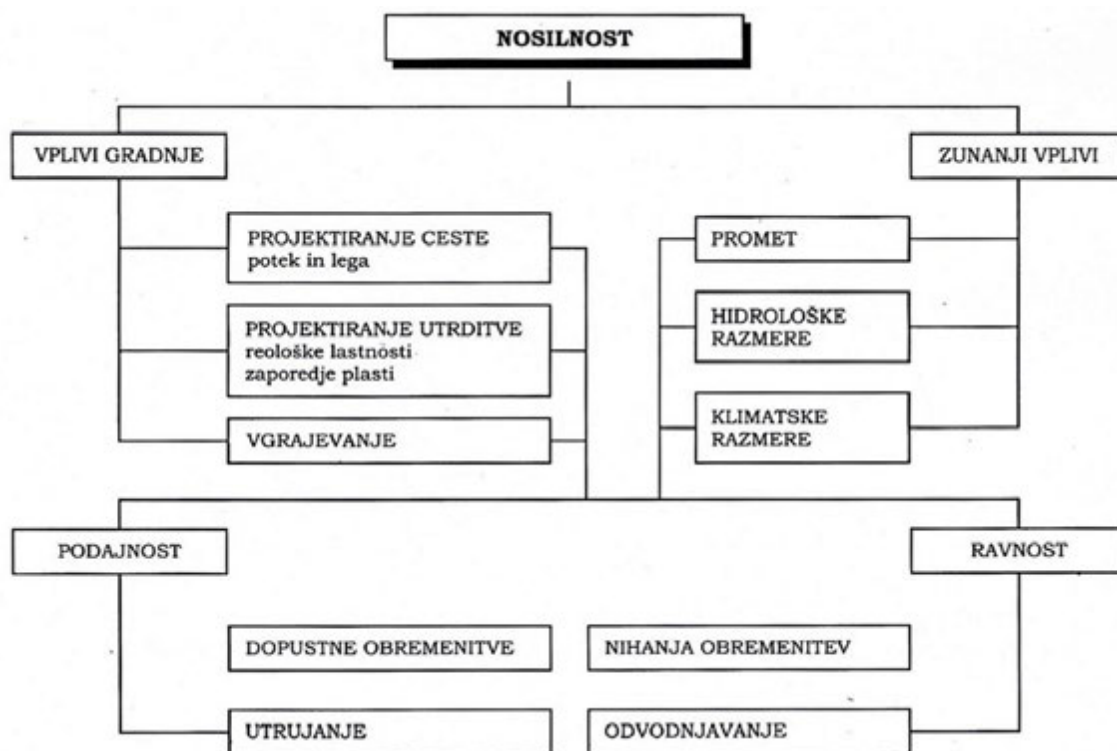
Objekte moramo projektirati, graditi in vzdrževati tako, da je v vsej njihovi življenjski dobi zagotovljena mehanska stabilnost in odpornost (Pravilnik o mehanski odpornosti... 2005), pri čemer morajo biti deformacije objekta manjše od dopustnih. Dopustne deformacije zaradi prometnih obremenitev na cestah izražamo s podajnostjo, ki predstavlja posedek površine pod določeno obremenitvijo kot merilo razpoložljive nosilnosti konstrukcije v času meritve ter je sestavljen iz elastične in plastične komponente (TSC 06.630 : 2002).

Slovar slovenskega knjižnega jezika (2014) opredeljuje nosilnost kot lastnost vozila/naprave glede na največjo dovoljeno mogočo težo/obremenitev. V gradbeništvu razlikujemo nosilnost konstrukcije in nosilnost podlage. Vsaka ima svoje zakonitosti določanja. Tudi v cestnem inženirstvu pojem nosilnosti ni nedvoumno opredeljen (Žmavc, 2007). Pomeni lahko odpornost proti preoblikovanju, obremenitev, ki privede do porušitve ali pa sposobnost raznosa obremenitve znotraj voziščne konstrukcije.

V tej raziskavi bomo pod nosilnostjo zmesi zrn razumeli mehansko odpornost/togost planuma vgrajene plasti proti kratkotrajni obremenitvi (TSC 06.630 : 2002), v primeru nosilnosti tal pa obtežbo, ki privede temeljna tla pred porušitev (Terzaghi in sod., 1996).

Razlago napetostno-deformacijskih zvez v zmesih zrn in v tleh je za homogen, izotropen in elastičen polprostor pod središčem krožne obremenilne plošče postavil Boussinesq že leta 1885. V novjšem času prevladuje prepričanje o nelinearni mehanski naravi zmesi zrn (Dawson in sod., 2007; Plaistow in Dawson, 1995), s katero bolje pojasnimo napetosti in deformacije v večplastnih voziščnih konstrukcijah.

Odnose med nosilnostjo in podajnostjo vozišča prikazuje slika 16. Za našo raziskavo je najpomembnejše spoznanje, da lahko s pomočjo opazovanja elastičnih posedkov vozišča pod standardno obremenitvijo posredno sklepamo na skupno odpornost/togost podlage in vseh plasti voziščne konstrukcije proti dolgotrajnim obremenitvam vozil v okviru dopustnih obremenitev. Povedano še bolj preprosto: nosilnost je dopustna obremenitev, ki jo voziščna konstrukcija dolgotrajno prenese.



Slika 16: Razčlenitev vplivov na nosilnost voznih površin (Žmavc, 2007: 327)

Figure 16: Structure of the impacts on carriageway bearing capacity (Žmavc, 2007: 327)

3.3.2 Postopki in oprema za točkovno terensko ugotavljanje nosilnosti cest

Procedures and equipment for spot field determination of road bearing capacity

Metode določanja nosilnosti ločimo na tiste za meritve nosilnosti podlage in vgrajenih plasti nevezanih zmesi zrn med gradnjo ter na tiste za zgrajena vozišča, s praviloma vezanimi materiali. Prve so običajno točkovne, druge največkrat kontinuirane. Merilni postopki in oprema za določanje točkovnih vrednosti nosilnosti so enostavnejši, zato pa nič manj zanimivi za gradbeno prakso. Ker je praktično vse mogoče uporabiti tudi na že zgrajenih gramoznih cestah, jih bomo podrobneje predstavili v nadaljevanju.

3.3.2.1 Postopek CBR

CBR Procedure

Postopek CBR (angl. *California Bearing Ratio*) je zasnovan za preizkuse nosilnosti nevezanih materialov v laboratoriju in za meritve na terenu. Vrednost CBR je značilna vrednost deformabilnosti materiala pri posedanju pritisknega bata, določena na osnovi obremenitve, ki povzroči vnaprej določen posedek. Temelji na primerjavi obremenitve za normirano vtisnjenje bata v preiskovani material in obremenitve za normirano vtisnjenje bata v standardni material (TSC 06.720 : 2003). Količnik CBR, izražen z odstotki, je najstarejši kazalnik nosilnosti temeljnih tal, na katerih nameravamo zgraditi cestno telo. Značilne vrednosti CBR za nekaj tipičnih vrst temeljnih tal v gozdarstvu so:

- vezljiva zemljina (CL¹⁵, ML): 5 %
- zaglinjeni grušč (GC, GM): 10 %
- kamniti nasip (GW, GP): 15 %

Test CBR izvajamo na vzorcih materiala iz sloja, v katerem bo pripravljen planum temeljnih tal. Poteka na valjastem vzorcu intaktne ali zgoščene zemljine, vgrajene v valjast kalup premera 152 mm in višine 127 mm. Površino preizkušanca zravnamo in nanj centrično postavimo bat premera 49,65 mm. S konstantno hitrostjo 1 mm/min. vtiskujemo bat v vzorec in merimo za to potrebno silo na vsakih 0,25 mm penetracije. Preizkus končamo pri penetraciji 7,5 mm, rezultate pa vrišemo v diagram sila-ugrezek. Običajno izračunamo CBR pri penetraciji 2,5 mm in 5,0 mm ter kot CBR-vrednost objavimo večjo od obeh.

Laboratorijska različica CBR-testa zahteva relativno veliko priprav in zahtevno laboratorijsko opremo. Terenska različica testa je enostavnejša, a zahteva masivno vozilo (kamion za zagotovitev opore obremenitvi), ki pa ga na temeljna tla gozdne ceste praviloma

¹⁵ Klasifikacija po USCS.

ne moremo spraviti. Rezultate meritev CBR je težko povezati z mehanskimi značilnostmi materiala, a obstoja določena korelacija med Youngovim modulom elastičnosti E in vrednostjo CBR. Postopek je standardiziran, splošno priznan in še vedno v uporabi.

3.3.2.2 Postopka s krožno obremenilno ploščo in statičnim obremenjevanjem

Procedures with circular loading plate and static loading

Postopki s krožno obremenilno ploščo in statičnim obremenjevanjem so namenjeni za terenske meritve nosilnosti tako temeljnih tal kot tudi nevezanih in vezanih plasti voziščnih konstrukcij. Pri postopkih s krožno obremenilno ploščo gre za določanje posedkov površine in deformacijskih modulov pod standardno obremenitvijo. Statični deformacijski modul je značilna vrednost za deformabilnost materiala pri postopnem večkratnem obremenjevanju krožne plošče, določena na osnovi nagiba sekante krivulje posedanja v določenem območju prve, druge ali tretje obremenitve. Obstajata dva različici postopka in trije moduli:

- švicarski postopek, pri katerem določamo modul stisljivosti ME ,
- nemški postopek, pri katerem določamo dva deformacijska modula: E_{v1} in E_{v2} .

Postopka sta uveljavljena na področju graditve javnih cest v Evropi, v Sloveniji pa predpisana s tehnično specifikacijo za javne ceste za meritve in preiskave deformacijskih modulov vgrajenih materialov (TSC 06.720 : 2003).

Za oba postopka se uporablja ista oprema. Krožno obremenilno ploščo premera 300 mm, postavljeno na ustrezno pripravljeno podlago, pod določenimi pogoji postopoma obremenjujemo. S preciznimi merilnimi uricami po vsaki obremenitvi odčitamo posedek, rezultate posedanja za posamezne stopnje pa vnesemo v ustrezen diagram. Praviloma je treba vsak material obremeniti s sedmimi obremenitvami. Za merodajno območje izvedenosti upoštevamo območje enakomernega posedanja. Za določitev nosilnosti sta bolj merodajna vrednost deformacijskega modula E_{v2} in razmerje E_{v2}/E_{v1} .

Tako kot je CBR svetovni standard za določanje nosilnosti temeljnih tal, sta bila postopka s krožno obremenilno ploščo in statičnim obremenjevanjem še do nedavnega glavno terensko orodje za preverjanje nosilnosti vgrajenih plasti nevezanih zmesi zrn v voziščne konstrukcije cest. V zadnjem času CBR in statične deformacijske module nadomešča dinamični deformacijski modul, ki se ga določa s postopkom z dinamično obremenilno ploščo.

3.3.2.3 Postopek z dinamično obremenilno ploščo

Procedure with the dynamic loading plate

Za preverjanje grobozrnatih materialov so se v zadnjem času uveljavili postopki z dinamično obremenilno ploščo. Obstaja vrsta izvedenk naprav (slika 17) glede na velikost plošče, vrsto merilnika posedka in velikost obremenitve. Pri vseh gre za princip obremenitve podlage s standardno kratkotrajno obremenitvijo, ki povzroči elastični posedek podlage pod ploščo, iz katerega z uporabo Boussineqovih pogojev in normalne napetosti pod ploščo izračunamo dinamični deformacijski modul. Vsaka naprava ima svoj modul, zveze med njimi na splošno niso znane, če pa so, veljajo samo za določene materiale.

V Sloveniji je zaenkrat najbolj uveljavljena dinamična obremenilna plošča z utežjo 10 kg, s premerom plošče 300 mm in z merilnikom pospeška (Zorn, 1996). V primeru take konfiguracije dinamične obremenilne plošče se dinamični deformacijski modul (E_{vd}) za posamezno meritev nosilnosti izračuna kot povprečje treh posedkov zaporednih obremenitev po enačbi 3 (izpeljano po TSC 06.720 : 2003).

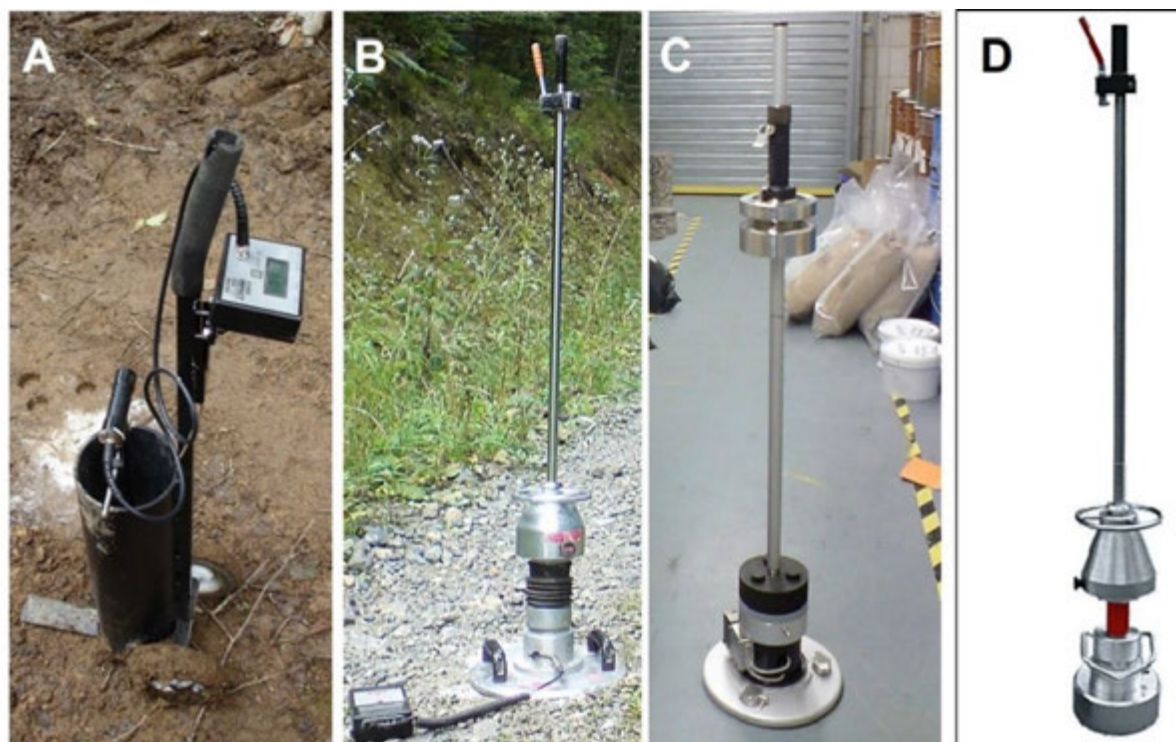
$$E_{vd} = \frac{22,5 * 3}{\left(\sum_{i=1}^3 s_i \right)} \quad \dots (3)$$

S_i posedek krožne obremenilne plošče (mm) pod kratkotrajno obremenitvijo/deflection of the loading plate (mm) under short-term loading

E_{vd} dinamični deformacijski modul (MN/m²)/dynamic deforming module (MN/m²)

V devetdesetih letih prejšnjega stoletja so testiranja uporabnosti E_{vd} v slovenski gradbeni operativi pokazala, da je dinamična obremenilna plošča v zelo tesnih korelacijskih zvezah s statičnimi deformacijskimi moduli in z vrednostmi CBR za drobljence in prodce, ne pa tudi za fliške in drobozrnate zemljine (Žmavc, 1994). Zveze med bolj uveljavljenimi deformacijskim moduli pri nas podajamo v prilogi D, za ostale pa v virih (Al-Almudi in sod., 2002; Siekmeier in sod., 2009).

Od pojava prve dinamične plošče (Henneveld, 1995; Pidwerbesky, 1997; Rogers in sod., 1995), so te deležne velikega zanimanja tako gradbene operative, kot tudi znanstvene srenje. Raziskovanje lastnosti dinamične obremenilne plošče je še danes v središču zanimanja graditeljev cest (Mork, 2008; Thom in Fleming, 2002). Ocenjujemo, da bodo dinamične obremenilne plošče še dolgo predstavljale eno od osnovnih orodij za praktično obvladovanje problemov nosilnosti pri gradnji cest.



Slika 17: Različne naprave za merjenje togosti vozišč: A-Cleigg Hammer (Avstralija), B-Zorn ZFG02 (Nemčija), C-Dynatest 3301 (V. Britanija; Dynatest 3031 LWD, 2006), D-B&C (Madžarska; Tompai, 2008: 103)

Figure 17: Various devices for pavement stiffness measurement: A-Cleigg Hammer (Australia), B-Zorn ZFG02 (Germany), C-Dynatest 3301 (G. Britain; Dynatest 3031 LWD, 2006), D-B&C (Hungary; Tompai, 2008: 103)

3.3.3 Ostali postopki določanja nosilnosti vozišč v gradbeništvu

Other procedures for carriageway bearing capacity in civil engineering

Poleg predstavljenih postopkov za posredno točkovno določanje nosilnosti vozišč se v povezavi z nosilnostjo pogosto omenja in uporablja tudi dinamični konični penetrometer (DCP). DCP je bil razvit za hitro terensko oceno trdnosti temeljnih tal (Scala, 1956 cit. po Hobi in sod., 2010), ki pa v bistvu meri mehansko odpornost tal proti prodiranju (Herrick in Jones, 2002; Vanags in sod., 2004). DCP je ceneni nadomestek za drage mehansko krmiljene penetrometre, ki pa je po rezultatih z njimi primerljiv za zemljine (Minansy, 2012).

V zadnjem času se DCP vse bolj pogosto pojavlja kot nadomestek za CBR (Zohrabi in Scott, 2003) pa tudi za hitro oceno zgoščenosti podlage. Standardna oprema za neporušne meritve zgoščenosti na terenu je izotopski merilnik, s katerim sočasno določamo gostoto in vlažnost zmesi zrn (TSC 06.711 : 2001). Za točkovno določanje gostote je na voljo več preprostih, a

standardiziranih postopkov (TSC 06.712 : 2002). Ti se v praksi vse manj uporabljajo, saj imajo sodobni valjarji vgrajeno opremo za kontinuirano določanje zgoščenosti (TSC 06.713 : 2005).

DCP v cestogradbeni operativi v Sloveniji ni neznan, vendar zanj ni tehnične specifikacije. Penetracijske odpornosti in zgoščenosti ne gre enačiti z nosilnostjo (Siekmeier in sod., 2009). Imamo namreč lahko optimalno zgoščen material na nenosilni podlagi in meritve nosilnosti vozišča na takih plasteh pokažejo nizke vrednosti.

Na zgrajenih asfaltnih voziščih se uporabljajo statične in dinamične meritve nosilnosti. Temeljijo na podajnosti, ki je v obratnem sorazmerju z nosilnostjo. Za statično ugotavljanje podajnosti se uporablja Benkelmanova gred ali pa deflektograf, dinamično podajnost pa merijo udarni deflektometri. Postopki so standardizirani (TSC 06.630 : 2002). Čeprav ne pridejo v poštev za uporabo v gozdarstvu, jih zaradi popolnosti pregleda postopkov navajamo na tem mestu.

3.4 PROUČEVANJE NOSILNOSTI PROMETNIC V GOZDARSTVU THOROUGHFARE BEARING CAPACITY STUDIES IN FORESTRY

3.4.1 **Zgodovina raziskav nosilnosti v gozdarstvu** **History of bearing capacity research in forestry**

Raziskovanje nosilnosti v gozdarstvu ni nikoli potekalo samo zaradi sebe, ampak vselej zaradi povsem določenih razlogov in okoliščin. Razlogi so se s časom spreminjali, s tem pa tudi uporabljene metode. Historičnih virov na tem področju je veliko. S kratkim kronološkim pregledom zgodovine raziskav na področju ugotavljanja nosilnosti želimo osvetliti prihodnje potrebe na tem področju.

Gradnja gozdne infrastrukture je v Evropi potekala od konca druge svetovne vojne, bolj intenzivno pa od začetka šestdesetih let dalje. Najprej so se gradile ceste, ki so se navezovala na takrat še redko omrežje lokalnih javnih cest. Gozdarski inženirji so se pri gradnji takrat zelo naslanjali na gradbenike, zato je bil prenos znanj iz gradbeništva v gozdarstvo zelo hiter in učinkovit.

V gradnjo javnih cest, ki je bila tradicionalno izkustvena panoga, so v tistem času intenzivno uvajali metode kontrole kakovosti izvedenih del, predvsem pa različne tehnike stabilizacije zemljin in nevezanih zmesi zrn za podlago asfaltnim voziščem. Pri tem so razvili različne tehnike laboratorijskih in terenskih postopkov. Izhajali so iz CBR-testa, ki je bil razvit pred

drugo svetovno vojno. Leta 1953 so razvili Benkelmanovo gredo za merjenje posedkov asfaltne vozišča, kasneje pa še postopke za statične obremenilne plošče.

Začetno obdobje odpiranja gozdov s cestami je bil prvi impulz, ki je pripeljal metode ugotavljanja nosilnosti temeljnih tal in vozišč gramoznih cest v gozdarstvo. Leta 1976 je na tečaju za graditelje gozdnih cest FAO Eisbacher (1976) podal opise postopkov za meritve nosilnosti plasti v voziščnih konstrukcijah gozdnih cest s statično obremenilno ploščo in Benkelmanovo gredo. Že leto prej sta Kobayashi in Fukuda (1975) izmerila vrednosti CBR in nosilnost s statično ploščo za vozišča zgrajenih glavnih in stranskih gozdnih cest. Benkelmanova greda, statična plošča in CBR so bili v tistem času najbolj v uporabi v Švici, kjer so metode predavali študentom gozdarstva (Kuonen, 1983) in tiskali tehnična navodila za njihovo uporabo v praksi (Merkblatt Nr.312. Deflektionsmessungen mit dem Benkelman-Balken, 1985).

Drugo obdobje ugotavljanja mehanskih lastnosti gozdnih tal je čas intenzivnega mehaniziranja spravila lesa s traktorji in zgibnimi prikoličarji v Evropi v osemdesetih letih. Glavni problem takrat je bil zagotavljanje gibanja gozdarske mehanizacije po slabo nosilnih tleh. Med metodami se je uveljavila ameriška polempirična metoda WES, ki temelji na uporabi koničnega penetrometra za oceno trdnosti tal (Knight in Rula, 1961 cit. po Saari lahti, 2002: 9). V začetku devetdesetih let je Horvat (1993) v okviru proučevanja prevoznosti mehanizacije za spravilo lesa po terenu s preizkusi ugotovil podobnosti med koničnim penetrometrom in penetrometrom s ploščami različnih velikosti. Prav tako je testiral uporabo krilne sonde za določanje strižne trdnosti gozdnih tal. Nadaljuje se uporaba Benkelmanove grede za meritve posedkov vozišč gozdnih cest, zgrajenih na malonosilnih podlagah (O'Mahony in sod., 2000).

Vsesplošna uporaba traktorjev pri spravilu lesa in uvajanje strojne sečnje sta sredi devetdesetih odprla vprašanje dopustnih poškodb naravnih gozdnih tal (Robek, 1994; Wästerlund, 1992) in tretji val proučevanja mehanskih lastnosti tal v gozdarstvu. Prihajalo je do mešanja kazalnikov nosilnosti in trdnosti tal. V raziskovalnem prostoru nekdanje Jugoslavije se je proučevanje mehanskih lastnosti tal preselilo iz gozdnega gradbeništva na področje pridobivanja lesa. Uveljavljeni kazalniki vodno-zračnih lastnosti tal so postali indikatorji tehnološkega stresa (Poršinsky in sod., 2006; Šušnjar in sod., 2006). Za merilo zbitosti so se razvijali novi postopki (Horvat, 1996; Matthies, 1997), vse pogostejše pa se kot hiter indikator jakosti poškodb tal obravnava globina kolesnic (Intihar, 2014; Košir, 2010; Mali in Košir, 2007; Mihelič, 2013; Poršinsky in Horvat, 2005).

Kratek pregled proučevanja mehanskih lastnosti tal in gozdnih prometnic kaže, da imamo v gozdarski stroki polstoletno tradicijo proučevanja različnih vidikov nosilnosti. Pri tem si zelo prizadevamo za jasne in enostavno merljive kazalce, kot je na primer globina kolesnic. Tudi na področju grajenih prometnic je globina kolesnic zelo atraktiven kazalnik za ocenjevanje nosilnosti vozišč v luči presoje stanja grajenih gozdnih prometnic. Vprašanje je, ali bo stanje grajenih prometnic naslednji impulz za renesanso in nadgradnjo proučevanja nosilnosti v gozdarstvu. Menimo, da ne. V to smer kažejo tudi novejša objave na področju upravljanja z omrežjem cest, ki problematiki nosilnosti in celo kolesnic ne namenjajo pomembnejšega mesta (Pellegrini in sod., 2013). Večji problem so stroški graditve. Ena od pomembnih možnosti za prihranke je zagotavljanje potrebne nosilnosti vozišč na neutrjenih cestah.

3.4.2 Ugotavljanje nosilnosti vozišč v gozdarstvu

Carriageway bearing capacity determination in forestry

Nosilnost vozišča je kazalnik kakovosti voziščne konstrukcije, s tem pa neposredno tudi eden izmed ključnih kazalnikov funkcionalnosti vsake prihodnje ali obstoječe grajene prometnice. Ugotavljanje nosilnosti vozišč grajenih gozdnih prometnic danes poteka v treh primerih:

- kadar se ugotavlja nosilnost temeljnih tal, nasipov in plasti voziščnih konstrukcij pri gradnji novih ter rekonstrukcijah in obnovah starih cest;
- kadar se ocenjuje nosilnost vozišč omrežja obstoječih gozdnih cest za potrebe usmerjanja in razvrščanja vzdrževalnih prioritet;
- kadar se preiskuje lastnosti novih materialov in zvez med nosilnostjo in lažje določljivimi znaki stanja vozišč.

Opremljenost izvajalcev del z opremo in znanjem za ugotavljanje nosilnosti pri gradnji gozdnih cest v tujini nam ni poznana. V Sloveniji izvajalci del ne uporabljajo nobene opreme. Odločitve za izboljšanje ali odstranitev nenosilnih temeljnih tal sprejemajo na osnovi izkušenj in vizualne ocene terena. Pri presoji nosilnosti materialov, vgrajenih v nosilne sloje, si pomagajo z oceno obnašanja materiala pri valjanju. Materiali s preveč drobnih delcev in prevelikim deležem vlage postanejo »gumijasti«, zgoščevanje pa nesmiselno. Vse več je izvajalcev del, ki pretežno delajo izven gozdarstva. Ti so v zadnjem času opremljeni z valjarji z vgrajenim sistemom za kontinuirano kontrolo zgoščenosti (Jurjavčič in Cotič, 2008). Če sta podlaga in vgrajevani material okvirno ustrezna, je stopnja zgoščenosti dobra ocena bodoče nosilnosti. Največje potrebe za oceno nosilnosti se pri gradnji cest kažejo v hitri in zanesljivi oceni nosilnosti planuma spodnjega ustroja. Kevin in sodelavci (2009) so pri primerjavi uporabnosti dinamične obremenilne plošče z laboratorijskim CBR ugotovili, da je na peščeno meljastih tleh plošča pojasnila 60 %

variabilnosti laboratorijskega CBR, pri meljasto glinastih tleh pa zveze niso bile statistično značilne. Hobi in sodelavci (2010) so potrdili praktično uporabnost dinamičnega koničnega penetrometra za terensko oceno CBR.

Za gozdarsko prakso so na nivoju omrežij prometnic pogosteje uporabljene metode ocenjevanja stanja vozniških površin. Metodiko vizualnega ocenjevanja vozne površine gozdne ceste je pri nas preizkušal Potočnik (1993), pri tem pa razlikoval poškodbe spodnjega in zgornjega ustroja. Po njegovi metodologiji je bilo opravljenih več inventur stanja vozišč gozdnih cest v Sloveniji (Guček, 2006; Tomazin, 2008), ki so podobno kot Potočnik ugotovili, da je najpogostejša poškodba erozija vozišča, pojav kolesnic je manj pogost.

Glavni vzrok slabega stanja vozišč so neizdelani ali napačno izdelani jarki in koritnice. Po podatkih ZGS je za zadnjih pet let največji strošek tekočega vzdrževanja gramoziranje (Poročilo Zavoda za gozdove Slovenije o gozdovih za leto 2012, 2013). Kosztka (1998) je za razmere gozdnih cest na Madžarskem konec prejšnjega stoletja predlagal sistem upravljanja na podlagi ocene stanja nosilnosti, izražene s CBR.

Novejše raziskave nosilnosti vozišč gozdnih cest imajo v zadnjem času dve smeri. Prve uporabljajo podatke o nosilnosti za napovedovanje pojava kolesnic in posledično dinamike periodičnega vzdrževanja (Dawson, 2008b; Dawson in Killer, 2009; Dawson in sod., 2008). Druge (Bohrn in Stampfer, 2014; Curtis, 2008; Legere in Mercier, 2004) gredo v smeri testiranja novih materialov in tehnik izboljšanja nosilnosti gozdnih cest. Obseg raziskav na področju gozdnega gradbeništva in posebej na področju nosilnosti je v tesni zvezi z obsegom gradenj na tem področju in ni v korelaciji z obsegom obstoječega omrežja.

3.4.3 Vplivi zunanjih dejavnikov na nosilnost vozišč v gozdarstvu

Influence of the external factors on carriageway bearing capacity in forestry

3.4.3.1 Prometna obremenitev

Traffic loading

Predmet našega proučevanja vplivov prometne obremenitve na nosilnost bodo ceste v Sloveniji, zato so nas najbolj zanimala razmere na tem področju pri nas. Področje zakonsko ureja Pravilnik o merah in masah vozil v cestnem prometu (2006), ki določa, da smejo po vseh cestah v Sloveniji voziti vozila, katerih največja dovoljena skupna masa vozila in tovora ne presega 40 ton in največja osna obremenitev ne presega 10 ton.

Pri dimenzioniranju novih asfaltnih voziščnih konstrukcij (TSC 06.520 : 2003) in dimenzioniranju ojačitev obstoječih asfaltnih voziščnih konstrukcij (TSC 06.541 : 2003) je za določitev merodajne prometne obremenitve in razvrstitev prometne obremenitve treba upoštevati tehnično specifikacijo za javne ceste št. TSC 06.511 (2009). Ta določa, da se prometna obremenitev za dimenzionirana vozišča izračuna kot število vozil ali kot število nazivnih osnih obremenitev (NOO, 100 kN) v projektirani dobi trajanja ceste. Za izračun se uporabi PLDP, ki predstavlja povprečno dnevno število motornih vozil, ki v enem letu prečkajo merodajni profil. Ker gre za zelo različna vozila z bistveno drugačnim vplivom na vozišče, je za vsako vozilo treba upoštevati ekvivalentne osne obremenitve posameznih osi in iz konfiguracije osi izračunati ekvivalentne obremenitve vozila.

Praktično postopek poteka tako, da iz podatkov štetja prometa na cesti, na katero bo gravitirala nova cesta, vzamemo podatke o strukturi vozil po standardnih skupinah, upoštevamo ekvivalentne prometne obremenitve tipičnih vozil za standardne skupine in izračunamo nominalno dnevno obremenitev. Korigiramo jo za dodatne vplive števila prometnih pasov, širine pasov, vzdolžnega naklona nivelete ter predvidene dinamične vplive na novi cesti. Določimo dobo trajanja ceste in merodajno povečanje prometa v dobi tajanja ceste ter izračunamo merodajno prometno obremenitev, nato pa cesto razvrstimo v skupino prometne obremenitve.

V gozdarstvu prometno obremenitev določamo precej drugače, predvsem pa zelo redko. Za dimenzioniranje vozišč gozdnih cest ne upoštevamo gornjih navodil, prometno obremenitev pa privzamemo glede na predvideno kategorijo ceste (Pravilnik o gozdnih prometnicah, 2009). Tudi raziskav o prometni obremenitvi gozdnih cest je bilo v Sloveniji do sedaj le nekaj. Dobro (1993) je prometno obremenitev gozdnih cest zaradi gospodarjenja z gozdom ugotovil s pomočjo ankete za štiri različne gozdnogospodarske enote ter na osnovi ocene razmer v gozdnogospodarski enoti Kamniška Bistrica (1658 ha večnamenskih gozdov). Za slednjo je na merodajnem profilu na robu proučevanega območja izračunal povprečno 621 vozil letno oziroma PLDP 1,7. Od tega naj bi bilo 34 % kamionov, ostalo pa osebna vozila in kombiji. Na osnovi ankete je za donosnost gozda v višini 4 m³/ha/leto ocenil letno transportno količino na 12–14 t/ha gozda, pri tem pa ni jasno, ali ta vključuje tudi mase vozil.

Potočnik (1996a) je za gozdno gospodarsko enoto Kamniška Bistrica proučeval strukturo prometne obremenitve glede na delovne dneve, vreme in namen prometa. Na osnovi 24 celodnevni šteti prometa je ugotovil značilno razliko v prometni obremenitvi za negozdarski namen glede na dneve med tednom in med vikendom. V delovnih dnevih je ugotovil povprečno 16 vseh vozil na dan, med vikendi pa povprečno 56 vozil na dan. Od 16 vozil na dan (med tednom) je bilo 3,1 vozila za potrebe gospodarjenja z gozdom.

Pri analizah prometne obremenitve gozdnih cest v gozdarstvu prevladuje »gravitacijski koncept«. Predpostavlja se, da ima vsako območje samo eno izvozno cesto, na katero se »zlije« ves transport iz zaledja. Ta model je relativno pogost za alpske doline, medtem ko v dinaridih, zasavskem hribovju, na Pohorju in v Pomurju ne drži.

Potočnik in sodelavci (2005a) so analizirali prometno obremenitev zaradi odvoza lesa iz zaledja 440 ha zasebnih gozdov, ki gravitira na gozdno cesto Tančegorski ovinek–Razvaje. Ugotovili so 250 vozil letno in transportno količino 3500 ton. Ob upoštevanju 180 izkoriščenih delovnih dni na leto to pomeni 19 t/dan, kar je manj kot en kamion na dan.

Ugotovljene prometne obremenitve so neprimerljive z razmerami na regionalnih cestah in kot take ne upravičujejo večjih vlaganj v voziščno konstrukcijo. Za tujino nimamo podatkov o prometnih obremenitvah. Posamezne študije spremljanja prometa (Brito in Dawson, 2008) nakazujejo, da vpliv težkih kamionov na gozdne ceste ni tako nedolžen. Kolesnice se pojavljajo pogostejše in so globlje, kot jih lahko danes napovemo. Dawson (2008b) meni, da je za gramozne in maloprometne ceste zakon 4. potence za izračun ekvivalentne prometne obremenitve vozila neustrezen oziroma preblag. To so potrdili usmerjeni poskusi meritev stopnjevanja kolesnic gramoznih vozišč s prometno obremenitvijo. Pri tem se je kot pomemben vplivni dejavnik pojavil tudi tlak v pnevmatikah kamionov (Dawson in sod., 2008). Za gramozna vozišča ostajajo pomembni vplivni dejavniki tudi hitrost vožnje in lastnosti gramozja, najpogostejše poškodbe pa udarne jame, rebra in kolesnice (Huntington in Ksaibati, 2007; Legere in Mercier, 2004).

3.4.3.2 Klimatski pogoji

Climatic conditions

Klimatske razmere, relevantne za ceste, opredeljuje tehnična specifikacija št. TSC 06.512 (TSC 06.512 : 2003) predvsem z globino zmrzovanja in indeksom mraza, ki je vsota srednjih (negativnih) dnevnih temperatur zraka od začetka do konca obdobja zmrzovanja ter označuje trajanje in intenzivnost mraza na določenem kraju. Karta informativnih globin prodiranja mraza na področju Republike Slovenije je obvezna podlaga za projektiranje javnih cest. V osrednjeslovenski regiji velja, da je merodajna globina prodiranja mraza 90 cm, teh vrednosti pa že več let nismo dosegli.

Zgodovina raziskav vpliva negativnih temperatur na stanje in delovanje voziščnih konstrukcij je zelo dolga in še vedno tako aktualna, da se prevajajo in ponatiskujejo dela z začetka prejšnjega stoletja (Black in sod., 1991). Pojav, ki spremlja zmrzovanje vode v voziščni konstrukciji, se imenuje zmrzliniski dvig in je posledica rasti ledenih kristalov v

nevezanih zmesih zrn na območjih s prevelikim deležem zrn velikosti do 0,02 mm, ki omogočajo kapilarni dvig vode iz temeljnih tal v voziščno konstrukcijo ali posteljico. Posledica je nabrekanje ceste, v času spomladanske odjuge pa dolgotrajnejše zadrževanje vode v teh slojih ceste ter posledično zmanjšana nosilnost vozišča. To zmanjšanje je še bolj izrazito ob prvih obremenitvah z vozili, saj pride so sesedanja votlin, ki so nastale ob rasti ledenih kristalov.

Ker večino gozdnih cest ne plužimo in se pretežno nahajajo na višjih nadmorskih višinah z debelejšo povprečno snežno odejo, je količina vode v voziščni konstrukciji ob neustreznem granulometrijski sestavi lahko dolgotrajen problem, ki ga dodatno zaostruje neustrezno odvodnjavanje ceste.

3.4.3.3 Hidrološki pogoji

Hydrologic conditions

Voda zmanjšuje nosilnost nevezanih plasti cest (Charlier in sod., 2009) in je v vseh oblikah nevšečna sestavina voziščne konstrukcije (Petkovšek, 2013). To še posebej drži, če je celotno cestno telo zgrajeno iz nevezanih zmesi zrn, in še toliko bolj, če v vgrajenih materialih prevladujejo drobne frakcije. Voda bistveno vpliva na trajnost ceste (Bebar in Trotošek, 2010), zato je naloga projektanta, izvajalca del in upravljavca ceste, da poskrbi za trajno, hitro in razpršeno odvajanje vode iz cestnega telesa.

Problematika vode v cestni zgradbi je bila v zadnjih letih predmet intenzivnih raziskav v sklopu programa COST. Glavni rezultat teh raziskav je monografija »*Water in road structures – movement, drainage and effects*« (Dawson, 2008a), ki je dostopna tudi na spletu na naslovu: <http://roadsforwater.org/wp-content/uploads/2013/10/Andrew-Dawson-Water-in-Road-Structures-Movement-Drainage-Effects-2008.pdf>. V monografiji so obravnavani vsi bistveni vidiki, ki jih je treba upoštevati pri načrtovanju raziskav, pri katerih je voda v cestnem telesu vplivni dejavnik, in jih zato na tem mestu ne bomo ponavljali.

3.4.4 Vplivi graditve na nosilnost vozišč v gozdarstvu

Engineering influences on pavement bearing capacity in forestry

3.4.4.1 Projektiranje poteka in prečnega profila ceste

Road layout and cross-section design

Zakon o graditvi objektov (2002) opredeljuje projektiranje kot izdelovanje projektne dokumentacije in z njim povezano tehnično svetovanje, projektno dokumentacijo pa kot

sistematično urejen sestav načrtov oziroma tehničnih opisov in poročil, izračunov, risb in drugih prilog, s katerimi se določijo lokacijske, funkcionalne, oblikovne in tehnične značilnosti nameravane gradnje. Pravilnik o projektiranju cest (2005) razlikuje projektiranje geometrijskih elementov cest in projektiranje konstrukcijskih elementov cest. Med prve uvršča določanje horizontalnih in vertikalnih elementov poteka ceste ter sestavin ceste v prečnem profilu (vozišča, bankina, jarek,...). Projektiranje konstrukcijskih elementov zajema določanje vrste in debeline ter zaporedja slojev med temeljnimi tlemi in vozno površino. Tehnična smernica za maloprometne ceste (2003) ločuje projektiranje geometrijskih elementov in projektiranje voziščne konstrukcije ter poudarja, da je trasiranja maloprometnih cest zahtevnejše in pomembnejše od ostalih cest, zaradi večjega števila omejitvenih faktorjev, ki jih je pri tem potrebno upoštevati.

Nekateri tuji priročniki za graditev gozdnih prometnic (npr. Larcombe, 1999) razlikujejo geometrično projektiranje od strukturnega projektiranja, drugi pa ne (npr. Forest road engineering guidebook, 2002). Na splošno je geometrijsko projektiranje, zlasti trasiranje gozdnih cest, eno najbolj pomembnih strokovnih opravil pri graditvi. Keller in Sherrar (2003) sta pred dobrim desetletjem postavila zelo pomenljiv rek: 'Bolje je imeti slabo cesto'¹⁶ na dobri lokaciji, kot dobro cesto na slabi. Slabo cesto je možno izboljšati, slabe lokacije ne'.

Projektiranju grajenih gozdnih prometnic se v Sloveniji posveča vse manj pozornosti, edine zakonske podlage zanj (Pravilnik o gozdnih prometnicah, 2009) predpisujejo le tehnične zahteve za geometrijsko projektiranje. Smernice za graditev, rabo in vzdrževanje gozdnih prometnic (Potočnik, 2001) vključujejo usmeritve za strukturno projektiranje voziščne konstrukcije gozdne ceste med tehnične elemente za projektiranje.

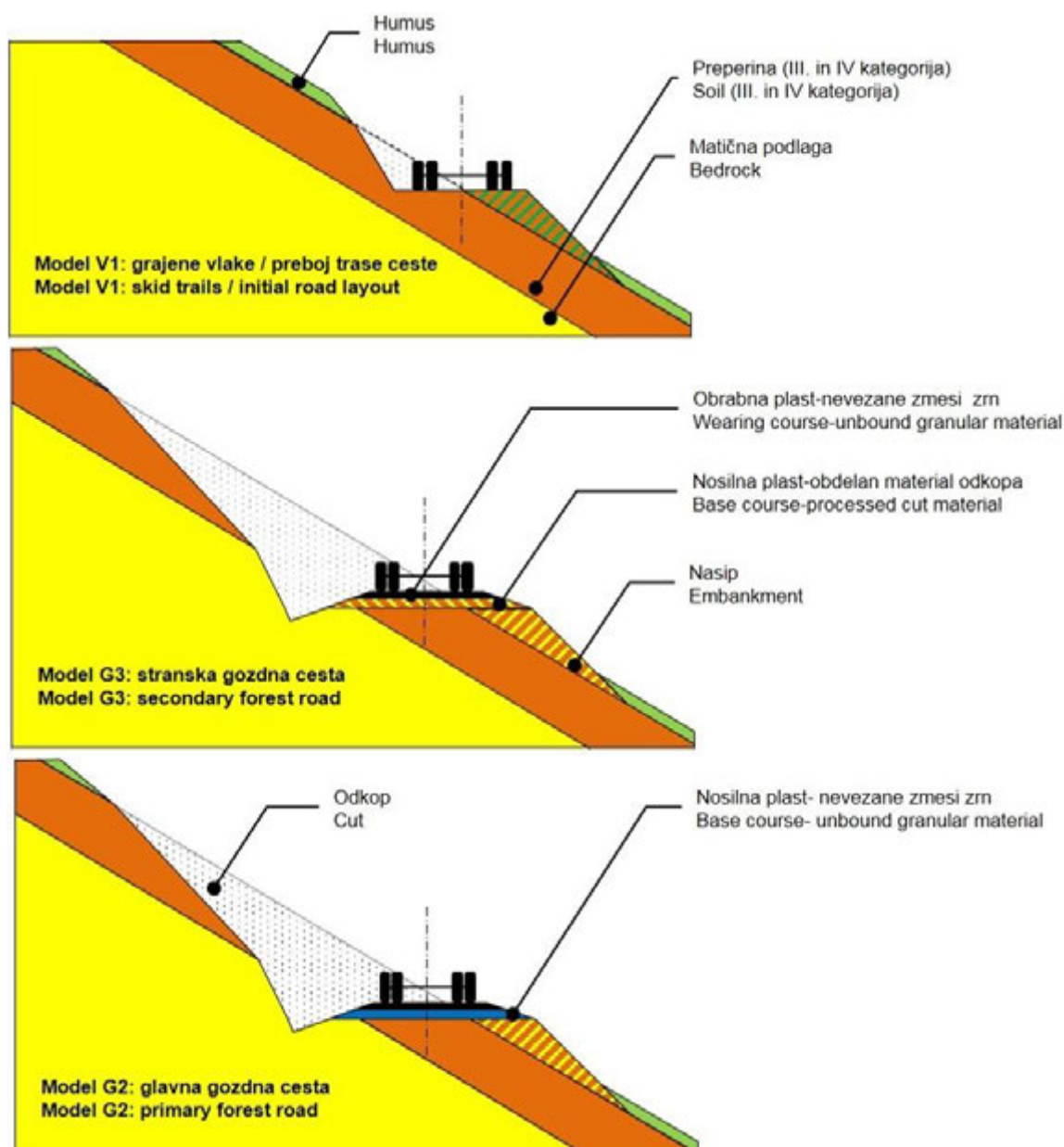
Geometrijsko in strukturno projektiranje sta pri gozdnih prometnicah zelo povezana. S primernim potekom trase se izognemo slabo nosilni podlagi na nekem odseku trase, zmanjšamo količino zemeljskih del in celo pridobimo primeren material za izdelavo ali izboljšanje materiala nosilnih plasti na licu mesta tudi za druge odseke na projektirani trasi. Dobro trasiranje prinaša največjo dodano vrednost projektu oziroma največje prihranke pri gradnji gozdnih prometnic. Sestavni del geometrijskega projektiranja je opredelitev normalnega in karakterističnih prečnih profilov.

Pri nas prevladuje mešani prečni profil. Uveljavljeni sta dve obliki mešanega prečnega profila: strehasti ali klasični ter enostranski ali alpski. Prvi zahteva na strani raščenih tal vzdolžno odvodnjavanje meteorne vode z jarkom ali koritnico. Drugi ima cestišče nagnjeno

¹⁶ V smislu voziščne konstrukcije.

navzven in nima opreme za vzdolžno odvodnjavanje vode. To daje na strmih terenih manjše širine cestnega telesa (Bitenc in Potočnik, 1989), vožnja pa je bolj tvegana.

Za enovito obravnavo nosilnosti vozišč gozdnih cest in grajenih vlak smo v raziskavi oblikovali poenotene modele cestnih teles gozdnih prometnic (slika 18). Modeli temeljijo na strehastem mešanem prečnem profilu. Ponazarjajo tri značilne načine izgradnje in hkrati tri značilne prereze cestnega telesa, ki se pojavljajo danes pri graditvi gozdnih prometnic v Sloveniji. Modeli so bili podlaga za izbiro proučevanih lokacij in vzorčnih metod dela.



Slika 18: Značilni modeli graditve gozdnih prometnic v Sloveniji v letih 2000-2010

Figure 18: Typical models for forest thoroughfare construction in Slovenia during period 2000-2010

3.4.4.2 Izbira in lastnosti osnovnih gradbenih materialov

Selection and properties of the basic construction materials

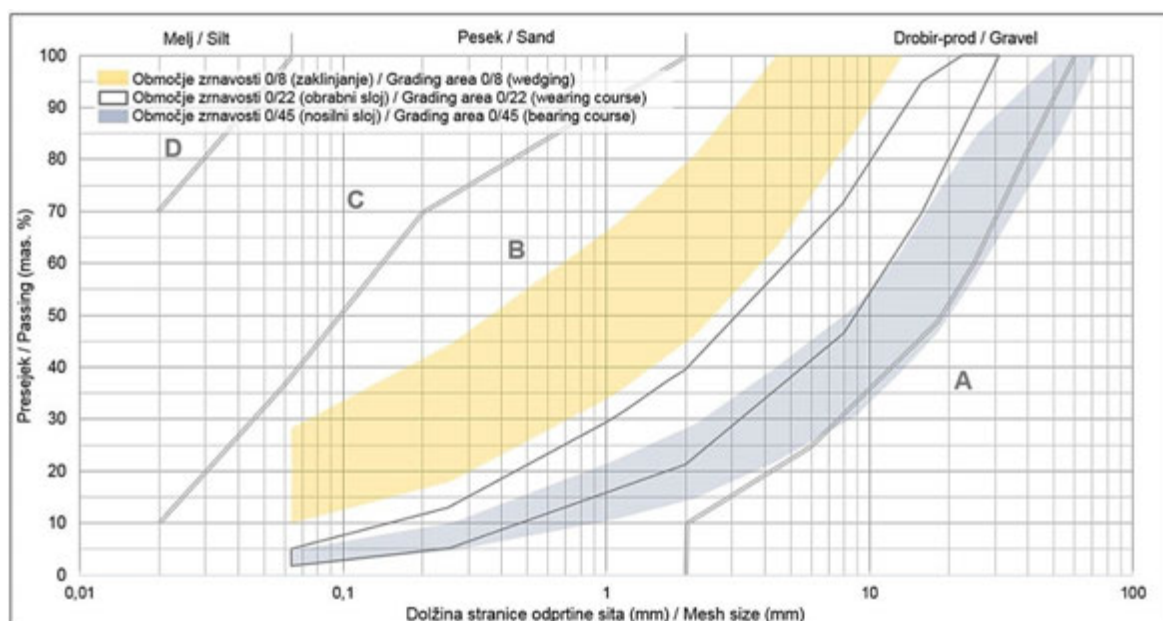
Tehnične specifikacije za javne ceste predpisujejo za nosilne in obrabne plasti iz nevezanih materialov zmesi kamnitih zrn (TSC 06.200 : 2003), lastnosti zmesi zrn pa določa standard SIST EN 13242 (2008). Omenjeni standard določa štiri skupine zahtev, ki jih mora imeti material, vgrajen v plasti VK ceste, zgrajene iz nevezanih zmesi zrn:

1. geometrijske zahteve, podane z naslednjimi lastnostmi: zrnastost, velikost zmesi zrn (podana z razmerjem d/D), oblika zrn, delež drobljenih zrn, vsebnost finih frakcij in kakovost (značaj) finih zrn;
2. fizikalne zahteve, podane z naslednjimi lastnostmi: odpornost proti drobljenju, odpornost proti obrabi, prostorninska masa zrn, sposobnost vpijanja vode;
3. kemijske zahteve, podane z naslednjimi lastnostmi: vsebnost sulfatov, topnih v vodi, sulfat, topen v kislini, celotno žveplo, druge zahteve;
4. zahteve glede odpornosti, podane z naslednjimi lastnostmi: sončna pegavost, odpornost proti zmrzovanju in tajanju.

Izmed naštetih lastnosti so do sedaj v gozdarstvu občasno preverjali le zrnastost zmesi zrn, ki so jih pridobivali v kamnolomih v lasti nekdanjih gozdnih gospodarstev (Žmavc, 1968). Žmavc (1970) je v navodilih za vrednotenje ustreznosti materialov podal meje za različne metode stabilizacije voziščnih konstrukcij (priloga C). Sinteza teh meja in območij primernosti zrnastosti za posamezne plasti prikazuje slika 19.

Materiali, ki jih dejansko vgrajujemo v VK gozdnih cest v Sloveniji, so dveh vrst. Za obrabne plasti gramoznih VK praviloma uporabljamo zmesi kamnitih zrn, ki so največkrat necertificiranega izvora. Za nosilne plasti uporabljamo t. i. sortiran material izkopa, ki predstavlja mešanico zemljine in skal, ki so pridobljene tekom oblikovanja planuma spodnjega ustroja oziroma v najboljšem primeru predrobljene na kraju samem (slika 15). Po svoji sestavi je sortiran material izkopa še najbližje materialom za kamnite posteljice in povozne platoje. Kakovost materialov za kamnite posteljice je v tehničnih specifikacijah za javne ceste (TSC 06.100 : 2003) določena z naslednjimi pogoji:

- količnik neenakomernosti zrnastosti U mora biti večji od 5 (zaželeni vrednosti $8 \leq U \leq 50$):
- če je zmes vgrajena do globine zmrzovanja, mora znašati količnik $U \geq 8$;
- delež zrn mora biti velikosti do 0,063 mm (ki ne smejo biti plastična):
 - f_5 (do 5 m.-%) na deponiji in
 - f_8 (do 8 m.-%) v vgrajeni plasti;
- največje zrno ne sme presegati polovice debeline vgrajene plasti kamnite posteljice, vendar praviloma ne sme biti večje od 125 mm.



Slika 19: Ključna območja (TSC 06.200 : 2003) in meje (Žmavc, 1970: 47) za hitro presojo zrnivosti materialov pri gradnji gozdnih cest (A: neprimerno za stabilizacijo, B: vse vrste stabilizacije, C: neprimerno za mehanično stabilizacijo, D: samo za stabilizacijo z apnom)

Figure 19: Key areas (TSC 06.200 : 2003) and limits (Žmavc, 1970: 47) for rapid evaluation of the materials used in forest road construction (A: unsuitable for stabilisation, B: all stabilisation methods, C: unsuitable for mechanical stabilisation, D: only for stabilisation with lime)

Za kamnito posteljico so primerni vsi naravni materiali, ki po klasifikaciji USCS ustrezajo vrsti GW, GP, GM. To so dobro građuirani, slabo građuirani ali meljasto peščeni prodi, drobljenci, mešane zmesi zrn in zmesi zrn iz sekundarnih surovin.

Dobre (1994: 55) za »mehke« podlage predpisuje debelino nosilne plasti 15–30 cm »grobega gramoza«, za vse voziščne konstrukcije pa zaporno plast 1–2 cm finega peska ter opozarja, da debelina najdebelejšega zrna v posamezni plasti ne sme presegati 1/3 debeline plasti.

Smernice za projektiranje gozdnih cest v Sloveniji predvidevajo na trdih podlagah za nosilno plast VK 15 cm lokalnega kamnitega materiala, za obrabno plast pa do 10 cm drobljenega kamnitega materiala granulacije 0/45 cm, oziroma na zelo dobro nosilnih tleh in nižjih kategorijah gozdnih cest »10 cm obrabne plasti drobljenega kamnitega materiala granulacije 0/40 ali 0/60« (Potočnik, 2001: 6). Lokalni kamniti material za nosilne in obrabne plasti gozdnih cest je zmes naravnih in drobljenih zrn, pridobljenih na kraju samem ali v bližini vgradnje, in se razlikuje tako od temeljnih tal kot tudi od certificiranih zmesi zrn.

Geotehnične preiskave niso sestavni del gradnje gozdnih cest, se pa občasno pojavijo. Pri tem praviloma ne gre za sondažne izkope, ampak bolj za geomehanske ocene. Praviloma bi morale geomehanske preiskave terena bodoče trase ceste segati vsaj 2–3 metre pod površje, če naj dajo verodostojne rezultate (Oblak, 2006).

3.4.4.3 Veziva, dodatki in nadomestni gradbeni materiali

Binders, aditives and alternative building materials

Zmesi zrn so osnovni gradbeni materiali nosilnih plasti cest, kadar ima predvidena prometnica širši pomen, je cena zmesi zrn ugodna oziroma so transportne razdalje med mestom proizvodnje zmesi zrn in mestom vgradnje majhne. Nobeno od naštetega na sodobnih gozdnih cestah ne drži, zato se vse bolj uporabljamo lokalne materiale, ki jim poskušamo izboljšati inženirske lastnosti.

Stabilizacija je kombinacija mehanskih in kemičnih postopkov, s katerimi prilagajamo lastnosti zemljine zahtevam inženirske konstrukcije. Kemično stabiliziranje zemljin so uporabljali že za gradnjo piramid v Tibetu (Greaves, 1996, cit. po Petkovšek in sod., 2008). Prva cesta s stabilizirano VK v Sloveniji je bila leta 1964 zgrajena regionalna cesta Kalce-Črni vrh (Petkovšek in sod., 2008). V začetku sedemdesetih je Žmavc (1970) objavil navodila za stabiliziranje materialov za gradnjo cest ter razlikoval mehanične in kemične tehnike stabilizacije zemljin. Takrat je bil pojem mehanične stabilizacije predvsem vezan na zgoščevanje cestogradbenih materialov z valjanjem, danes pod mehanično stabilizacijo razumemo dodajanje frakcij zmesi zrn, ki pri valjanju omogočajo boljše zgoščevanje. Pomembno je razlikovanje med izboljšanjem in stabilizacijo zemljin. Prvo je kratkotrajne narave in pomeni predvsem cenejšo izvedbo del, drugo pa je trajnejše in tudi bolj zahtevno.

Tudi v gozdarstvu so že ob prvih začetkih graditve gozdnih cest dobro poznali potencialne zlasti mehanične stabilizacije zemljin (Annon, 1964; Beneš, 1969). Klemenčič (1969) je že pred skoraj pol stoletja opozarjal, da je tehnike stabilizacije zemljin možno uporabiti tudi zato, da zmanjšamo odvoze odkopane hribine in dovoze agregatov iz kamnolomov. Ni znano, koliko od tega znanja je bilo dejansko uporabljeno v praksi, dejstvo pa je, da je zanimanje za kemično stabilizacijo tako gozdnih kot javnih cest pri nas precej zamrlo sredi osemdesetih let. Petkovškova in sodelavci (2008) to pojasnjujejo z dejstvom, da smo takrat v Sloveniji pri gradnji cest dopuščali stranske odvzeme materialov, za sabo pa puščali divje kamnolome. Slednje še posebej velja za gradnjo gozdnih cest.

Kontinuirano zanimanje za stabilizacijo materialov pri gradnji gozdnih cest je značilno za države z naprednim inženirskim gozdarstvom. V zadnjem času se s problematiko

stabilizacije gramoznih cest najbolj celovito ukvarjajo v ZDA (Kestler, 2009; Monlux in Mitchell, 2006). Kestler (2009) razlikuje tradicionalne veziva za kemično stabilizacijo (apno, cement, elektrofitterski pepel, bitumenska veziva) in netradicionalna veziva (npr. kloride, elektrolitne in encimske emulzije). Novost so zlasti encimska veziva, ki jih s pridom uporabljajo za povečanje nosilnosti ob sočasnem zmanjšanju prašenja gramoznih vozišč pri preko 20% masnem deležu finih delcev v nosilni in obrabni plasti (Curtis, 2008; Surdahl in sod., 2005). Bohrn in Stampfer poročata o dobrih rezultatih pri uporabi lesnega pepela pri stabilizaciji spodnjega ustria gozdnih cest (2014).

Proučevanje nosilnost v povezavi z novimi gradbenimi materiali se je v zadnjem času zelo razvilo na področju reciklaže. Tehnična specifikacija za ponovno uporabo materialov v cestogradnji (TSC 06.800 : 2001) opredeljuje recikliran material kot tisti, ki je vsaj enkrat že bil uporabljen kot gradbeni material v cestogradnji. Za reciklirane nevezane kamnite materiale tako navaja nasipni material, zmesi zrn, cementne betone iz cementnih vozišč ter seveda obstoječe asfaltne prevleke. Za vse reciklirane materiale je predpogoj, da ne vsebujejo okolju škodljivih nečistoč, na vodovarstvenih področjih pa za uporabo recikliranih materialov veljajo še dodatne zahteve.

Uporaba recikliranih asfaltov pri nas je v gradbeništvu uveljavljena (Žmavc, 2010), prav tako se uspešno uveljavlja uporaba gradbenih odpadkov za povečanje nosilnosti nevezanih nosilnih slojev (Pavšič in sod., 2008). Na posameznih objektih je seveda možno kombinirati tehnike stabilizacije temeljnih tal oziroma spodnjega ustroja z uporabo recikliranih materialov za nosilne plasti voziščne konstrukcije in tako znatno poceniti gradnjo cest (Cvek, 2013).

V gozdarsko naprednejših državah narašča uporaba recikliranih materialov tudi pri gradnji gozdnih prometnic (Schlaghamersky, 1999). V Švici so izdali navodila in pogoje za vgradnjo recikliranih gradbenih materialov v voziščne konstrukcije gozdnih cest (Instruktion Nr. 5, 2013).

Tretje in zelo obsežno področje materialov je področje geotekstilov in geomrež (Tensar 2010). Pri tem je potrebno ločevati polsti, ki so prvestveno namenjene ločevanju posameznih plasti VK med seboj od geomrež, ki največkrat služijo za povečevanje nosilnosti zemljine. Uporaba polsti je pri gradnji gozdnih cest tudi v Sloveniji že dalj časa prisotna, vendar omejena na odseke z nizko nosilnostjo (Dobre, 1982). Med strukturne dodatke gozdnim cestam se v zadnjem času preizkuša uporabnost lesnih sekancev za zmanjšanje občutljivosti nasipov in posteljice na škodljivo delovanje zmrzali (Konrad in sod., 1997)

Izboljšanje in stabilizacija cestogradbenih materialov, uporaba recikliranih gradbenih materialov ter uvajanje grotekstilij ni mogoče brez orodij za preverjanje učinkov vgrajenih materialov ali postopkov na nosilnost, zato je razpolaganje s primernim orodjem za določanje nosilnosti predpogoj za njihovo implementacijo.

3.4.4.4 Projektiranje voziščne konstrukcije

Pavement structure design

Na pričakovane zunanje vplivne dejavnike se odzivamo tekom dimenzioniranja VK in njene izdelave (Žmavc 2007; Malick in El-Korchi, 2009). Dimenzioniranje VK zajema izbiro plasti ter iterativen proces določanja debeline in sestave plasti glede na vplivne dejavnike. Pri postopkih dimenzioniranja razlikujemo šablonske, empirične in analitične postopke (Cezar, 2007). Slednji temeljijo na intenzivnih laboratorijskih preiskavah materialov ter zahtevnih računskih postopkih, ki so bolj zanesljivi v napovedih deformacij (Sweere, 1989). Analitični postopki se pri dimenzioniranju sodobnih VK vse bolj uveljavljajo.

V gozdarstvu srečujemo po svetu šablonske (Manual for the planning, design and construction of forest roads in steep terrain, 1998) in empirične postopke (Earth and aggregate surfacing design guide for low-volume roads, 1996). VK gozdnih cest v Sloveniji teoretično določamo glede na pričakovano prometno obremenitev ceste, nosilnost podlage, razpoložljivost materiala in ekonomičnost izvedbe (Smernice za projektiranje gozdnih cest, 1982). V praksi to pomeni na trdi podlagi 6-12 cm gramoza, na mehki pa 15-30 cm grobega gramoza za nosilno plast ter 6-10 cm veznega gramoza za obrabno zaporno plast. Kot rezultat sodelovanja gradbenikov in gozdarjev se v zadnjem času v tujini pojavljajo računalniške aplikacije za poenostavljeno analitično dimenzioniranje VK maloprometnih cest z nevezanimi plastmi (Dawson in sod., 2008).

Pri projektiranju VK za opredeljene modele cestnih teles (slika 18) se srečamo z več problemi. Prvi je ta, da imamo pri večini gozdnih cest nehomogeno voziščno konstrukcijo in se je potrebno odločiti, katera od dveh je merodajna. Če je za dimenzioniranje merodajen del v nasipu, se je potrebno odločiti, kje je meja med zgornjim in spodnjim ustrojem. Vprašanje nikakor ni trivialno, saj večino gozdnih cest danes zgradimo tako, da je pretežni del nosilne plasti iz enakih materialov, kot je nasip. Tudi sam pojem spodnji ustroj ima smisel le, če je ta zgrajen iz več plasti. Ker v obravnavanem obdobju nismo uporabljali nobene tehnike stabilizacije, je spodnji ustroj zgrajen samo iz ene plasti, ki je v bistvu nasip.

Za dimenzioniranje VK je bistveno poznati nosilnost temeljnih tal, ne glede ali jo izražamo s CBR ali z katerim od deformacijskih modulov. Tudi če privzamemo, da je pri tem potrebno

upoštevati temeljna tla pod nasipom v mešanem profilu, ni jasno ali se meritve nanašajo na organske horizonte naravnih gozdnih tal (Urbančič in Simončič, 2005) ali pa na mineralne horizonte, ki so dejanska podlaga utrditvi ceste po odstranitvi humusnih slojev.

Naštete dileme so le vrh ledene gore, zaradi katere intenzivnejša implementacija sodobnih metod analitičnega dimenzioniranja voziščnih konstrukcij gozdnih cest trenutno ni mogoča.

3.4.4.5 Izvedba del

Construction techniques

Izvedba del je končni in ključni akt procesa graditve. Bolj kot ima VK skromne elemente, večji je vpliv izvajalca na njeno nosilnost (Larcombe, 1999). Kakovostno izdelane VK ohranijo funkcionalnost še dolgo po tem, ko pokažejo znake obrabe (slika 20). Od vseh dejavnikov, na katere samostojno vpliva izvajalec del, je za nosilnost ceste najpomembnejša zgoščenost podlage in vseh vgrajenih plasti (Simmelink, 1995). Njegovega dela ni mogoče preveriti drugače kot z meritvijo.



Slika 20: Ostanki telfordskega tlaka na gozdni cesti (levo) in neustrezna sanacija napačno izdelanega vozišča s prodnato obrabno plastjo (desno)

Figure 20: Remnants of the Telford pavement on forest road (left) and wrong sanitation of improperly made carriageway with gravel wearing course (right)

V Sloveniji ni sistema za usposabljanje izvajalcev del pri gradnji gozdnih cest. Obstaja nekaj odličnih samoukov in vrsta podjetnikov z neprimerno mehanizacijo in brez izkušenj. Veliko je nestrokovno izvedenih del, zato je gradbeni nadzor pri gradnji gozdnih prometnic nujen.

Raziskav o vplivih izvedbe del na nosilnost gozdnih cest praktično ni. Strokovno delo na tem področju se razdeli na dve smeri. Kakovost izvedbe konkretnih del praviloma preverja licencirani gradbeni nadzornik, če je za dani objekt imenovan. Splošna navodila in usmeritve za dobro prakso pri izvedbi del so del priročnikov in smernic. Zaradi nazadovanja tega področja se jih v Evropi izdaja vse manj, svetla izjema v zadnjem času je FAO vodnik za gradnjo gozdnih prometnic v hribovitih terenih (Fannin in Lorbach, 2007). Več jih je na anglosaksonskem govornem področju (Forest road management guidebook, 2000; Forest road engineering guidebook, 2002; Cook in sod., 2013; Keller in Sherar, 2003). V njih je obilo praktičnih usmeritev, ki pa jih izvajalci žal ne berejo.

4 RAZISKOVALNI CILJI IN HIPOTEZE RESEARCH OBJECTIVES AND HYPOTHESIS

4.1 RAZISKOVALNI CILJI RESEARCH OBJECTIVES

Osrednji cilj raziskave je usvajanje temeljnih znanj za objektivno ugotavljanje nosilnosti grajenih gozdnih prometnic v Sloveniji tekom gradnje, vzdrževanja in rabe.

Podrobni cilji raziskave so:

1. proučiti primernost dinamičnega deformacijskega modula za objektivno mero nosilnosti vozišč grajenih gozdnih prometnic v Sloveniji;
2. spoznati zveze med nosilnostjo grajenih gozdnih prometnic in vremenskimi razmerami, uporabljenimi materiali, matično podlago in prometno obremenitvijo;
3. podati usmeritve za poenoteno določanje nosilnosti vozišč grajenih gozdnih prometnic.

4.2 HIPOTEZE HYPOTHESES

Za dosego podrobnih ciljev raziskave smo na podlagi pregleda literature in predhodnih pilotnih študij oblikovali šest raziskovalnih hipotez. Njihovemu preverjanju so prilagojeni materiali ter metode zbiranja in obdelav podatkov.

HIPOTEZA 1: Z dinamično obremenilno ploščo lahko zaznamo vsa stanja nosilnosti voznih površin grajenih gozdnih prometnic. Dinamična obremenilna plošča je standardno orodje graditeljev cest v Sloveniji, zato je prva izmed naprav za terensko ugotavljanje nosilnosti, s katero bi objektivizirali nosilnost v gozdnem gradbeništvu. Dinamični deformacijski modul je posredna mera za povprečno nosilnost zmesi zrn pod ploščo do globine 45 cm. Razpon nosilnosti pri VK gozdnih prometnic je lahko zelo velik. Lahko da VK sploh ni in je to v bistvu nosilnost temeljnih tal. Druga skrajnost je gozdna cesta na trdni skali. Spremenljive vlažnostne razmere in dinamične sile prometa v gozdu še povečujejo merilni obseg in variabilnosti meritev. Domnevamo, da bo uporabljena naprava omogočila zaznavanje in razlikovanje nosilnosti na grajenih gozdnih prometnicah v različnih pogojih.

HIPOTEZA 2: Granulometrijske lastnosti materialov nosilnih plasti novejših gozdnih cest so neustrezne. Veliki prihranki pri stroških VK gozdnih cest se skrivajo v materialih nosilnih plasti na trasi. Preverili bomo vzorec cest, zgrajenih v

zadnjih 10 letih v državnih gozdovih, in ugotovili, ali vgrajeni material nosilne plasti ustreza projektni dokumentaciji in nacionalnim tehničnim specifikacijam za tovrstne plasti. Domnevamo, da niti pripeljani niti avtohtoni materiali ne ustrezajo zahtevam.

HIPOTEZA 3: Spremembe v nosilnosti vozišč utrjenih gozdnih prometnic so tekom leta bolj kot od klimatsko-hidroloških pogojev odvisne od vrste in debeline nosilne plasti prometnice. Kategorizacija gozdnih cest v Sloveniji na glavne in stranske posredno upošteva prometno obremenitev. Preverili bomo, koliko se kategorizacija sklada z dejansko debelino nosilnih plasti in koliko vpliva ima spomladanska odjuga na nosilnost gozdnih cest in vlak.

HIPOTEZA 4: Nosilnost neutrjenih cest na trdi podlagi v sušni dobi je manjša od nosilnosti stranskih gozdnih cest v spomladanskem času. Primer neutrjenih cest pri nas so grajene traktorske vlake. V razmerah zelo majhne prometne obremenitve gozdne ceste se postavlja dilema o potrebnosti nosilne plasti. V praksi velja prepričanje, da je zadnji del slepega kraka ceste smiselno izvesti neutrjeno, kar bomo v raziskavi preverili na izbranih odsekih cest in vlak na trdi in mešani geološki podlagi. Domnevamo, da so razlike statistično značilne.

HIPOTEZA 5: Nosilnost vozišč cest v mešanem profilu na kolesnici v nasipu je manjša od tiste na kolesnici v odkopu oziroma na raščeni tleh. Domnevamo nehomogenost nosilnosti vozišča v prečnem profilu, ki je posledica premajhne zgoščenosti nasipa glede na raščena tla. S potrditvijo te domneve se gozdnemu gradbeništvu odpira pomembna zveza med geometrijskimi in konstrukcijskimi elementi cest. Zamikanje cest v raščena tla res povečuje količino izkopa, večja pa nosilnost temeljnih tal in celotne VK. Če je material vgradljiv in zagotovimo izravnavo izkopanih mas na taki trasi, lahko na poceni način povečamo togost VK. Domnevo nameravamo preveriti na vzorcu novih in pet let starih cest ter tudi med izgradnjo VK izbrane trase.

HIPOTEZA 6: Obstoječa prometna obremenitev glavnih gozdnih cest na trdih in mešanih podlagah nima zaznavnega kratkoročnega vpliva na prečno neravnost in nosilnost. Preverili bomo, ali je nosilnost in utrditev glavnih gozdnih cest za sedanji nivo prometne obremenitve zadostna, saj se pojavljajo ideje o asfaltiranju takih odsekov. Nujna podlaga za preveritev take hipoteze je kvantificiranje prometne obremenitve gozdne ceste, ki v Sloveniji še ni bila narejena.

5 MATERIALI IN METODE MATERIAL AND METHODS

5.1 PROUČEVANE LOKACIJE STUDY SITES

Nosilnost vozišč smo proučili na vzorcu gozdnih prometnic, zgrajenih v Sloveniji od leta 2002 do 2008 po uveljavljenih strokovnih merilih. Iz evidenc gozdnih cest smo izbrali enajst cest, ki so ustrezale glede na geološko podlago, starost in kategorijo. Dodatno smo izbrali še staro glavno gozdno cesto na karbonatni podlagi, tri nove grajene vlake na predelu Predmeja in tri stare grajene vlake na predelu Rogatec. V raziskavo je vključenih osemnajst grajenih gozdnih prometnic, zgrajenih pretežno v državnih gozdovih (preglednica 1)¹⁷.

Preglednica 1: Osnovni podatki o analiziranih prometnicah na dan 1. januar 2009

Table 1: Basic parameters about analysed thoroughfares on January 1st 2009

Številka Number	Ime Nname	Koda prometnice Thoroughfare code	Tip investitorja Investor type	Izvajalec del Constructor	Kategorija prometnice Thoroughfare class	Starost prometnice (let) Age (years)	Dolžina (m) Length (m)	Pretežna podlaga ** Dominant geology**	Povprečen izkop (m ³ /m)	Vrednost del (EUR/m)* Building costs (EUR/m)*	Strošek VK EUR/m)* Pavement cost EUR/m)*
01	Ravnik-krožna cesta	RA	-	-	G2	37	929	K	-	-	-
02	Soteska-Oražem	SO	zasebni/private	GG Novo mesto d.d.	G2	1	236	K	1,61	63,68	13,76
03	Knipajz-Krekovše	KN	javni/public	SGG Tolmin d.d.	G2	4	2016	M	3,73	141,64	27,54
04	Bajs-Goli Cirk	BA	javni/public	GG Celje d.o.o.	G2	1	5077	M	1,86	32,66	12,12
05	Jezero-Planinca	PL	javni/public	Debevec s.p.	G3	3	2615	K	1,56	33,36	12,50
06	Čemerje-Lukežova bajta	CE	javni/public	GG Novo mesto d.d.	G3	3	1615	K	1,21	48,52	15,68
07	Čutarovka	CU	javni/public	GG Postojna d.d.	G3	1	646	K	1,45	37,35	15,70
08	Macesnova-Jelendol	MA	javni/public	GG Novo mesto d.d.	G3	1	1817	K	0,98	44,26	16,06
09	Osojna-Zlaka	ZL	javni/public	GG Celje d.o.o.	G3	6	2176	M	3,58	82,65	15,65
10	Lipovec - Sotla	LI	javni/public	GG Celje d.o.o.	G3	5	1151	M	2,97	47,63	10,57
11	Kovkovo	KO	zasebni/private	MLakar s.p.	G3	1	1973	M	2,89	55,31	7,13
12	Strešni vrh	ST	javni/public	GG Celje d.o.o.	G3	1	1373	M	1,78	47,02	16,41
13	Predmeja 1	P1	javni/public	SGG Tolmin d.d.	V1	1	428	K	-	-	-
14	Predmeja 2	P2	javni/public	SGG Tolmin d.d.	V1	1	281	K	-	-	-
15	Predmeja 3	P3	javni/public	SGG Tolmin d.d.	V1	1	606	K	-	-	-
16	Rogatec 1	R1	javni/public	GG Celje d.o.o.	V1	3	510	M	-	7,86	-
17	Rogatec 2	R2	javni/public	GG Celje d.o.o.	V1	3	395	M	-	4,62	-
18	Rogatec 3	R3	javni/public	GG Celje d.o.o.	V1	17	890	M	-	10,08	-

* revalorizirano in brez DDV / revaluated and without VAT; ** K-Karbonat/Lime; M-Mešano/Mixed

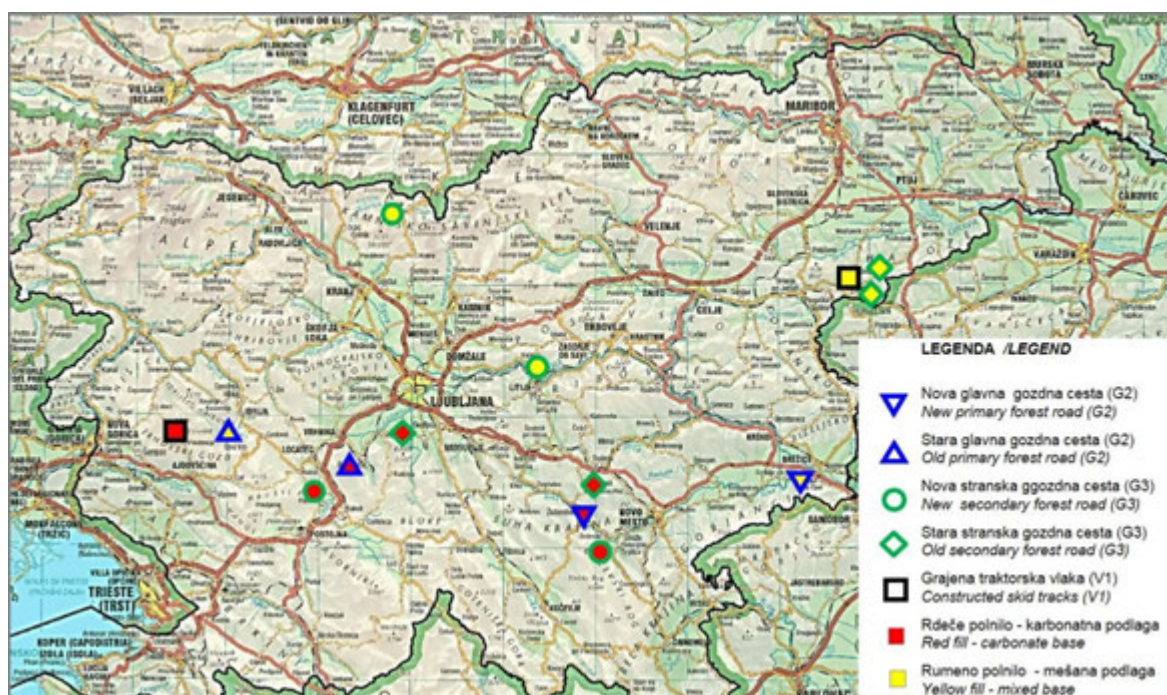
¹⁷ V besedilu bomo ime prometnice navajali v skrajšani obliki in v narekovajih (npr. Macesnova – Jelendol kot »Macesnova«), na slikah in v preglednicah pa s kodo (npr. MA).

Skupna dolžina obravnavanih cest je 21,6 km. Šest obravnavanih cest, zgrajenih v letu pred meritvami, smo opredelili kot nove, ostale pa kot stare. Izbrane ceste predstavljajo širok razpon povprečnih stroškov gradnje in stroškov zgornjega ustroja ter ponazarjajo pestrost gradbenih praks pri nas. Skupna dolžina analiziranih vlak je 3,1 km.

Okvirno lego izbranih prometnic prikazuje slika 21, podrobnejša lega vlak je v prilogi E. Nahajajo se na območju večnamenskih gozdov na karbonatnih (apnenci, dolomiti) oziroma mešanih geoloških podlagah (peščenjaki, skrilavci), ki skupaj tvorita večino gradbenih podlag v slovenskih gozdovih.

Izbrane prometnice so predstavljale osnovo za oblikovanje treh skupin raziskovalnih objektov:

- značilni odseki s karakterističnimi prečni profili,
- opazovalno polje na gozdni cesti v gradnji,
- značilni transportno-gravitacijski enoti.



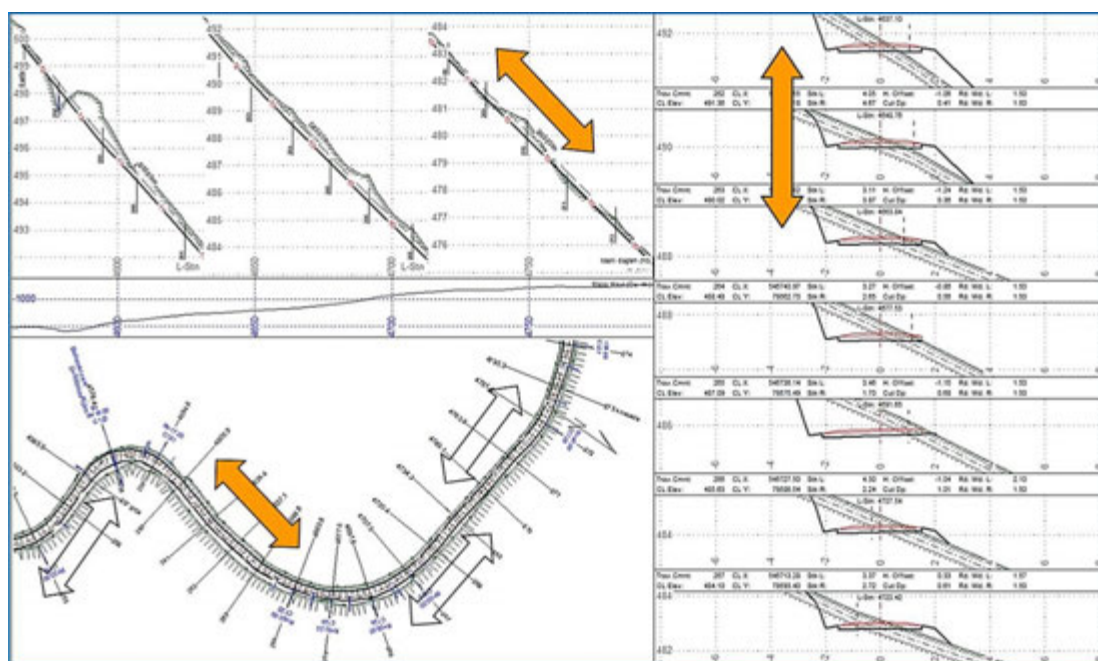
Slika 21: Lega proučevanih grajenih gozdnih prometnic

Figure 21: Location of analysed constructed forest thoroughfares

5.1.1 Značilni odseki prometnic s karakterističnimi prečnimi profili Characteristic thoroughfare segments with typical cross-sections

Celotna dolžina prometnice je z vidika vozišč in voziščnih konstrukcij zelo heterogena in kot taka neprimerna za poglobljeno proučevanje. Naravne danosti se vzdolž trase spreminjajo ter jim pri projektiranju in gradnji prilagajamo konstrukcijske elemente ceste. Pri projektiranju opišemo splošne značilnosti oblike in zgradbe cestnega telesa v normalnem prečnem profilu, posebnosti ceste v značilnih pogojih pa podamo s karakterističnimi prečnimi profili (TSC 03.200 : predlog 2003).

Naše proučevanje nosilnosti vozišč smo zato omejili na razmere, podobne značilnim modelom prečnih profilov (slika 18). Temu smo prilagodili tudi obliko in izbor osnovnih objektov raziskave. Ker pri grajenih gozdnih prometnicah v Sloveniji po dolžinah prevladuje mešan prečni profil v premi, smo izbrane prometnice razdelili na manjše in bolj homogene dele grajenih prometnic in jih imenovali »značilni odseki« (slika 22). Predstavljajo 40–60 m dolge, pretežno ravne odseke¹⁸, grajene v mešanem prečnem profilu.



Slika 22: Določitev možnih odsekov (puščica) in izžrebanih značilnih odsekov (rumena puščica) v načrtu ceste
Figure 22: Determination of possible (arrow) and selected characteristic sections (yellow arrow) in the road design

Osnova za praktično izločanje značilnih odsekov je bila projektna dokumentacija. Če smo dokumentacijo imeli, smo delitev na odseke opravili deloma v pisarni in deloma na terenu. V pisarni smo zaporednim trem prečnim profilom priredili številko odseka. Seznam možnih

¹⁸ Ravnine in krivine s horizontalnimi polmeri nad 30 m.

značilnih odsekov smo dobili z izločitvijo odsekov, kjer sta bila manj kot dva mešana profila ali so bili nakloni nivelete pod 3 % oziroma nad 12 % ali pa je bil naklon terena nad 60 % oziroma je bilo na odseku izogibališče, obračališče, lesno skladišče ali priključek druge prometnice. Tako zožen seznam možnih značilnih odsekov (slika 22) je bil osnova za žreb značilnih odsekov na posamezni prometnici.

Na prometnicah do 1 km dolžine smo izžrebali en odsek, na tistih do 2 km dva odseka in na daljših 3 odseke. Na vlaki smo izbrali en odsek. Izbrani odsek smo na terenu poiskali in ga označili. Na prometnicah brez dokumentacije smo prečne profile na terenu postavili sami na vsakih 20 metrov, ostali postopek je bil enak kot pri določanju značilnih odsekov z dokumentacijo. Na osemnajstih prometnicah smo izbrali 33 značilnih odsekov s skupno 99 prečnimi profili (slika 23), na katerih smo izvedli meritve nosilnosti in vplivnih dejavnikov.



Slika 23: Razporeditev karakterističnih prečnih profilov (KPP) na izbranih odsekih nove stranske gozdne ceste
Figure 23: Arrangement of typical cross-sections (TCP) on selected segments for new secondary road

Na gozdni cest »Bajs«, ki je bila v času strnjenih meritev nosilnosti še delno v gradnji, smo značilne odseke lahko izbrali le med profili 264 in 289 (priloga F), a smo tudi tam zagotovili naključen izbor devetih merilnih mest. Skupno je bilo izločenih 36 značilnih odsekov in 108 prečnih profilov. Ker so bili vsi primeri prometnic v značilnih reliefnih pogojih, smo jih skladno s strokovno terminologijo v gradbeništvu (TSC 03.200 : predlog 2003, 2003: s. 6) poimenovali »karakteristični prečni profili« (KPP).

5.1.1.1 Lastnosti analiziranih odsekov na novih gozdnih cestah

Characteristics of analysed sections on new forest roads

V raziskavo smo vključili šest novih cest (slika 24). Projektno dokumentacijo zanje je izdelalo Soško gozdno gospodarstvo Tolmin. Gradbena dela na njih so bila z izjemo ceste »Bajs« končana v drugi polovici leta 2008. Pri gradnji novih cest je bila uporabljena bagska tehnologija. Gradbena dela so opravili različni izvajalci. Razen gozdne ceste »Kovkovo« je

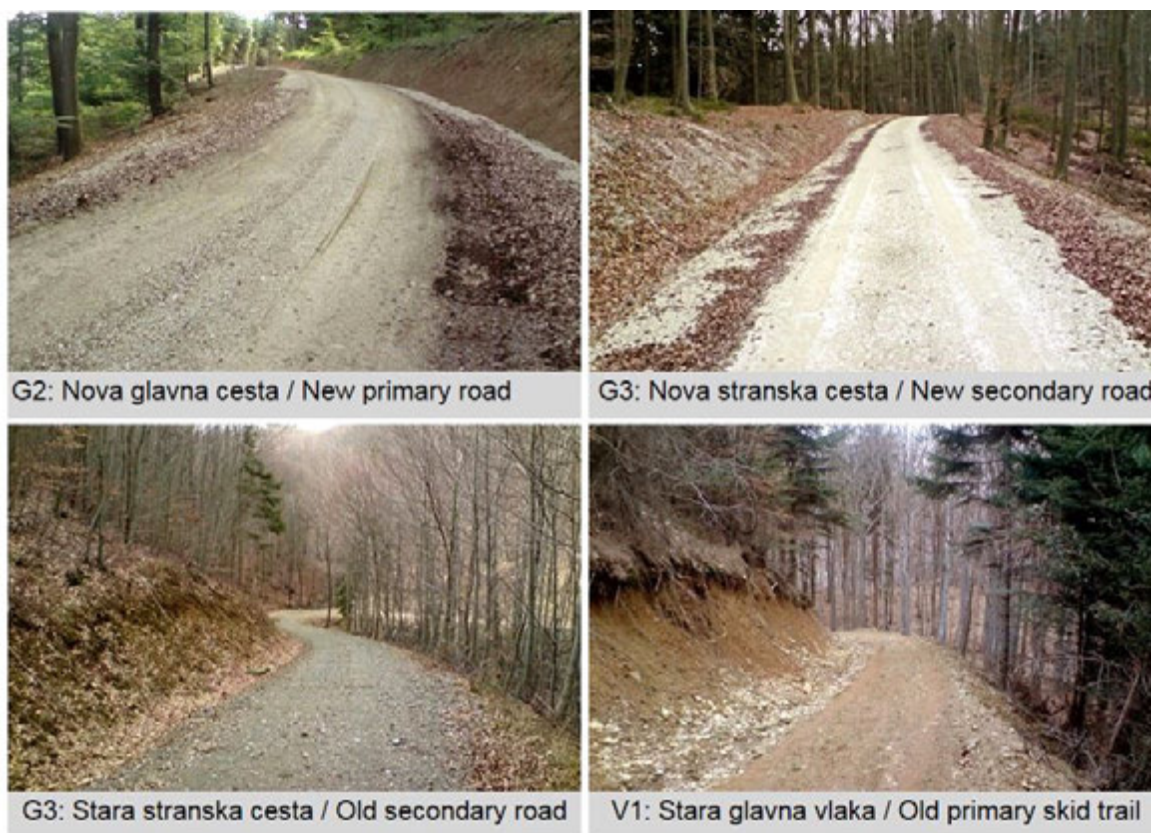
bil pri vseh novih cestah investitor Sklad kmetijskih zemljišč in gozdov RS. Prevoz lesa je potekal pred začetkom meritev na cestah »Kovkovo«, »Soteska« in »Macesnova«.

Glavna gozdna cesta na karbonatni podlagi »Soteska« je sicer starejša, a je bila leta 2008 na delu, ki je analiziran v okviru te raziskave, zgrajena na novo. Glavna gozdna cesta na mešani podlagi »Bajs« je bila jeseni 2008 dokončana v dolžini 300 metrov za potrebe te raziskave. V letu 2009 je bil končan preostali del te ceste v dolžini 4900 m. Ker je bil celoten transport nosilnih in obrabnih plasti prepeljan preko odseka, dokončanega v letu 2008, in je prišlo poleti 2009 do poškodb voziščne konstrukcije, so odsek, zgrajen 2008, poleti rekonstruirali. Poletne in jesenske meritve smo opravili na rekonstruirani voziščni konstrukciji.

5.1.1.2 Lastnosti analiziranih odsekov na starih gozdnih cestah

Characteristics of analysed sections on old forest roads

V raziskavi obravnavamo šest starih cest (slika 24). Pet jih je bilo zgrajenih v obdobju od leta 2002 do 2005. Zanje je projektno dokumentacijo izdelalo Soško gozdno gospodarstvo Tolmin. Za cesto »Ravnik« nismo imeli dokumentacije.



Slika 24: Tipičen jesenski videz značilnih odsekov analiziranih kategorij gozdnih prometnic

Figure 24: Typical autumn appearance of the typical sections for the analysed forest thoroughfare categories

Gradbena dela na starih cestah so izvajali različni izvajalci. Razen gozdne ceste »Planinca« je bil pri vseh starih cestah investitor Sklad kmetijskih zemljišč in gozdov RS, ki je pri njihovi gradnji imel tudi gradbeno-tehnični nadzor. Pri cesti »Planinca« je bil investitor Občina Brezovica in poteka po zasebnih gozdovih.

Stare gozdne ceste so po končani gradnji prezimile vsaj trikrat. Domnevamo, da se je glavnino procesa usedanja voziščne konstrukcije v tem času končala. Na vseh starih cestah je v letu meritev potekala tudi gozdna proizvodnja in prevoz lesa. V času izvajanja raziskave na njih ni bilo investicijskega vzdrževanja voziščne konstrukcije.

5.1.1.3 Lastnosti analiziranih odsekov na traktorskih vlakah

Characteristics of the analysed sections on skid trails

Grajene vlake so prometnice brez voziščne konstrukcije. Vozna površina je neposredno na planumu spodnjega ustroja, redkeje na planumu kamnite posteljice, ki nista neposredno predmet naše raziskave. V raziskavo smo jih vključili v minimalnem obsegu, da ilustriramo, kaj z vidika nosilnosti pomeni odsotnost voziščne konstrukcije.

V raziskavi smo analizirali nosilnost šestih vlak v državnih gozdovih (slika 24), od katerih so tri na karbonatni in tri na mešani podlagi. Vlake na karbonatni podlagi so bile zgrajene oziroma znatno rekonstruirane v letu 2008 na območju vetroloma v Predmeji za potrebe vožnje pri spravilu lesa z zgibnimi prikoličarji. Vlaki R1 in R2 na mešani podlagi sta bili zgrajeni z bagrom leta 2003 in 2005 na območju občine Rogatec za potrebe spravila lesa s traktorji. Vlaka R3 je bila zgrajena leta 1992 z buldožerjem. Vlake na mešani podlagi so bile načrtno izbrane v neposredni bližini analiziranih cest.

5.1.2 Opazovalno polje na gozdni cesti v gradnji

Observational field on a forest road under construction

Gradnja ceste »Bajs« je potekala deloma tudi v letu 2009. To nam je omogočilo meritve nosilnosti posameznih plasti voziščne konstrukcije, debeline vgrajenih plasti in spreminjanje oblike cestišča. Poleti 2008 smo izločili del ceste v dolžini 210 m ter postavili 9 vzorčnih profilov na mestih prečnih profilov iz projektne dokumentacije (Gozdna cesta 'Bajs - Goli Cirk' Projekt za izvedbo del, 2006). Tudi tu smo upoštevali mešane profile, ki pa niso bili izbrani naključno, ampak glede na možnosti terenskega spremljanja izvedbe del. Nahajali so se v neposredni bližini v letu 2008 dokončanega dela ceste (priloga F). Trije od devetih profilov so bili v krivinah s polmerom okoli 28 m, ostali so bili v premah.

Po metodologiji za gradnje poskusnih polj na javnih cestah (TSC 06.740 : 2003) naš odsek ni bil značilni odsek, niti klasično preizkusno polje, ampak opazovalni odsek. Opazovalni odseki predstavljajo del ceste, zgrajene po veljavnih predpisih in smernicah, na katerih se s strokovnimi metodami ugotavlja obnašanje gradbenih materialov in/ali način gradnje pod običajnimi gradbenimi in okoljevarstvenimi pogoji. V raziskavi smo izbrani opazovalni odsek imenovali opazovalno polje. Vzorčne prečne profile na opazovalnem polju smo imenovali »opazovalni prečni profili« (OPP).

OPP smo prvič posneli oktobra 2008 po končani izgradnji planuma spodnjega ustroja ceste in po zaprtju gradbišča ter pri tem na odkopni brežini označili referenčno točko (t. i. reper) za nadaljnje meritve relativnih višin površja (slika 25). Meritve smo ponovili maja 2009 po izdelavi nosilne plasti in junija po izdelavi obrabne plasti. Podrobnejši opis meritev prečnega profila v posameznem terminu podajamo v podpoglavju 5.2.5.3.



Slika 25: Spremljanje poteka izdelave nosilne plasti na opazovalnem odseku ceste »Bajs« z označeno referenčno točko opazovalnega prečnega profila na odkopni brežini (v krogu)

Figure 25: Monitoring bearing layer construction on one of the observational tracks at road »Bajs« with marked reference point for observational cross-section on cut slope (within the circle)

5.1.3 Transportno-gravitacijski enoti (TGE) Transport gravity units (TGU)

Za analizo prometnih obremenitev ceste smo uporabili po en karakterističen prečni profil gozdne ceste »Ravnik« in »Soteska« na robu dveh transportno-gravitacijskih enot (TGE). TGE je prostorsko zaokrožen predel gozda z enotno glavno smerjo izvoza lesa. Različne

TGE so lahko v prostoru fizično ločene (reke, avtoceste, grebeni), pogosteje pa so meje med njimi določene po merilih najmanjših transportnih stroškov. Slednje velja tudi v našem primeru. Pripadajoče TGE k izbranim cestama smo poimenovali TGE Ravnik in TGE Soteska. Njuni prostorski opredelitvi in logistične značilnosti podajamo v nadaljevanju.

5.1.3.1 TGE Ravnik

TGU Ravnik

TGE Ravnik se nahaja na jugozahodnem delu ljubljanskega gozdnogospodarskega območja, v občinah Logatec in Cerknica (priloga G). Zajema pretežni del gospodarske enote Ravnik, ki se nahaja zahodno od ceste Logatec–Laze in zajema izključno večnamenske državne gozdove. Podrobno razmejitev TGE Ravnik smo opravili skupaj z revirnim gozdarjem Mitjem Matičičem, ki dobro pozna prometne tokove, povezane z gospodarjenjem z gozdovi (Matičič, 2002).

Površina TGE Ravnik je 1113 ha in je z izjemo avtoceste in logarnice v celoti prekrita z gozdovi. Po podatkih gozdnogospodarskega načrta iz časa meritev (Gozdnogospodarski načrt ...Ravnik 2001-2010, 2001) v njej prevladujejo jelovo-bukovi gozdovi dinarskega tipa. V obdobju 2001–2010 je znašala povprečna lesna zaloga 324 m³/ha in prirastek 6,8 m³/ha/leto, kar je okoli 10 % nad slovenskim povprečjem. V TGE Ravnik je 27,8 km gozdnih cest. Javnih cest, primernih za odvoz lesa s površine TGE, ni. Odprtost gozdov s cestami je 25 m/ha, z vlakami je odprtih 98 % gozdnih površin. Celotno območje se nahaja na apneni geološki podlagi. Območje TGE Ravnik ni poseljeno, le v nekdanji logarnici prebivajo tri družine. TGE Ravnik je značilen primer končnega stanja prometnih tokov, ki izvirajo iz gospodarjenja z gozdovi in večnamenske rabe gozdov v širši okolici urbanih centrov.

5.1.3.2 TGE Soteska

TGU Soteska

TGE Soteska se nahaja na zahodnem delu novomeškega gozdnogospodarskega območja, v občinah Žužemberk in Dolenjske Toplice (priloga H). Po mnenju Ivana Pluta, vodje krajevne enote Podturn, kar 90 % površine gozdnogospodarske enote (GGE) Soteska gravitira na cesto »Soteska«. Prostorska razmejitev in izločitve 10 % površin GGE Soteska izven TGE Soteska ni bila izvedena, upoštevana pa je bila v obravnavi površin. Upošteva se taka izhodišča in podatke gozdnogospodarskega načrta iz časa meritev (Gozdnogospodarski načrt ... Soteska 2004-2013, 2004), znaša površina TGE Soteska 1669 ha. Od tega je 59,5 ha pragozda Pečka, kjer ni poseka in transporta lesa. TGE Soteska se dotika naselja Soteska, v sami enoti pa ni stalne poselitve. Gozdnatost je 99 %. Vsi gozdovi so v državni lasti

Republike Slovenije. V večnamenskih gozdovih prevladujejo bukovja (46 %), sledijo jim gozdovi bukve in jelke (21 %) ter gozdovi bukve in smreke (14 %). Povprečna lesna zaloga je v obdobju 2004–2013 znašala 381 m³/ha, povprečni prirastek pa 9,19 m³/ha/leto. V TGE Soteska je okoli 47 km cest, od tega 2 % javnih. Odprtost gozdov s cestami je 26 m/ha, z vlakami pa 109 m/ha. Matična podlaga enote je zelo homogena. Gradijo jo sivi apnenci z vložki zrnatega dolomita ter sivi in beli plastoviti apnenci, ki so nastali v geološki dobi krede. TGE Soteska je za 55 % večja od TGE Ravnik in ima za slabih 20 % višjo lesno zalogo. Z vidika geološke podlage in obstoječe odprtosti sta enoti primerljivi.

5.2 METODE TERENSKEGA IN LABORATORIJSKEGA DELA FIELD AND LABORATORY METHODS

5.2.1 Prometna obremenitev ceste Road traffic loading

Prometno obremenitev gozdnih cest smo v raziskavi merili z radarskimi števci Sierzega SR2, ki delujejo na principu odboja radarskega signala od kovine. Uporabljeni števci zaznavajo enosledna in dvosledna vozila. Iz trajanja in načina odboja signala merilnik določi smer vožnje, hitrost, čas prehoda ter dolžino vozila v decimetrih, s tem pa oceniti tudi vrsto vozila (osebno, kamion, kamion s prikolico).

Predpogoj za pridobitev uporabnih podatkov je pravilna montaža števca prometa na terenu. Ohišje števca je treba montirati v obcestnem prostoru in ga usmeriti pod kotom 30° proti cestni osi (slika 26). Za napajanje števca prometa je potreben 6V/12Ah akumulator.



Slika 26: Montaža števca prometa na cesti »Soteska« (levo) in komponente naprave (desno)

Figure 26: Installation of the traffic counter on the road »Soteska« (left) and parts of the device (right)

Ker smo razpolagali samo z dvema števcema prometa, smo ju namestili na dve cesti G2 na karbonatni podlagi. Prvi števec je beležil promet na začetku ceste »Ravnik«, drugi na začetku ceste »Soteska«. Slednje merilno mesto se je nahajalo v bližini žage v Soteski, njen lastnik pa nam je omogočil, da smo uredili kontinuirano napajanje tega števca iz kotlovnice žage.

Meritve prometa smo na obeh lokacijah izvajali v obdobju od 1. 1. 2009 do 31. 12. 2009. Menjave baterije števca prometa v Ravniku smo opravljali enkrat tedensko, v obdobju hladnejšega vremena pa na vsakih pet dni.

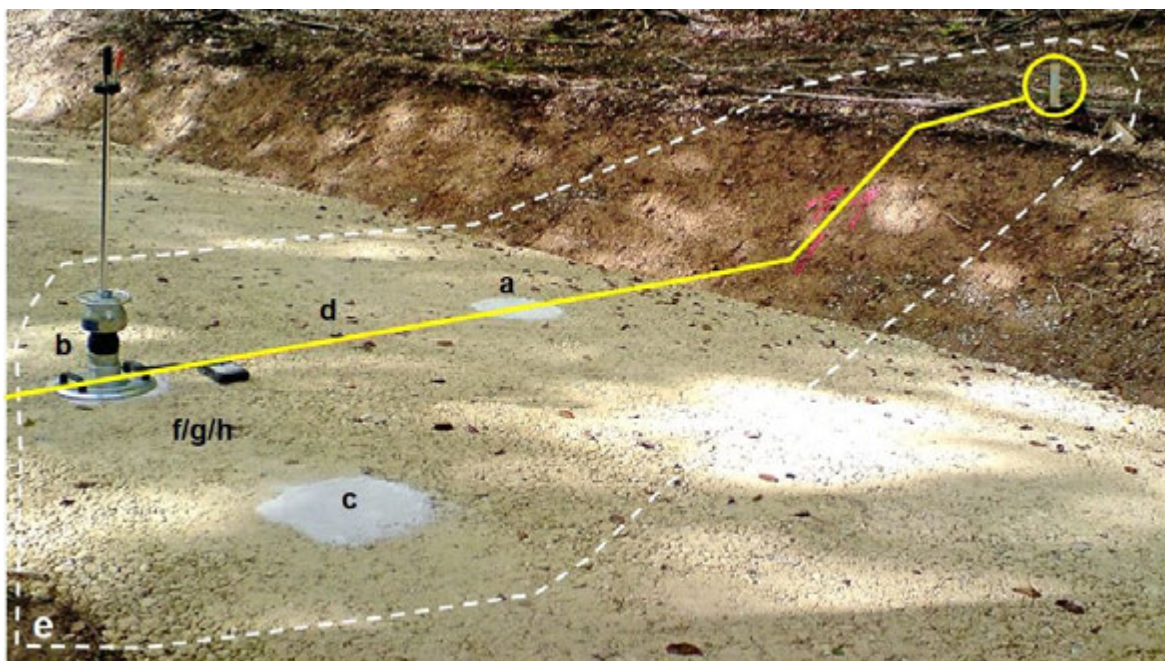
5.2.2 Nosilnost vozišča

Pavement bearing capacity

5.2.2.1 Merilna mesta za meritve nosilnosti

Measurement locations for bearing capacity measurements

108 prečnih profilov na zgrajenih prometnicah in 9 profilov na opazovalnem polju ceste v gradnji je predstavljalo linije, okoli katerih so bila razporejena merilna mesta za ugotavljanje nosilnosti. Lokacije merilnih mest (slika 27) so bile na vseh profilih enake.



Slika 27: Oznake mest za meritve nosilnosti, zgoščenosti in vlažnosti vozišča

Figure 27: Codes of locations for pavement bearing capacity, compactness and moisture measurements

Merilna mesta »a«, »b« in »c« so bila vedno uporabljena za meritve nosilnosti, pri čemer je bilo merilno mesto »a« vedno na kolesnici v raščenih tleh. Merilni mesti »d« in »e« sta bili

praviloma namenjeni meritvam vlažnosti, izjemoma tudi meritvam nosilnosti. Merilna mesta »f«, »g« in »h« predstavljajo lokacijo vzorčnega razkopa voziščne konstrukcije. Merilno mesto »g« je 20 cm pod merilnim mestom »f«, merilno mesto »h« pa 35 cm pod merilnim mestom »f«.

5.2.2.2 Protokol meritev dinamičnega deformacijskega modula

Measurement protocol for dynamic deformation module

Meritve nosilnosti smo na vsakem merilnem mestu izvedli posredno z ugotavljanjem elastičnih posedkov in dinamičnega deformacijskega modula E_{vd} . Za meritve elastičnih posedkov smo po predpisanem postopku (TSC 06.720 : 2003) uporabili dinamično obremenilno ploščo ZFG 02 nemškega proizvajalca ZORN (slika 27).

Dinamična obremenilna plošča tehta 32 kg in je sestavljena iz treh delov. Spodnji del predstavlja plošča premera 30 cm z vgrajenim akcelorometrom na vrhu lovilnega konusa. Zgornji del predstavlja vodilni drog s prožilom, po katerem drsi utež z lovilnim obročem mase 10 kg. Tretji del opreme je elektronski prikazovalec posedkov plošče in dinamičnega deformacijskega modula, ki v našem primeru ni imel spominske enote.

Protokol posamezne meritve je bi naslednji:

- površino merilnega mesta, na katerega je položen spodnji del naprave, smo izravnali s suho kalcitno mivko in po potrebi s krampom odstranili večji kamen;
- nataknilo smo zgornji del naprave in izvedli tri spuste uteži brez meritev, da je plošča dobro nalegala na podlago;
- priključili smo elektronski prikazovalec, izvedli tri spuste uteži ter iz prikazovalnika prepisali posamične posedke s_i (mm), povprečni posedek in iz njega izračunan E_{vd} (MN/m^2) po enačbi 3.

Meritve nosilnosti smo izvajali najmanj 24 ur po padavinah, v zimskem času smo sneg in led na merilnem mestu v celoti odstranili. Prav tako smo z vrtnarskimi škarjami odstranili posamezno korenino pod ploščo na voziščih vlak.

Posamezna ugotovljena vrednost E_{vd} je povprečje treh izmerjenih vrednosti posedkov krožne plošče po treh zaporednih sunkovitih obremenitvah. Ker je E_{vd} pri gradnji cest uveljavljena mera nosilnosti nevezanih zrnatih materialov, predstavlja glavno odvisno spremenljivko naše raziskave. Je izračunana vrednost, dejansko izmerjeno odvisno spremenljivko pa predstavlja elastični posedek podlage (v mm) pod krožno ploščo ob obremenitvi.

5.2.2.3 Dinamika meritev nosilnosti

Dynamics of bearing capacity measurements

Testiranje dinamične obremenilne plošče je potekalo od avgusta do decembra 2008, glavne meritve nosilnosti vozišč obstoječih prometnic smo izvajali od 1. 1. 2009 do 31. 12. 2009, manjši obseg meritev nosilnosti smo izvedli tudi leta 2014.

Pogostost meritev nosilnosti po posameznih objektih je bila zelo različna. Na cestah »Soteska« in »Ravnik« so meritve nosilnosti potekale enkrat mesečno. Na vseh ostalih cestah so bile meritve nosilnosti načrtovane enkrat v vsakem letnem času, na vlakah pa enkrat v sušni in enkrat v vlažni dobi.

Meritve nosilnosti na testnem polju ceste v gradnji so potekale od septembra 2008 do konca junija 2009. Prve meritve nosilnosti so bile narejene v suhem vremenu jeseni 2008, ponovljene pred začetkom izdelave zgornjega ustroja aprila 2009, po koncu izdelave nosilne plasti ter ob predaji ceste v uporabo poleti 2009.

Med izvajanjem raziskave so se pokazale potrebe po dodatnih meritvah nosilnosti na cestah »Ravnik«, »Čutarovka«, »Strešni« in »Planinca«. Spomladi 2014 smo izvedli ponovitve meritev nosilnosti na grajenih vlakah.

5.2.3 Vsebnost vlage v voziščni konstrukciji

Moisture content in the pavement

Vsebnost vlage v tleh oziroma vlažnost voziščne konstrukcije na mestu obremenitve je eden ključnih dejavnikov, ki vplivajo na njeno nosilnost, zato smo mu posvetili veliko pozornosti. Vlažnost voziščne konstrukcije smo ugotavljali na dva načina: z gravimetrično metodo in z izotopskim merilnikom. V obeh primerih smo izračunali vsebnost vlage, ki pomeni masni delež vode glede na masni delež suhe snovi (m.-%). Glede na uporabljeno metodo bomo v raziskavi razlikovali gravimetrično vlažnost in izotopsko vlažnost vozišča. Pri obeh metodah bomo pojem vlažnosti uporabljali kot sinonim za vsebnost vlage.

5.2.3.1 Gravimetrična vlažnost

Gravimetric moisture

Gravimetrično vlažnost vgrajenih materialov v voziščno konstrukcijo smo določali s porušnimi vzorci (vlažne) mase 1,5–2,5 kg, ki smo jih v odvisnosti od namena uporabe izkopali na merilnem mestu **d** ali **f** na globini 0–10 cm, na merilnem mestu **g** na globini 20

cm oziroma na mestu **h** na globini 35 cm. Terensko opremo za odvzem gravimetričnih vzorcev prikazuje slika 28. Protokol določanja gravimetrične vlažnosti je bil naslednji:

- na terenu smo na izbranem merilnem mestu izkopali na površini 20 x 20 cm okoli 12 kg materiala in ga enakomerno razporedili v kvadratno leseno škatlo;
- na PVC-vrečo z maso **em** smo napisali šifro vzorca, ki je bila kombinacija kode objekta, številke profila, merilnega mesta in termina odvzema;
- z dvakratnim žrebom smo izbrali četrtno materiala, ki smo jo ročno presejali skozi sito 22,4 mm, odsejek pa prestregli v pladenj, ga pretresli v PVC-vrečo in oboje takoj stehali z natančnostjo 0,1 g ter dobili vrednost **VVem**;
- sito z odsejkom smo takoj stehali, dobili vrednost **SZ** (skelet) in material zavrgli;
- ob povratku s terena smo vzorec pretresli na ALU-pladenj in ga v pripravljalnici vzorcev zračno sušili vsaj 30 dni;
- zračno suhe vzorce z izrazitimi grudami in velikim delež glinastih delcev smo ročno zdrobili v keramični terilnici ter sušili v sušilniku pri 105 °C 24 ur, nato pa znova stehali kot **DP** ter bodisi shranili v 1000 ml prahovke za sejalo analizo bodisi v PVC-vreče za arhiv;
- vzorcem smo gravimetrično vsebnost vlage v odstotku suhe mase vzorca (m.- %) izračunali po enačbi 4.

$$V_g = \left[\frac{(VVem - em) - (SZ + DP)}{(SZ + DP)} \right] * 100\% \quad \dots(4)$$



Slika 28: Terenska oprema za odvzem in obdelavo gravimetričnega vzorca iz obrabnega sloja ceste

Figure 28: Field equipment for deprivation and processing of the gravimetric sample from the road wearing course

5.2.3.2 Izotopska vlažnost voziščne konstrukcije

Neutron gauge moisture content of the road pavement

Preiskave vlažnosti voziščne konstrukcije je na šestih profilih cest »Ravnik«, »Čutarovka«, »Strešni« in »Planinca« izvedlo podjetje PMA, preiskave meritve, analize in inženiring d. o. o. Uporabili so izotopno sondo TROXLER 3440 in »backscatter« postopek, skladno z predpisano metodologijo (TSC 06.711 : 2001), ki daje povprečno vrednost vlažnosti med površjem in globino okoli 0,5 m. Meritve so bile opravljene na merilnih mestih **a**, **d**, **c** in **e** (slika 29, slika 27).



Slika 29: Meritve vlažnosti z izotopsko sondo na cesti »Čutarovka«

Figure 29: Moisture measurements using neutron gauge on the road »Čutarovka«

Postopek posamezne meritve na izbranem profilu je bil naslednji:

- premik na izbrani profil, vklop in ogrevanje izotopske sonde (5 minut),
- izravnava podlage na merilnih mestih s kalcitno mivko,
- nastavitev merilnih parametrov na izotopski sondi,
- vklop izotopske sonde in odmik od vira sevanja, 30-sekundna meritev,
- rotacija sonde za 180° in ponovitev meritve,
- prepis ugotovljenih vlažnosti z zaslona naprave v snemalni obrazec;
- premik na naslednje merilno mesto na profilu.

5.2.4 Prečni naklon in prečna ravnost vozišča Carriageway transverse slope and evenness

Ob popisu cestišč izbranih novih cest smo na vsakem značilnem prečnem profilu izmerili dva prečna naklona: od sredine vozišča proti odkopni brežini ter od sredine vozišča proti nasipni brežini. Za izmero posameznega prečnega naklona smo uporabili 1,5 m dolgo leseno lato, na katero je bil pritrjen kotomer s kotvastim grezilom (slika 30). Za odčitek naklona v stopinjah je bilo treba lato zvrniti, pri čemer se je kotvasto grezilo naslonilo na kotomer in obmirovalo. Izbrana dolžina late je ustrezala polovični širini vozišča gozdne ceste.

Za določanje prečne ravnosti vozišča smo uporabili modificiran postopek z letvijo (TSC 06.610 : 2003). Uporabili smo letev za določanje prečnega naklona (dolžine 1,5 m), pod katero smo na vsaki strani vozišča ugotovili največjo neravnost v mm. Za mero neravnosti smo šteli vsoto obeh največjih neravnosti. Med meritvami prečne ravnosti smo s klinometrom Sounto izmerili tudi naklon nivelete v procentih na območju ± 5 m od značilnega prečnega profila.



Slika 30: Oprema za meritve dimenzij cestišča ter prečnega naklona in prečne ravnosti vozišča

Figure 30: Equipment for roadway dimension, carriageway transverse slope and road evenness measurement

5.2.5 Zgradba voziščne konstrukcije gozdne ceste

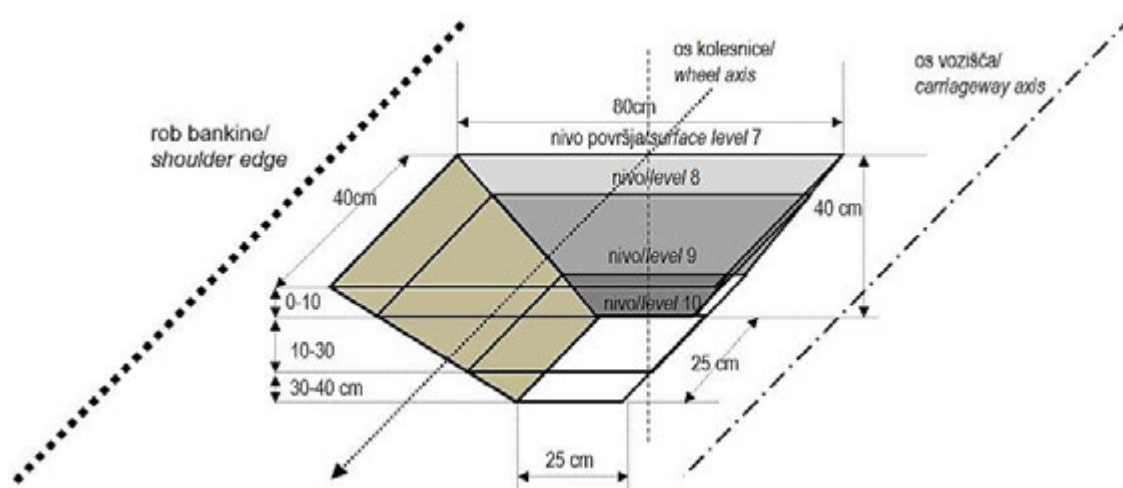
Structure of a forest road pavement

5.2.5.1 Vzorčni izkopi na analiziranih gozdnih cestah

Sampling pits on the analysed forest roads

Voziščna konstrukcija je tudi pri gozdnih cestah sestavljena iz več plasti. Vsako plast sestavlja material določene debeline in določenih lastnosti. Najboljšo podobo o voziščni konstrukciji na danem mestu dobimo z izkopom gradbene jame prečno na cestišče do globine raščenih tal. To zahteva gradbene stroje, kar je presegalo možnosti naše raziskave.

Namesto gradbene jame smo v sušnem obdobju konec avgusta 2009 za vsako proučevano gozdno cesto ročno izkopali dva testna izkopa na kolesnici, ki sta se nahajala na nasipni strani mešanega profila (slika 31 in slika 32). Lokaciji vzorčnih izkopov smo izbrali naključno iz nabora KPP na značilnih odsekih.



Slika 31: Oblika in dimenzije vzorčnega izkopa (siva stena izkopa je vertikalna)

Figure 31: Shape and dimensions of a sampling pit (grey wall of the pit is vertical)

Izdelava posameznega vzorčnega izkopa je potekala po naslednjem zaporedju:

- lociranje profila na terenu, označitev ploskve nivoja 7 s sprejem,
- parkiranje terenskega vozila in zavarovanje začasnega »gradbišča«,
- meritev nosilnosti na nivoju 7,
- zagon kompresorja in izkop plasti 0–10 cm z dletom HILTI, izmet zgornje plasti,
- prenos 8 kg materiala plasti 0–10 cm v predal, četrtinjenje in pakiranje vzorca okoli 2 kg materiala s skeletom brez tehtanja (»odvzem materiala«),
- meritev nosilnosti na nivoju 8,
- izkop do nivoja 9, vmes odvzem materiala plasti 10–30 za analize;
- meritev nosilnosti na nivoju 9,

- izkop do nivoja 10, odvzem materiala plasti 30–40, pospravo vzorcev in plošče,
- označitev plasti v profilu s sprejem, izmera debeline plasti in slikanje prekopa,
- zasutje prekopa, pospravo orodja in opreme ter premik na naslednji profil.

5.2.5.2 Debelina plasti voziščne konstrukcije na vzorčnih izkopih

Pavement layer thickness on the sampling pits

Po končanem izkopu in zaključeni meritvi nosilnosti na nivoju 10 (globina 40 cm) smo s sprejem označili morfološko različne plasti v voziščni konstrukciji. Merilno lato smo postavili ob vertikalno steno izkopa ter izmerili debeline označenih plasti (slika 32). Po končani izmeri smo vsak izkop še slikali, nato pa ga zasuli s predhodno izkopanim materialom.

Za en vzorčni izkop smo porabili v povprečju 50 minut, za meritve nosilnosti, odvzem vzorcev, izmero debeline plasti in fotodokumentiranje pa še okoli dve uri.



Slika 32: Izvedba vzorčnega izkopa (A) in popisa notranje morfologije voziščne konstrukcije (B)

Figure 32: Realization of the sampling pit (A) and the pavement inner morphology survey (B)

5.2.5.3 Debelina vgrajenih plasti zmesi zrn pri gradnji ceste

Thickness of the placed unbound granular materials during road construction

Tekom gradnje gozdne ceste »Bajs« smo na opazovalnem odseku na devetih profilih spremljali pripravo spodnjega ustroja, vgradnjo nosilne in obrabno-zaporne plasti ter dokončno oblikovanje vozišča. Meritve oblike planuma cestišča smo opravili s pomočjo gradbene late in laserskega nivelirja, ki smo ga vgradili na terensko vozilo (slika 33).

Na posameznem profilu smo pred začetkom del na odkopni in na nasipni brežini vgradili referenčni količek ter izmerili azimut prečnega profila z busolo Sounto. Neposredno pred meritvijo oblike cestišča smo po tleh označili točke postavljanja late na vsake pol metra horizontalne razdalje od referenčnega količka na odkopni brežini. Terensko vozilo smo parkirali dva metra od oznak na profilu in vključili rotirajoči nivelir. Po samohorizontiranju nivelirja smo najprej izmerili višino med količkom na odkopni brežini in nivojem nivelirja, nato pa oddaljenosti ravnine nivelirja do vseh točk na profilu. Relativne višine smo beležili na 5 mm natančno. Pri tem smo si pomagali z laserskim detektorjem (slika 33, desno), saj v večini primerov snopa laserskega nivelirja na lati ni bilo mogoče videti.

Za preračune relativnih višin posameznih serij meritev v absolutne in prikaze zaporednih nizov meritev smo uporabili računalniški program, ki smo ga razvili za spremljanje oblik cestišča (Robek in sod., 1999).



Slika 33: Oprema za meritve oblike cestišča (levo) in postopek merjenja višin (desno)

Figure 33: Tools for carriageway shape measurements (left) and procedure of height reading (right)

5.2.6 Zrnavost materialov voziščne konstrukcije

Particle size distribution of the road pavement materials

5.2.6.1 Izbor in priprava vzorcev za sejalne analize

Selection and preparation of samples for sieving analysis

Vzorci materiala za sejalne analize so bili na terenu ročno presejani skozi sito 22,4 mm. Gre za porušene vzorce nevezanih plasti različnih plasti voziščnih konstrukcij dvanajstih cest in šestih vlak. Vzorci so bili izkopani za določitev gravimetrične vlažnosti ali pa odvzeti tekom vzorčnih izkopov na analiziranih gozdnih cestah.

Vzorci, ki so vizualno izkazovali velik delež glinastih ali sprijetih delcev, smo pred sejanjem ročno strli s terilnikom. Vzorce, ki so imeli nenavadne primesi (kosti, vijaki, hrošči), smo izločili. Za posamezne vzorce nosilnih plasti cest na peščenjakih (objekta »Zlaka« in »Lipovec«) oziroma material nosilne plasti ceste v gradnji (objekt »Bajs«) smo morali tudi po končanem sejanju odsejke s sit 8,0 mm in 16,0 mm še enkrat drobiti v terilnici in jih znova presejati. Organskih ostankov (vejic, semen) iz vzorcev nismo izločali.

Ker je masa suhega vzorca presegala dovoljene količine za obremenitev sit, smo posamezen vzorec razdelili na podvzorci (mase do 1,0 kg) in zanje izvedli posamezen cikel sejanja.

5.2.6.2 Sejalni protokol in izračun parametrov zrnivosti

Sieving protocol and calculating the gradation parameters

Postopek suhega sejanja smo izvedli skladno z osnovno različico standarda SIST EN 933-1:2012 (2012) za vzorce, ki ne vsebujejo delcev premera nad 31 mm. Suho sejanje posameznega podvzorca nevezanih zmesi zrn voziščnih konstrukcij smo izvedli s stresalnikom FRITSCH Analysette 22 po naslednjem protokolu:

- sestavimo stolp sit premera 200 mm in naslednjimi stranicami odprtih mreže (od zgoraj navzdol): 16 mm, 8,0 mm, 2,0 mm, 1,0 mm, 0,250 mm in 0,063 mm, kateremu sledi lovilna posoda za presejek skozi zadnje sito;
- na zgornje sito stresemo vzorec materiala in sita dobro pričvrstimo s pokrovom in trakovi na stresalniku;
- na stresalniku nastavimo interval »1 s«, sejalni čas »5 min.«, amplituda »2,5 mm«;
- po stresanju odsejke na posameznih sitih skupaj s siti stojimo z laboratorijsko tehtnico na 0,1 g, stojimo še končni presejek z lovilno posodo ter meritve in šifro vzorca zapišemo na vnosni obrazec;
- odsejke in končni presejek znova stresemo v 1000 ml prahovko, čvrsto zapremo pokrov in vzorec shranimo;
- po vsakem končanem tehtanju iz mreže sit z odprtinami do 1 mm mehansko odstranimo zagozdene delce, mreže drobnejših sit pa spijamo s kompresorjem.

Poleg predstave masnih odstotkov presevkov skozi posamezna sita na pollogaritemskem grafikonu smo za analitično obdelavo večjega števila sejalnih analiz ugotovili premer zrna pri 10 %, 30 % in 60 % presevka (d_{10} , d_{30} , d_{60}) ter izračunali koeficient enakomernosti C_u in koeficient zrnivosti C_c po enačbah (1) in (2).

5.3 NAČRT VZORČNIH POSKUSOV NON-EXPERIMENTAL DESIGN

Meritve posedkov, E_{vd} in vsebnosti vlage na karakterističnih prečnih profilih znotraj značilnih odsekov izbranih skupin analiziranih grajenih gozdnih prometnic so omogočale kompleksno proučevanje sočasnega vpliva več dejavnikov. Pred meritvami smo zasnovali serijo vzorčnih poskusov, pri katerih poskusov fizično ne izvedemo, ampak opazovane enote s takimi lastnostmi naključno izberemo iz proučevane populacije (Kotar, 2011: s.354).

Z vzorčnimi poskusi smo preverjali vpliv dejavnikov na eno odvisno spremenljivko, zato smo za analize poskusov uporabili tehnike enovariantne statistike. Odvisna spremenljivka je bila nosilnost, posedek ali vlažnost. To so zvezne numerične spremenljivke, zato smo uporabili metode parametrične enovariantne statistike, kjerkoli je to bilo dopustno.

Preglednica 2 prikazuje načrt vzorčnih poskusov za preizkus razlik v povprečni vrednosti odvisne spremenljivke glede na vplivne dejavnike. Prevladujejo tehnike analize variance. Za členitev virov variabilnosti smo uporabili splošni linearni model (Field, 2013). Za raziskavo pomembne vplivne dejavnike (faktorje) smo delili na slučajne in fiksne. Neželene faktorje smo za vse vzorčne enote držali na enakem nivoju ali pa jih randomizirali.

Preglednica 2: Načrtovani vzorčni poskusi za preverjanje domnev o nosilnosti gozdnih prometnic

Table 2: Planned non-experimental designs for forest thoroughfare bearing capacity assumption validation

Problem in odvisna spremenljivka Problem and dependent variable	Vzorčni poskus Non-experimental design	Št. obravnavanj No. of treatments
Pomladanska nosilnost skupin vlak Spring bearing capacity of skid trail groups	Večfaktorski Factorial	2 x 3 2 x 3
Pomladanska nosilnost glavnih cest Spring bearing capacity of primary roads	Večfaktorski Factorial	2 x 2 2 x 2
Pomladanska nosilnost odsekov stranskih cest Spring bearing capacity of secondary road sections	Večfaktorski Factorial	10 x 3 10 x 3
Mesečne spremembe nosilnosti glavnih cest Monthly variations in bearing cap. on primary roads	T-test odvisni vzorci T-test dependent samples	1 x 2 1 x 2
Spremembe nosilnosti skupin vlak po petih letih Bearing cap. variations on skid trails after five years	Večfaktorski - ponovitve Repeated factorial	2 x 3(R) 2 x 3(R)
Sezonske spremembe nosilnosti glavnih cest Seasonal variations in bearing cap. on primary roads	Večfaktorski - ponovitve Repeated factorial	4 x 3(R) 4 x 3(R)
Sezonske spremembe nosilnosti stranskih cest Seasonal variations in bearing capacity on sec. roads	Večfaktorski - ponovitve Repeated factorial	4 x 3(R) 4 x 3(R)
Spremembe nosilnosti pri gradnji ceste Variations in bearing cap. during road construction	Večfaktorski Factorial	4 x 2 4 x 2
Sezonske spremembe vlažnosti cest Seasonal variations in moisture content	Enofaktorski Oneway	1 x 4 1 x 4
Spremembe nosilnosti vozišča po nevihti Variations in carriageway bearing capacity after storm	Večfaktorski Factorial	3 x 2 3 x 2

5.4 METODE OBDELAV PODATKOV DATA PROCESSING METHODS

V raziskavi smo zbirali zelo različne terenske in laboratorijske podatke. Z izjemo podatkov radarskih števecv prometa smo vse ostale podatke beležili na papir. Za poenoten vnos vseh terenskih meritev na karakterističnih in opazovalnih prečnih profilih ter pripadajočih meritev smo izdelali enoten obrazec, kjer smo imeli zbrane vse podatke za posamezen profil. Nekoliko zastarelo tehniko smo uporabili, ker smo za različne znake zbirali podatke z namenom analize časovnih vrst. Izguba podatkov za en termin bi lahko bila usodna za celotno analizo.

Za obdelavo podatkov vzorčnih poskusov in oblikovanje grafičnih rezultatov analiz variance smo uporabljali licenčni programski paket STATISTICA for WINDOWS (v.12). Za urejanje podatkov, oblikovanje grafičnih izdelkov in pisanje besedila smo uporabili licenčni programski paket Microsoft (MS) OFFICE 2010 in 2013.

Prenos podatkov iz obrazca v baze MS Excel smo opravili s pomočjo makrojev, razvitih za ta namen. V programu MS Excel smo opravili tudi večino kontrol podatkov, osnovne statistične obdelave s pomočjo vrtilnih tabel ter izrise korelacijskih grafikonov. Program MS Excel smo uporabili tudi za izrise in analize oblike cestišč.

Za obdelavo podatkov prometne obremenitve smo razpolagali z računalniškim programom, vendar smo ga uporabili le za pretvorbo podatkov v bazo MS Excel, vse obdelave pa opravili s programom MS Excel.

Fotografije so bile obdelane z licenčnim programom ADOBE PHOTOSHOP CS, končno podobo slikovnega gradiva pa smo oblikovali s programom MS PowerPoint.

6 REZULTATI

RESULTS

6.1 PROMETNA OBREMENITEV GLAVNE GOZDNE CESTE

TRAFFIC LOADING OF PRIMARY FOREST ROAD

6.1.1 Umeritev radarskih merilnikov prometa

Calibration of the radar traffic detectors

Celoletne meritve prometa smo izvedli z dvema radarskima merilnikoma prometa na dveh prečnih profilih glavnih gozdnih cest v državnih gozdovih. Izbrana profila se nahajata na robu zaprtih transportno-gravitacijskih enot (TGE) Ravnik oziroma TGE Soteska, zato ju bomo v nadaljevanju imenovali profil Ravnik in profil Soteska.

Ker nismo imeli izkušenj z radarskimi meritvami prometa, smo na profilu Ravnik pred začetkom strnjenega obdobja merjenja izvedli kalibracijo merilnikov, po končanih meritvah pa kontrolne meritve vozil z znano dolžino.

Pogoji za postavitev radarskih merilnikov na naših profilih so precej odstopali od deklariranih zahtev. Lokaciji obeh merilnih profilov sta bili v rahli krivini in na naklonu nivelete vozišča okoli 8 %. Na profilu Ravnik smo ohišje radarskega merilnika pritrdili na deblo posušene jelke, na profilu Soteska pa na ograjo ob cesti. V obeh primerih sta bili oddaljenosti merilnika od cestne osi manjši od predpisane, odstopanja od dejanskih dolžin vozil pa pričakovana.

Na profilu Ravnik smo izvedli kalibracijo merilnikov in primerjalne meritve vozil z znano dolžino. Kalibracijo radarsko določenih dolžin smo izvedli z osebnim vozilom Renault Clio, katerega dejanska dolžina je znašala 3,82 m. Kalibracija je potekala tako, da smo se z istim vozilom vozili na šest različnih načinov mimo radarskega merilnika. Širina vozišča na mestu meritev je bila 3,8 m. Za vsak način vožnje smo izvedli šest ponovitev. Načini so bili:

- po sredini vozišča v smeri A,
- po sredini vozišča v nasprotni smeri B,
- pol metra proti zunanjemu robu vozišča (stran od merilnika) v smeri A ($A + 0,5$),
- pol metra proti zunanjemu robu vozišča (stran od merilnika) v smeri B ($B + 0,5$),
- pol metra proti notranjem robu vozišča (proti merilniku) v smeri A ($A - 0,5$),
- pol metra proti notranjem robu vozišča (proti merilniku) v smeri B ($B - 0,5$).

Na mestu kalibracije merilnikov smo po končanih meritvah izvedli sočasno opazovanje in radarske meritve dolžin sodobne gozdarske transportne kompozicije (GTK, slika 34). Na predelu Ravnik je v času kontrolnih meritev prevažal les vlačilec MANTGX s polprikolico

MAX290. Skupna dolžina opazovane GTK brez tovora je bila 16,24 m. Polno naložena je bila daljša, a dodatnih dolžin vozil v gibanju ni bilo mogoče meriti. Ocenjena dodatna dolžina je bila med 1,0 in 1,7 m. Kontrolne meritve smo izvedli na dva načina, vsakega s po šestimi ponovitvami, od česar so bile tri v eno smer in tri v drugo. Načina sta bila:

- vožnja po sredini vozišča pri standardnem kotu merilnika 30 stopinj,
- vožnja po sredini vozišča pri merilniku, usmerjenem 50 stopinj glede na os vozišča.



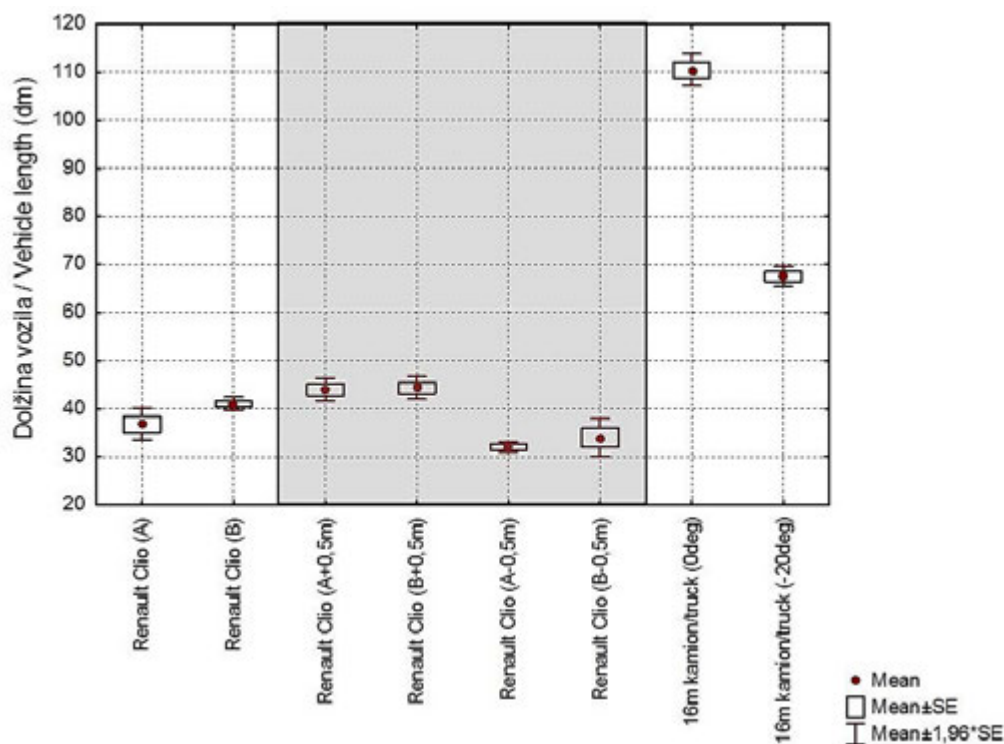
Slika 34: Gozdarska transporta kompozicija brez tovora med zaznavo vozila

Figure 34: Forestry transport composition without load during vehicle detection

Rezultate kalibracije in primerjalnih meritev dolžin za profil Ravnik prikazuje slika 35. Razlike med srednjimi vrednostmi dolžin vozila Renault Clio so glede na način vožnje značilno različne ($p < 0,005$). Naknadna analiza varianc je pokazala, da se izmerjena dolžina pri vožnji po zunanjem robu značilno razlikuje od vožnje po notranjem robu, razlike med smerjo vožnje (A, B) znotraj posamezne strani vožnje so statistično neznačilne. Ugotovitev je pomembna za širša vozišča in ožja vozila. V našem primeru to zadeva osebna vozila, katerih vpliv na prometno obremenitev gozdnih cest je manjši. Velika vozila so širša, zato njihova vožnja po vozišču prečno manj variira in je taka napaka dolžine vozila nebitvena.

Nepojasnjena ostaja neznačilna razlika v dolžini pri različni smeri vožnje, ki se pojavlja tudi pri GTK. Tam je bila dolžina praznega kamiona v smeri A (navzgor) pogosto celo krajša od

polno naloženega kamiona v nasprotni smeri (navzdol). Tudi te razlike so majhne, zato smo se osredotočili na glavni vir napak dolžine dolgih vozil, ki izvira iz nastavitve kota merilnika glede na os ceste.



Slika 35: Viri napak meritev dolžine prometnega merilnika: smer vožnje (levo), lega na vozišču (sredina) in zasuk ohišja merilnika glede na os ceste (desno)

Figure 35: Sources of length errors of traffic detector: direction of driving (left), position on carriageway (middle), and rotation of the instrument regarding the road line (right)

Primerjalne meritve GTK so potrdile velik vpliv nastavitve kota radarja glede na os ceste (slika 35, desno). Že sorazmerno majhen zasuk kota merilnika v veliki meri vpliva na dolžine in praktično onemogoča razvrščanje zaznanih vozil v skupine. Načelno je merilnik med meritvami fiksno pritrjen, pri dolgotrajnih meritvah pa lahko pride do sprememb. To se je zgodilo tudi nam, ko je na profilu Soteska sredi julija 2009 prišlo do zamika kota merilnika. Merilnik je bil na tem mestu zelo izpostavljen (slika 26, podpoglavje 5.2.1). Zamik smo opazili ob jesenskem prenosu podatkov, vrednosti dolžin so od premika dalje neuporabne.

Primerjalne meritve dolžin GTK so pokazale tudi močno podcenjeno povprečno dolžino GTK pri standardnem kotu merilnika (slika 35, desno). Ta je bila kar za dobrih pet metrov krajša od dejanske dolžine in je nakazovala težave pri razvrščanju vozil v skupine, ki je za določitev dejanske prometne obremenitve bistvena.

Z namenom, da bi povečali zanesljivost razvrščanja vozil v standardne skupine za določitev prometne obremenitve, smo ob koncu raziskave izvedli dodatne kontrolne meritve dolžin tipičnih vozil, ki se pojavljajo na gozdnih cestah. Zabeležili smo smeri vožnje in dolžine solo kamionov, kombijev za prevoz delavcev na teren, različna osebna vozila in adaptirane kmetijske traktorje (slika 36) ter zanje pridobili podatke o pravih dolžinah.



Slika 36: Značilna vozila na merilnem profilu Ravnik v času meritev prometa leta 2009

Figure 36: Typical vehicles on the test cross-section Ravnik during the traffic measurements in the year 2009

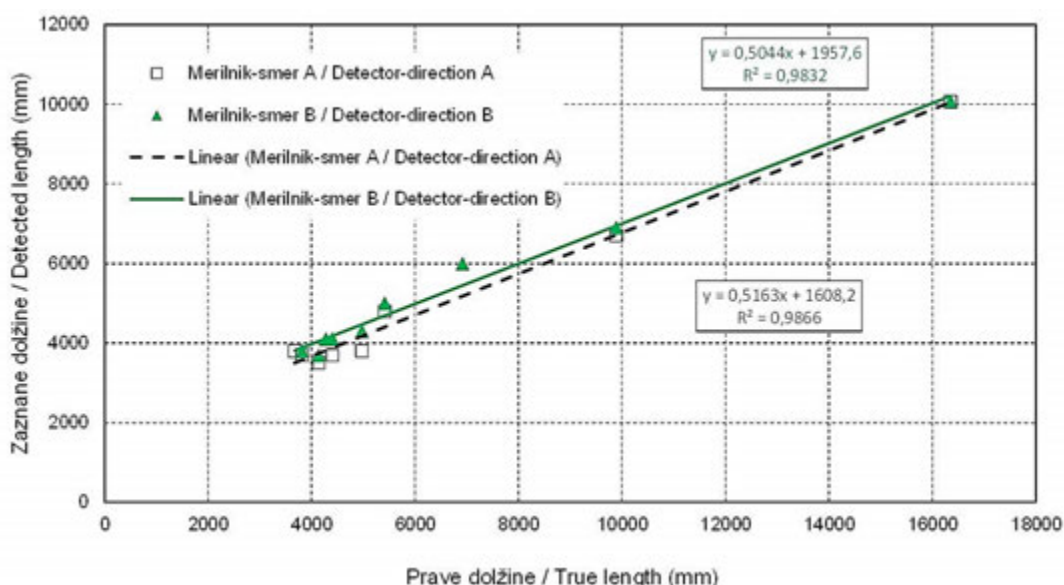
Ugotovljena korelacija med zaznanimi in dejanskimi dolžinami vozil tekom kontrolnih meritev (slika 37) kaže, da je za obe smeri vožnje zveza med znakoma premo sorazmerna in statistično značilna. Odstopanja verjetno izvirajo iz krajše oddaljenosti merilnika od osi.

Upošteva neznailne razlike glede na smer vožnje tekom kalibracije merilnika (slika 35), smo meritve posameznih smeri združili in izračunali potenčno regresijsko odvisnost (enačba 5) za kalibracijo zaznanih dolžin na merilnem profilu Ravnik. Linearna funkcija pri zelo majhnih in zelo velikih vrednostih ni dala logičnih vrednosti. Enačba 5 velja le za dejansko postavitve radarskega merilnika na profilu Ravnik v letu 2009.

$$L_{cor} = 0,4223 * L_{det}^{1,2608} \quad \dots (5)$$

L_{cor} – korigirana dolžina vozila (mm)/corrected length of vehicle (mm)

L_{det} – zaznana dolžina vozila (mm)/detected length of vehicle (mm)



Slika 37: Korelacija med dejanskimi in zaznanimi vrednostmi dolžin opazovanih vozil na profilu Ravnik po nastavitvah merilnika iz leta 2009 (N = 9)

Figure 37: Correlations between true and detected lengths of the observed vehicles on the test cross-section Ravnik according to the detector setting from 2009 (N = 9)

Meritev dolžin vozil na profilu Soteska nismo korigirali. Kjer primerjamo podatke obeh merilnikov, smo uporabili nekorigirane dolžine in te intervale dolžin za skupine vozil¹⁹:

- 1N (008–024 dm): kolesa, motorna kolesa;
- 2N (025–054 dm): osebna vozila, kombiji, traktorji brez prikolic;
- 3N (055–084 dm): osebna vozila in traktorji s prikolicami, lahki in srednje težki kamioni;
- 4N (085–160 dm): težki kamioni, vlačilci s prikolicami in polprikolicami.

6.1.2 Obseg, struktura in dinamika prometa na profilih Ravnik in Soteska Extent, structure and dynamic of the traffic on Ravnik and Soteska cross-sections

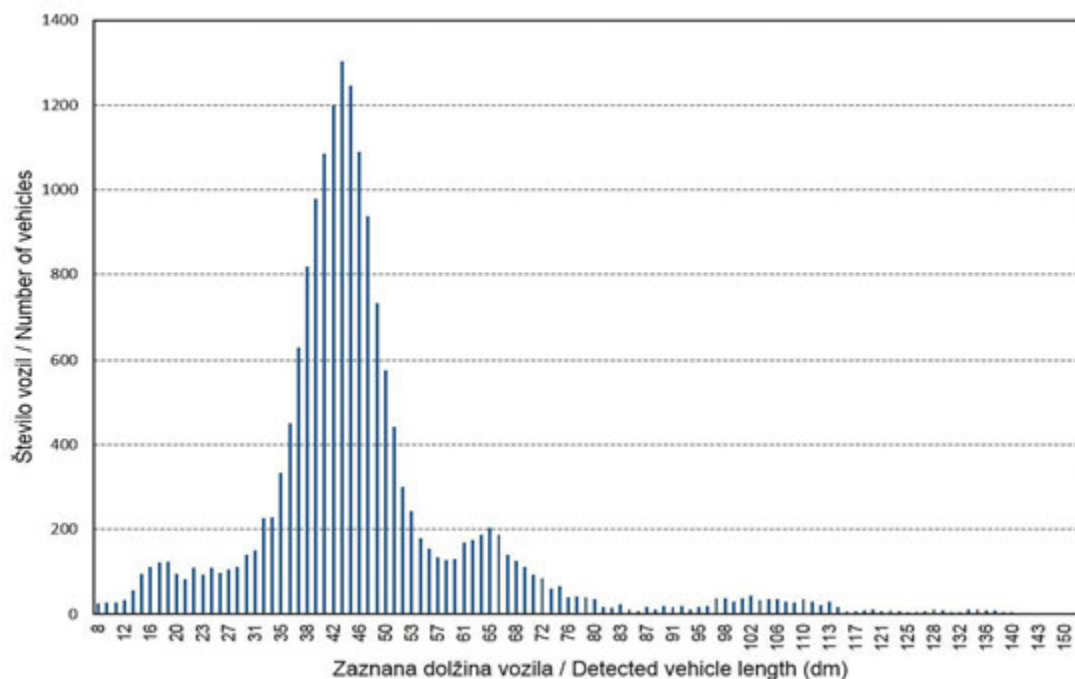
Na profilu Ravnik smo v času raziskave zabeležili skupno 18.707 vozil, na profilu Soteska pa 1.717 vozil. Strnjene meritve prometa so potekale na obeh profilih od 1. 1. 2009 do 31. 12. 2009. Na profilu Ravnik smo v času strnjenih meritev zabeležili skupno 17.809 vozil, na profilu Soteska pa 1.613 vozil.

¹⁹ Imena skupin z nekorigiranimi dolžinami bomo označevali z indeksom N, imena skupin s korigiranimi dolžinami pa z indeksom K.

Na profilu Soteska smo v letu 2009 imeli podatke o prometu za skupno 76 dni. Od tega je bilo 43 dni s podatki za cel dan in 33 dni z delnimi podatki za dan. Od celodnevni meritev prometa je bilo 857 vozil zabeleženih v 29 delovnih dnevih in 375 vozil v 14 nedelovnih dnevih. Med nedelovne dneve smo šteli vse sobote, nedelje in praznike, ki so bili izven sobot in nedelj. V letu 2009 je bilo od 365 dni nedelovnih dni 111.

Vzrok za majhno število zajetih podatkov na profilu Soteska ni bil v obsegu prometa, pač pa v težavah z zagotavljanjem napajanja merilnika. Meritve prometa z radarskim merilnikom zahtevajo tedensko menjavo baterij. To smo v času strnjenih meritev izvajali na profilu Ravnik, na profilu Soteska pa smo merilnik priključili preko usmernika na električno omrežje bližnje žage. Ob vmesnem prenosu podatkov (maja 2009) se je pokazalo, da števec zaradi prevelike polnilne napetosti ni deloval pravilno. Po ureditvi napajanja smo z meritvami nadaljevali do konca novembra. Takrat smo ugotovili, da je bilo ohišje merilnika premaknjeno in smo z meritvami na profilu Soteska prenehali.

Na profilu Ravnik smo v letu 2009 imeli podatke o prometu za skupno 309 dni (slika 38). Od tega je bilo 285 dni s podatki za cel dan in 24 dni z delnimi podatki za dan. Od celodnevni meritev prometa je bil 12.589 vozil zabeleženih v 201 delovnem dnevu in 4.942 vozil v 84 nedelovnih dnevih. Tudi v primeru merilnika prometa na profilu Ravnik smo imeli težave z napajanjem, saj so se baterije v mrazu ali ob večji frekvenci prometa praznile hitreje.



Slika 38: Frekvenčna porazdelitev dolžin vozil na profilu Ravnik v letu 2009

Figure 38: Frequency distribution of the vehicle lengths on the cross-section Ravnik in year 2009

Slika 38 prikazuje za profil Ravnik frekvenčno porazdelitev vseh zabeleženih vozil po ugotovljenih dolžinah. Vidne so štiri kulminacije, ki nakazujejo različne skupine vozil na gozdnih cestah. Meje med njimi so zabrisane. Najkrajše zaznano vozilo je bilo dolgo 8 dm, najdaljše pa 157 dm. Najvišja frekvenca vozil je bila v razredu 42 dm, kar v grobem ustreza dolžini vozila VW Golf (upoštevaje korekcijo iz prejšnjega poglavja).

Preglednica 3 prikazuje osnovne značilnosti strukture prometa na profilu Ravnik. Izbrani so spomladanski, poletni in jesenski teden v letu 2009 ter primerljivi spomladanski teden v letu 2014. Uporabljene so nekorrigirane dolžine vozil in uvrstitev v skupine, kot so bile predstavljene v prejšnjem poglavju. Izbrani tedni s celodnevni meritvami so:

- teden W20 (pomlad): leta 2009 od 10. do 16. maja; v letu 2014 od 11. do 17. maja;
- teden W26 (poletje): leta 2009 od 21. do 27. junija;
- teden W44 (jesen): leta 2009 od 25. do 31. oktobra.

Preglednica 3: Obseg in struktura prometa za štiri tedne na profilu Ravnik (A: iz gozda; B: v gozd)

Table 3: Traffic scale and structure for four weeks on the cross-section Ravnik (A: out; B: into forest)

Termin/Term	Motor/Motocycle			Avto/Car			Tovornjak/Truck			Priklopnik/Truck&tr			ΣAB
	A	B	A+B	A	B	A+B	A	B	A+B	A	B	A+B	
2014:Pomlad/Spring	38	12	50	196	216	412	5	11	16	81	82	163	641
Nedelja / Sunday	8	4	12	21	15	36		1	1				49
Ponedeljek / Monday	4		4	18	22	40		1	1	9	11	20	65
Torek /Tuesday	9	2	11	27	35	62		1	1	10	11	21	95
Sreda / Wednesday	3	2	5	16	17	33	1	2	3	10	8	18	59
Četrtek / Thursday	4	2	6	40	46	86				24	26	50	142
Petek / Friday	6	2	8	40	46	86		2	2	24	20	44	140
Sobota / Saturday	4		4	34	35	69	4	4	8	4	6	10	91
2009:Pomlad/Spring	22	7	29	245	244	489	30	44	74	21	18	39	631
Nedelja / Sunday	4		4	28	25	53	4	4	8				65
Ponedeljek / Monday	1	1	2	24	20	44	2	1	3		1	1	50
Torek /Tuesday	3	1	4	22	28	50	4	5	9	4	4	8	71
Sreda / Wednesday	1		1	27	30	57	4	5	9	6	6	12	79
Četrtek / Thursday	5	1	6	28	31	59	7	10	17	2	2	4	86
Petek / Friday	2	1	3	42	40	82	7	9	16	5	3	8	109
Sobota / Saturday	6	3	9	74	70	144	2	10	12	4	2	6	171
2009:Poletje/Summer	25	10	35	222	224	446	9	17	26	5	5	10	517
Nedelja / Sunday	8	3	11	26	29	55		1	1				67
Ponedeljek / Monday	4	2	6	28	27	55	1	4	5	1	1	2	68
Torek /Tuesday	2		2	32	20	52		1	1	2	1	3	58
Sreda / Wednesday	2	2	4	33	26	59					1	1	64
Četrtek / Thursday	3	2	5	35	24	59	5	5	10	1	1	2	76
Petek / Friday	1		1	32	31	63		3	3	1	1	2	69
Sobota / Saturday	5	1	6	36	67	103	3	3	6				115
2009:Jesen/Autumn	16	4	20	160	166	326	13	31	44	11	10	21	411
Nedelja / Sunday	3		3	17	15	32	1	3	4				39
Ponedeljek / Monday	3	2	5	21	20	41	3	8	11	5	4	9	66
Torek /Tuesday	2		2	33	32	65	3	3	6				73
Sreda / Wednesday	4	1	5	23	29	52	1	2	3				60
Četrtek / Thursday	2	1	3	28	28	56	3	4	7	3	3	6	72
Petek / Friday	1		1	25	26	51	1	4	5	3	3	6	63
Sobota / Saturday	1		1	13	16	29	1	7	8				38

Primerjava dveh spomladanskih terminov kaže na podoben skupni obseg prometa in bistveno večji obseg težkega prometa v letu 2014. Delež lahkih in srednjih tovornjakov je leta 2014 močno upadel, povečal se je delež težkih tovornjakov in priklopnikov. To deloma pripisujemo tehnološkemu napredku v razmiku petih let, deloma pa sanaciji žledoloma v januarju 2014, ki je močno prizadel GGE Ravnik²⁰. Primerjava obsega prometa v izbranih tednih treh letnih časov leta 2009 kaže, da je najmanj prometa zaradi prevozov lesa poleti, enkrat več ga je jeseni in trikrat več spomladi. Spomladi je tudi največ osebnih vozil. Skupno število vozil je najmanjše jeseni. Na območju Ravnika je veliko osebnih vozil tudi v nedeljo. Večina vozil, ki vstopa v GGE Ravnik (smer B), istega dne tudi izstopi. Prevozi lesa se opravljajo tudi ob sobotah, vendar le spomladi. Med delovnikom 2014 je bil povprečni dnevni promet 100 vozil, spomladi 2009 povprečno 80 vozil, poleti in jeseni 2009 pa okoli 67 vozil na dan. Pri tem je treba podariti, da gre za prehode, kar v primeru zaprtega območja praktično pomeni polovico manj vozil. Povprečna hitrost pri vožnji skozi profil je znašala 32 km/h, največja je bila pri osebnih vozilih (34 km/h), najmanjša pa pri motornih kolesih in kolesih (27 km/h).

Za iste tedne v letu 2009 kot za profil Ravnik smo zbrali podatke tudi za profil Soteska (preglednica 4). Tudi v tem primeru gre za podatke celodnevni meritev. Primerjava obsega prometa kaže, da je najmanj prometa zaradi prevozov lesa poleti. Tu je razlika še bolj izrazita kot na profilu Ravnik. V analiziranem poletnem tednu je v GGE Soteska prevladoval le osebni promet. Slednjega je veliko v vseh sezonah in posebej ob nedelovnih dnevih. Tudi na profilu Soteska je najmanjše skupno število vozil jeseni. Večina vozil, ki vstopa v GGE Soteska (smer B), istega dne tudi izstopi, a je pojav nekoliko manj izrazit kot v GGE Ravnik.

Spomladi 2009 je bil povprečni dnevni promet 38 vozil, poleti in jeseni 2009 pa okoli 25 vozil na dan. Povprečna hitrost pri vožnji skozi profil je znašala 28 km/h, največja je bila pri osebnih vozilih (30 km/h), pri motornih kolesih in kolesih pa le 13 km/h, kar nakazuje na večji delež koles v tej skupini. Povprečna hitrost kamionov (obe skupini in obe smeri) je znašala 23 km/h.

Primerjava prometa v preglednicah 3 in 4 kaže na podobne strukturne in sezonske značilnosti prometa po glavni gozdni cesti za obravnavana predela. Če upoštevamo razmerje velikosti med TGE Ravnik (1113 ha) in TGE Soteska (1722 ha) ter proizvodnost teh gozdov (Ravnik: 5,2 m³/ha/leto; Soteska: 6,8 m³/ha/leto) je skupni obseg prometa po številu na profilu Ravnik znatno večji od tistega na profilu Soteska. Ker nas zanima maksimalna prometna obremenitev glavne gozdne ceste, bomo v nadaljevanju izračunali prometno obremenitev odseka gozdne ceste št. 107, na kateri leži profil Ravnik.

²⁰ Izbrani teden je sovpadal z rokom za obvezno pospravo iglavcev (15. 5.).

Preglednica 4: Obseg in struktura prometa za štiri tedne na profilu Soteska (A: iz gozda; B: v gozd)

Table 4: Traffic scale and structure for four weeks on the cross-section Soteska (A: out; B: into forest)

Termin/Term	Motor / Motorcycle			Avto / Car			Tovornjak / Truck			Priklopnik / Truck&tr.			ΣAB
	A	B	A+B	A	B	A+B	A	B	A+B	A	B	A+B	
2009:Pomlad / Spring	12	13	25	73	85	158	21	30	51	28	34	62	296
Nedelja / Sunday	1	2	3	4	3	7	1	2	3	1		1	14
Ponedeljek / Monday	1		1	3	6	9		2	2	2	3	5	17
Torek / Tuesday		2	2	11	14	25	7	5	12	6	9	15	54
Sreda / Wednesday	1	2	3	9	9	18	2	2	4	4	6	10	35
Četrtek / Thursday	4	2	6	11	16	27	5	5	10	6	6	12	55
Petek / Friday		2	2	6	5	11	4	6	10	3	4	7	30
Sobota / Saturday	6	2	8	29	32	61	2	8	10	6	6	12	91
2009:Poletje / Summer	4	5	9	85	85	170	4	3	7	4	2	6	192
Nedelja / Sunday	2	1	3	23	18	41							44
Ponedeljek / Monday				9	7	16							16
Torek / Tuesday				5	7	12	1		1	3	2	5	18
Sreda / Wednesday		1	1	5	16	21				1		1	23
Četrtek / Thursday		1	1	19	17	36							37
Petek / Friday	2		2	13	13	26	2	3	5				33
Sobota / Saturday		2	2	11	7	18	1		1				21
2009:Jesen/Autumn	3	1	4	71	65	136	7	3	10	14	18	32	182
Nedelja / Sunday	2		2	10	10	20							22
Ponedeljek / Monday				7	7	14	1		1	2	3	5	20
Torek / Tuesday				6	6	12	1		1	2	1	3	16
Sreda / Wednesday				9	12	21	1	1	2	3	4	7	30
Četrtek / Thursday	1	1	2	9	7	16	2	2	4	7	8	15	37
Petek / Friday				11	10	21	2		2		2	2	25
Sobota / Saturday				19	13	32							32

6.1.3 Povprečni letni dnevni promet transportno gravitacijske enote Ravnik

Average daily traffic of the transport-gravity unit Ravnik

Obseg in struktura prometa sta predpogoj za določitev povprečnega letnega dnevnega prometa (PLDP), ki predstavlja na osnovi podatkov štetij prometa ovrednoteno povprečno dnevno število motornih vozil, ki so v določenem letu prevozila izbrani prečni profil. PLDP transportno-gravitacijske enote Ravnik predstavlja število vseh vozil, ki so vstopila na območje ali izstopila iz območja, merjeno na osrednji vstopni cesti v TGE. Merilno mesto smo poimenovali profil Ravnik.

Za izračun PLDP profila Ravnik smo bazo podatkov merilnika prometa dopolnili takole:

- z uporabo enačbe 5 smo preračunali zaznane dolžine vozil v korigirane dolžine;
- iz tehnične specifikacije TSC 06.500 (2009) za standardno izračunavanje prometne obremenitve smo privzeli reprezentativna vozila za kategorizacijo vozil;
- postavili smo naslednje meje korigiranih dolžin med kategorijami vozil:
 - o osebna vozila (vključno s kolesi in motorji): 0–54 dm,

- lahki in srednje težki kamion do 7 t nosilnosti (vključno s kombiji in traktorji s prikolicami): 55–79 dm,
- težki kamioni: 80–109 dm,
- vlačilci s prikolicami ali polprikolicami: 110 dm in več;
- vsakemu vozilu smo priredili kategorijo glede na njegovo korigirano dolžino;
- v izračun PLDP smo vzeli samo dneve s celodnevniimi podatki o prometu;
- za vsak zapis vozila smo določili letni čas ter delovni in nedelovni del tedna;
- letne čase v letu 2009 smo šteli takole: 20. 3.: prvi pomladni dan; 21. 6.: prvi poletni dan; 23. 9.: prvi jesenski dan in 22. 12.: prvi zimski dan;
- uporabili smo naslednje faktorje ekvivalentnosti: osebna vozila:0,00003; lahki in srednji kamioni: 0,12750; težki tovornjaki: 1,74900 prikoličarji: 3,01930.

Izračun PLDP za profil Ravnik smo izvedli v treh korakih. V prvem koraku smo nadgrajeno bazo merilnika prometa zgostili (preglednica 5). Na profilu Ravnik po številu v vseh letnih časih prevladuje osebni promet, tako med tednom kot tudi ob nedelovnih dnevih.

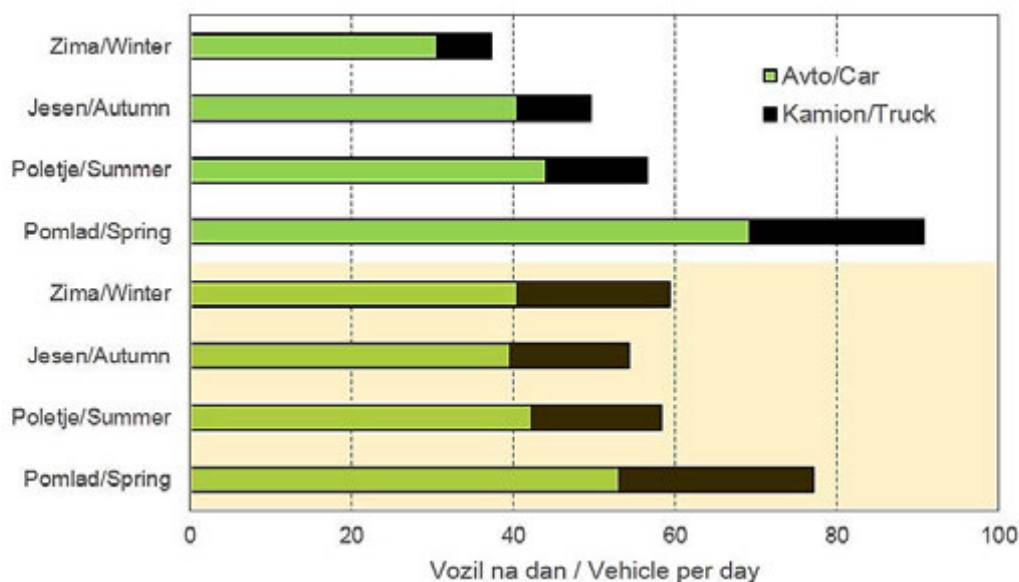
Preglednica 5: Obseg prometa na profilu Ravnik glede na letni čas, delovni teden in kategorijo vozil

Table 5: Traffic scale on the cross-section Ravnik according to the season, working week and vehicle class

Sezona/Season	Delovnik/Workday					Nedelovnik/Nonworkday				
	Dni Days	Avto Car	Kamion /Truck			Dni Days	Avto Car	Kamion /Truck		
			< 7 t	>= 7 t	Prikolica Trailer			< 7 t	>= 7 t	Prikolica Trailer
Pomlad/Spring	54	2865	872	189	235	22	1521	407	58	10
Poletje/Summer	41	1733	467	99	88	23	1014	235	42	8
Jesen/Autumn	49	1940	512	69	138	16	648	129	14	
Zima/Winter	57	2307	673	172	230	23	701	127	15	13
Skupaj	201	8845	2524	529	691	84	3884	898	129	31

V drugem koraku smo izračunali PLDP za posamezni del tedna in sezono (slika 39). Najvišji PLDP analiziranega profila je spomladi v nedelovnem delu tedna, ko presega 75 vozil/dan (v delovnem delu tedna celo preko 90 vozil/dan). V ostalih sezonah se PLDP giblje med 50 in 60 vozil/dan.

Z upoštevanjem razmerja med izmerjenimi celimi delovniki (ter ločeno izmerjenimi nedelovniki) ter vsemi delovniki (oz. nedelovniki) za posamezni letni čas smo dobili računsko količino 22.383 vozil, ki so prečkali profil Ravnik. Od tega je bilo 16.319 osebnih vozil, 4.358 lahkih in srednjih tovornjakov, 825 težkih tovornjakov ter 881 prikoličarjev.



Slika 39: Povprečni letni dnevni promet na Ravniku leta 2009 za delovne (zgoraj) in nedelovne dneve (spodaj)
Figure 39: Average daily traffic on cross-section Ravnik for working days (above) and non-working days (below)

V tretjem koraku smo za posamezno sezono izračunali povprečni PLDP, upoštevaje razmerje med delovnimi in nedelovnimi dnevi v sezoni ter na koncu izračunali aritmetično sredino sezonskih povprečij, sešteli kategorije in dobili vrednost PLDP 61,1.

6.1.4 Izračun prometne obremenitve za glavno gozdno cesto Ravnik

Calculation of the traffic loading on the primary forest road Ravnik

Prometna obremenitev je obremenitev, izražena s številom vozil (PLDP) ali številom prehodov nazivne osne obremenitve (NOO 100 kN) vozil, ki bodo prečila izbrani prerez ceste v izbrani dobi trajanja. Ugotovljeni PLDP je pričakovan, vendar za izračun prometne obremenitve gozdne ceste manj primeren, ker imajo težki tovornjaki nesorazmerno velik vpliv na utrujanje voziščne konstrukcije.

Razlikujemo ekvivalentno in merodajno prometno obremenitev (TSC 06.511 : 2009, 2009). Merodajna prometna obremenitev je značilna vrednost za prometno obremenitev voziščne konstrukcije enega voznega pasu **v načrtovani dobi trajanja**, določena na osnovi povprečnega letnega dnevnega prometa (števila vozil) in njegove rasti ter dodatnih vplivov in pomeni vsoto števila prehodov nominalne osne obremenitve (100 kN).

Ekvivalentna prometna obremenitev je izražena na dan, in sicer na osnovi PLDP. Za izračun ekvivalentne prometne obremenitve je potrebno izračunati vsoto ekvivalentnih prometnih obremenitev na dan, torej utežiti pomen posamezne skupine vozil. To naredimo s pomočjo faktorjev ekvivalentnosti reprezentativnih motornih vozil. Ekvivalentna prometna obremenitev je obremenitev, izražena z enakovrednim dnevnim številom prehodov nazivne osne obremenitve (NOO), ki je standardna nominalna obremenitev enojne osi vozila s 100 kN, ki se prenaša z dvojnimi kolesi (4 x 25 kN) na vozno površino.

Dnevno ekvivalentno prometno obremenitev profila Ravnik smo izračunali po enačbi (6), pri tem pa uporabili vrednosti PLDP za posamezno skupino vozil iz prejšnjega podpoglavja in priznane povprečne vrednosti faktorjev ekvivalentnosti za reprezentativna vozila, določene na osnovi induktivnih števecv prometa na javnih cestah (priloga I). Povprečni faktorji ekvivalentnosti upoštevajo v skupini 50 % vozil polno obremenjenih, 25 % polobremenjenih in 25 % praznih. Slednje dobro ponazarja vožnjo gozdarskih kamionov (prazne vožnje v gozd in večinoma polne iz njega).

$$T_d = \sum FE_v * n_v \quad \dots(6)$$

T_d – dnevna ekvivalentna prometna obremenitev (100kN)

FE_v – faktor ekvivalentnosti reprezentativnega motornega vozila

n_v – število motornih vozil določene vrste (reprezentativnih) na dan

Vrednost osnovne dnevne ekvivalentne prometne obremenitve profila Ravnik znaša 12,76 x 100 kN. Osnovno ekvivalentno prometno obremenitev gozdne ceste smo povečali za dodatne vplive širine prometnega pasu in naklona nivelete vozišča

Iz ekvivalentne prometne obremenitve profila Ravnik lahko izračunano merodajno prometno obremenitev (TSC 06.511 : 2009, 2009). Za vpliv širine prometnega pasu smo uporabili faktor 1,10, za naklon nivelete faktor 1,25. Zmnožek faktorjev znaša 1,375. Končna vrednost ekvivalentne prometne obremenitve profila Ravnik znaša 17,6 x 100 kN. To pomeni skoraj osemnajst sto kilo-Newtonskih obremenitev na dan, kar glede na prometno obremenitev uvršča profil Ravnik v razred zelo lahke ekvivalentne prometne obremenitve.

Merodajna prometna obremenitev se uporablja za dimenzioniranje novih ali obnovo obstoječih voziščnih konstrukcij. Pomeni skupno število ekvivalentnih prometnih obremenitev v načrtovani življenjski dobi voziščne konstrukcije, upošteva faktor povečanja prometa.

Če upoštevamo življenjsko dobo 20 let in 3 % letno rast prometa (faktor 28) enake strukture in dinamike, dobimo prometno obremenitev profila Ravnik v višini 179.872×100 kN oziroma 179.872 nazivnih osnih obremenitev. To je po merilih gradbene stroke zelo lahka merodajna prometna obremenitev.

6.2 NOSILNOST VOZIŠČ V SPOMLADANSKEM ČASU CARRIAGEWAY BEARING CAPACITY IN SPRING TIME

6.2.1 Značilnosti meritev nosilnosti na karakterističnih prečnih profilih Characteristics of bearing capacity measurements on typical cross-sections

6.2.1.1 Obseg izvedenih meritev nosilnosti in popis vplivnih dejavnikov

Extent of conducted bearing capacity measurements and influencing factor survey

Od septembra 2008 do maja 2014 smo na izbranih karakterističnih prečnih profilih (KPP) ugotovili skupno 1936 vrednosti dinamičnega deformacijskega modula E_{vd} , ki je posredna mera nosilnosti vozišča. Iz strukture zbranih podatkov nosilnosti (preglednica 6) je razvidno, da je bila večina meritev opravljena v letu 2009 na gozdnih cestah.

Preglednica 6: Obseg podatkov terenskih meritev nosilnosti, zbranih po štirih ciklih in njihova razporeditev glede na kategorije in starost prometnic ter geološko podlago na profilu (K – karbonat, M – mešano)

Table 6: Extend of collected field measurement for bearing capacity data in four campaigns and their distribution according to the road category, road age and geologic base on a cross-section (K – lime, M – mixed)

Ciklus meritev Data collection campaign	Skupaj Total	G2-glavne ceste G2-primary roads				G3-stranske ceste G3-secondary roads				V1-grajene vlake V1-skid trails			
		N-nove N-new		S-stare S-old		N-nove N-new		S-stare S-old		N-nove N-new		S-stare S-old	
		K	M	K	M	K	M	K	M	K	M	K	M
Predhodne meritve septembra 2008 Preliminary measurements in September 2008	63	12	24			27							
Osrednje meritve tekom leta 2009 Main measurements during 2009	1747	209	290	249	126	222	204	195	144	54			54
Dodatne meritve septembra 2009 Additional measurements in September 2009	72	6	6	6	6	12	12	12	12				
Dodatne meritve vlak v letu 2014 Additional skid trail measurements in 2014	54									27			27
Skupaj Total	1936	227	320	255	132	234	243	207	156	81			81

Kategorija prometnice, starost prometnice (januarja 2009), kategorija geološke podlage ter sezona merjenja, vrsta utrditve vozišča in merilno mesto znotraj KPP so bile za našo raziskavo pomembne osnovne neodvisne spremenljivke (faktorji). Ker smo zanje domnevali, da vplivajo na nosilnost, smo jih določili pri vsaki meritvi E_{vd} .

Poleg osnovnih faktorjev v nadaljevanju uporabljamo še izvedene in dodatne faktorje. Med izvedene faktorje uvrščamo kombinacije osnovnih faktorjev, ki smo jih oblikovali tekom analiz. Dodatna faktorja sta »odsek« in »profil«. Odsek je povezan z izborom merilnih mest nosilnosti in je vir določljive, a neželene variabilnosti E_{vd} znotraj obravnavanj.

Osnovni in izvedeni faktorji imajo v raziskavi značaj fiksnega faktorja, oba dodatna faktorja pa značaj slučajnega faktorja. Posamezno kombinacijo nivojev faktorjev v izbrani analizi imenujemo obravnavanje, vsa analizirana obravnavanja te analize pa množico obravnavanj.

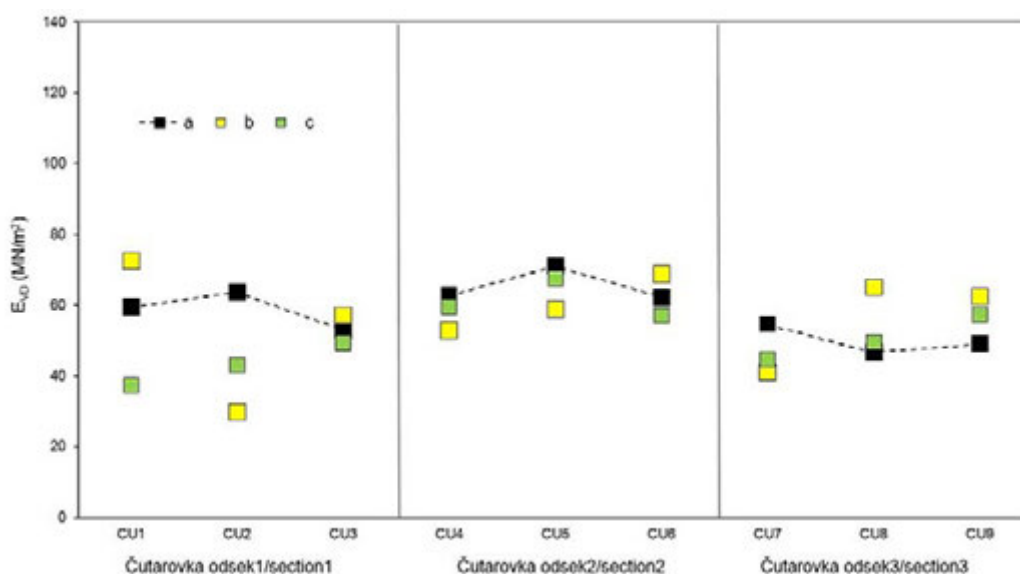
6.2.1.2 Viri variabilnosti nosilnosti znotraj obravnavanja

Sources of bearing capacity variations within the treatment

Od 21. do 31. marca 2009 smo na 108 KPP ugotovili 324 vrednosti E_{vd} . Na vsakem KPP smo izmerili E_{vd} vozišča na treh merilnih mestih (slika 27):

- enkrat v kolesnici na raščeni tleh (v nadaljevanju »na odkopu« oziroma mesto »a«),
- dvakrat v kolesnici na nasipu nasproti mesta »a« (»na nasipu« oziroma mesti »b« in »c«).

Slika 40 kaže del rezultatov tega termina. Nosilnost vozišča na odkopu variira manj kot na obeh merilnih mestih na nasipu. Razlike v nosilnosti med odseki, kot tudi znotraj odsekov analizirane ceste so izrazite. To še ne pomeni neodvisnost profilov znotraj odseka, prej velik vpliv individualnih dejavnikov, s katerim se srečujemo pri določanju nosilnosti vozišč.



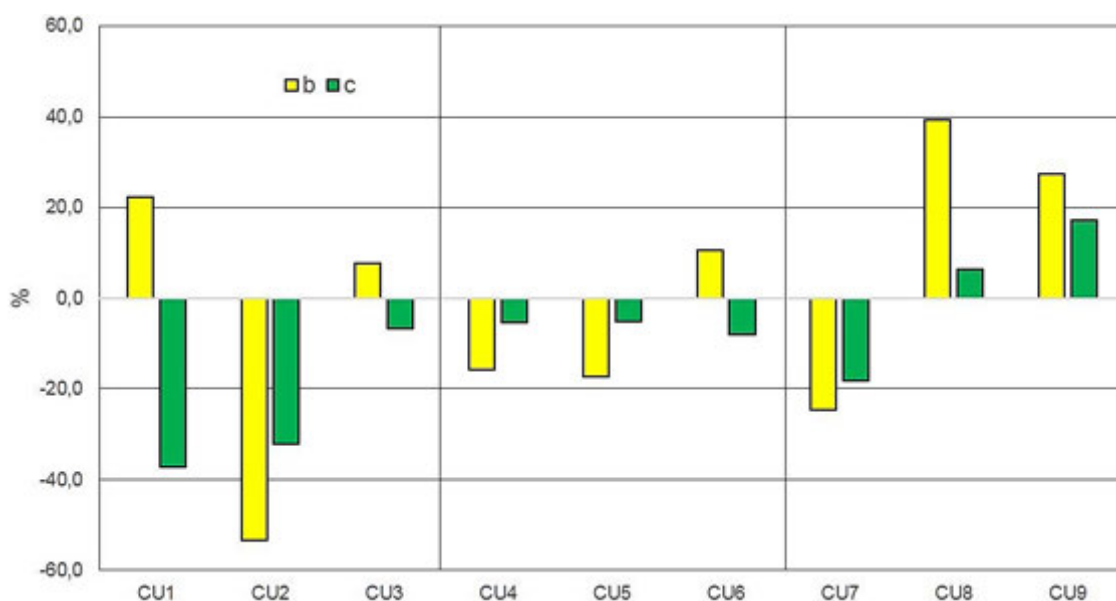
Slika 40: Posamezne vrednosti nosilnosti vozišča za tri merilna mesta (»a«, »b«, »c«) v slučajnem vzorcu devetih tipičnih prečnih profilov stranske gozdne ceste »Čutarovka«

Figure 40: Individual values of pavement bearing capacity for three measurement spots (»a«, »b«, »c«) in random sample of nine typical cross-sections on the secondary forest road »Čutarovka«

Na prikazanem primeru je koeficient variabilnost znotraj profila za spremenljivko E_{vd} večji, kot smo ga v povprečju ugotovili v pilotni fazi raziskave. Slednjo smo opravili jeseni 2008,

večinoma na starih cestah, z veliko količino akumulirane prometne obremenitve in z namenom določitve potrebnega števila ponovitev znotraj načrtovanih vzorčnih poskusov. Gozdna cesta »Čutarovka« (Planina pri Postojni; E14,27152°, N45,81994°), zgrajena poleti 2008, pa je primer s prometom neobremenjenega vozišča, kjer je nosilnost znotraj in med profili še zelo heterogena.

Odstopanje nosilnosti kolesnice v nasipu glede na nosilnost na odkopu je za profile s prejšnje slike prikazana na sliki 41. Na šestih od devetih profilov prevladujejo negativna odstopanja, kar pomeni nižjo nosilnost vozišča na nasipu.

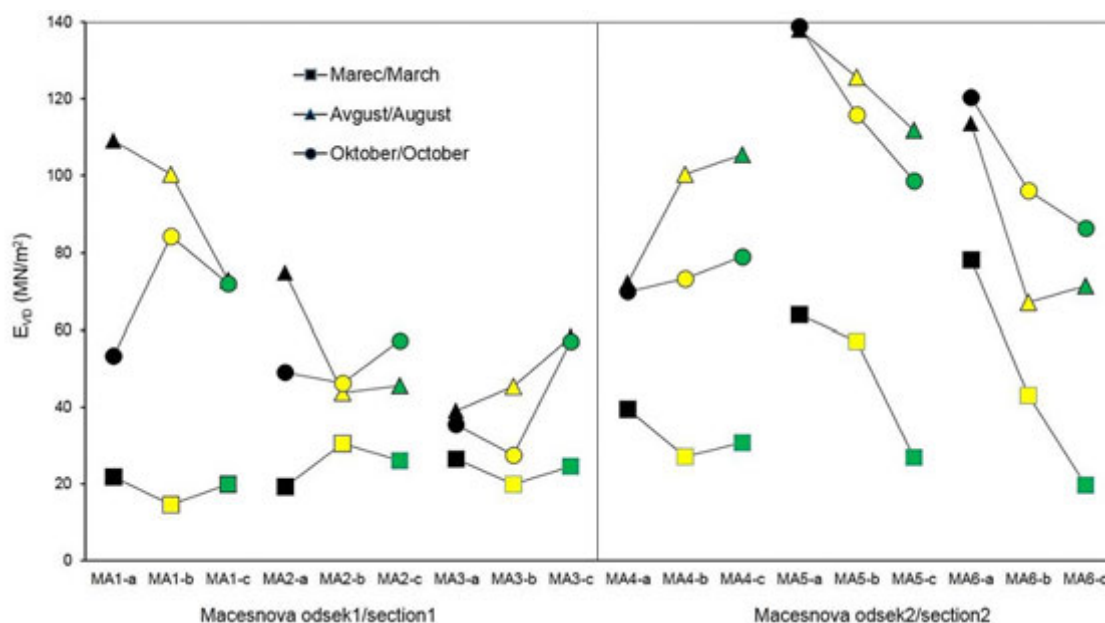


Slika 41: Odstotek odstopanja nosilnosti vozišča na nasipu od meritve na odkopu za devet profilov na novi stranski gozdni cesti »Čutarovka«

Figure 41: Percentage of deviation in carriageway bearing capacity on fill according to the measurements on cut side for nine cross-sections on the new secondary forest road »Čutarovka«

Prikazane meritve nosilnosti na devetih profilih gozdne ceste »Čutarovka« predstavljajo 60 % meritev spomladanskih meritev nosilnosti v obravnavanju »nove stranske gozdne ceste na karbonatni podlagi«. Preostalih 40 % meritev je bilo opravljenih na novi stranski gozdni cesti »Macesnova« v osrčju Kočevskega roga (E15,04263°, N45,69373°), zgrajeni jeseni 2008. Spomladanske meritve nosilnosti za šest tipičnih prečnih profilov na dveh odsekih te ceste so prikazane s kvadratnimi znaki (slika 42), barvne oznake pa so enake kot na sliki 40. Vrednosti spomladanske nosilnosti prvega odseka »Macesnove« so nižje od vrednosti nosilnosti odsekov »Čutarovke«, variabilnost drugega odseka »Macesnove« v spomladanskem času pa je še večja od variabilnosti odsekov »Čutarovke«.

Slika 42 prikazuje tudi vrednosti E_{vd} na gozdni cesti »Macesnova« v poletnem in jesenskem terminu leta 2009. Izrazito višje vrednosti nosilnosti so bile ugotovljene na drugem odseku v poletnem času, in to praviloma v kolesnici na odkopu. Vrednosti E_{vd} znotraj profila (vzorčne ploskve) so zelo različne, vendar je opazen nekoliko pogostejši trend padajočih linij od meritve na kolesnici v odkopu (črn kvadrat) v primerjavi z drugima meritvama na nasipu. To se sklada z rezultati na odsekih »Čutarovke« glede manjše nosilnosti vozišča na nasipu. Pojav je viden v vseh treh prikazanih sezonah.



Slika 42: Posamezne vrednosti nosilnosti vozišča za tri merilna mesta (črno – a, rumeno – b, zeleno – c) in tri sezone merjenj v vzorcu šestih prečnih profilov stranske gozdne ceste

Figure 42: Individual values of carriageway bearing capacity for three measurement spots (black – a, yellow – b, green – c) and three measurement periods in a sample of six typical cross-sections on a secondary forest road

Variabilnost nosilnosti za obravnavane nove stranske gozdne ceste na karbonatni podlagi v spomladanskem času je velika in izvira iz razlik med merilnimi mesti na profilu, med profili, med odseki in med cestami. Med opisanimi viri variabilnosti je pomembna razlika. Razlike med merilnimi mesti so za našo raziskavo vsebinsko pomembne. To pa ne drži za profile in odseke, saj smo jih izbrali tako, da bi zagotovili naključnost vzorčnih enot (profilov) v obravnavanju. V tej luči so odseki podvzorci. Variabilnosti, ki iz podvzorcev izvira, ne moremo zmanjšati z večanjem števila odsekov, lahko pa jo z načrtom poskusa izločimo iz nepojasnjene variance.

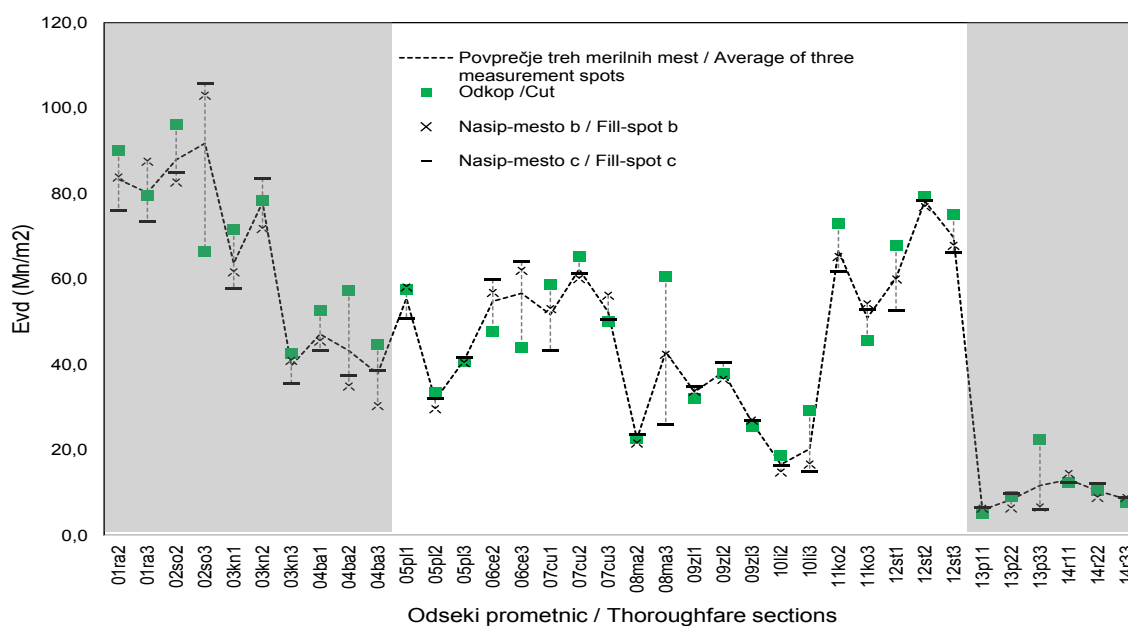
6.2.1.3 Merodajne vrednosti nosilnosti vozišča

Relevant values of carriageway bearing capacity

V določenem terminu merjenja imamo na posameznem profilu tri neposredno izmerjene vrednosti posedkov, zato lahko poleg individualnih vrednosti nosilnosti za vsak posamezen profil iz njih izračunamo tudi štiri izvedene vrednosti nosilnosti:

1. povprečje dveh meritev na nasipu,
2. povprečje vseh treh vrednosti na profilu,
3. povprečje nosilnosti z območja raščernih tal in ene vrednosti nosilnosti na nasipu,
4. povprečje nosilnosti z območja raščernih tal in druge vrednosti nosilnosti na nasipu.

Slika 43 prikazuje razlike v povprečnih vrednostih spomladanske nosilnosti po analiziranih odsekih za različice odvisne spremenljivke in njihovo povprečje. Raztros srednjih vrednosti izvedene odvisne spremenljivke med kategorijami prometnic je izrazit. Velik je tudi raztros med različno določenimi povprečnimi nosilnostmi v odseku. V vseh kategorijah prometnic so višje povprečne vrednosti nosilnosti večkrat dosežene v kolesnici na odkopu oziroma v raščernih tleh.



Slika 43: Razlike v povprečni spomladanski nosilnosti odsekov glede na vrsto merodajne vrednosti nosilnosti v profilu (levo – G2, sredina – G3, desno – V1)

Figure 43: Variations in average section bearing capacity in spring regarding the type of relevant bearing capacity value on the cross-section (left – G2, middle – G3, right – V1)

Katera od navedenih sedmih vrednosti nosilnosti najbolj korektno ponazarja nosilnost na profilu, je odvisno od namena analize. Mi bomo uporabljali štiri izvedene vrednosti nosilnosti in temu prilagodili tudi označevanje dinamičnega deformacijskega modula E_{vd} :

- EVDa – nosilnost vozišča na odkopu (ang. *pavement bearing capacity on cut*) je nosilnost vozišča na kolesnici, ki poteka po raščenem delu mešanega prečnega profila;
- EVDb – nosilnost vozišča na nasipu (ang. *pavement bearing capacity on fill*) je nosilnost vozišča na kolesnici, ki poteka po nasipnem delu mešanega prečnega profila in se nahaja nasproti merilnega mesta »a«,
- EVDbc – povprečna nosilnost vozišča na nasipu (ang. *average pavement bearing capacity on fill*) je srednja vrednost nosilnosti vozišča na kolesnici na mestih »b« in »c«,
- EVDabc – povprečna nosilnost profila (ang. *average cross-section bearing capacity*) je srednja vrednost vseh treh meritev nosilnosti vozišča na profilu v danem terminu.

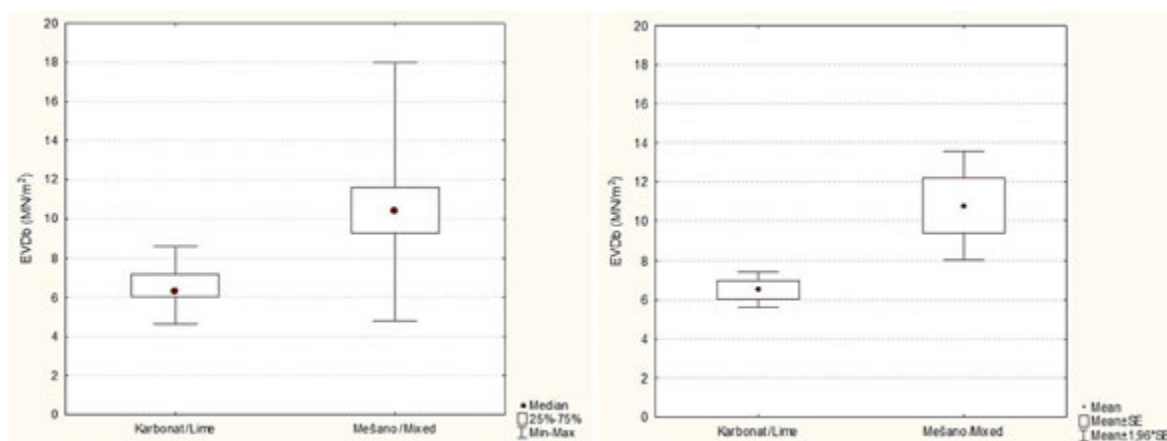
6.2.2 Povprečna spomladanska nosilnost vozišč na traktorskih vlakih

Average spring carriageway bearing capacity on tractor skid trails

Spomladi 2009 smo ugotovili nosilnost na devetih karakterističnih prečnih profilih na treh vlakih na karbonatni podlagi in na prav toliko profilih na mešani podlagi. Na vsakem profilu smo izmerili nosilnost na merilnih mestih »a«, »b« in »c«, skupno torej 54 vrednosti E_{vd} .

Pri grajenih vlakih voziščne konstrukcije ni. Vozna površina KPP je deloma na planumu temeljnih tal in deloma na nasipu, nastalem ob odkopu. Ker je material nasipa v celoti iz lokalne preperine, je na vlakih pričakovati največji vpliv geološke podlage na nosilnost vozne površine in smo temu dejavniku posvetili največ pozornosti. Ker smo obravnavali le dve podlagi (karbonat, mešano) smo značilnost razlik v povprečni nosilnosti med vrstama podlage najprej preverili s t-testom za neodvisne vzorce.

Ugotovljene nosilnosti na nasipu za merilno mesto »b« (kolesnica v nasipu) ter intervalne ocene srednjih vrednosti kažejo, da je porazdelitev nosilnosti po posameznem obravnavanju simetrična (slika 44, levo), povprečna nosilnost vlak na nasipu na mešanih podlagah pa je značilno višja ($p < 0,011$) od tiste na karbonatnih podlagah (slika 44, desno). Primerjava teh vrednosti z nosilnostjo novih stranskih cest v istem obdobju (slika 40 in slika 42) kaže, da so bile analizirane vlake v istem času štirikrat manj nosilne.



Slika 44: Porazdelitev spomladanskih nosilnosti vlak na nasipu (levo) in intervalna ocena njihovih srednjih vrednosti ($n = 9$) na dveh analiziranih geoloških podlagah (desno)

Figure 44: Distribution of the spring values of the pavement bearing capacity on fill (left) and interval estimation of their average values ($n = 9$) on two analysed geological basis (right)

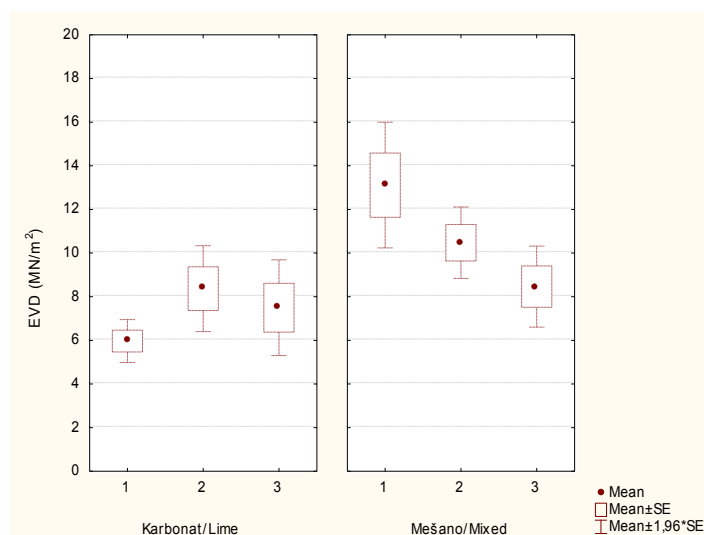
Upošteva vire variabilnosti, ki smo jih nakazali v prejšnjem podpoglavju, smo značilnost razlik v povprečni nosilnosti vlak podrobneje raziskali z dvofaktorskim vzorčnim poskusom. Prvi faktor je bil slučajni faktor »odsek«, drugi faktor pa fiksni faktor »MERILNO MESTO«. Prvi faktor je imel šest ravni (odsekov, izbranih naključno), drugi pa tri ravni (merilna mesta »a«, »b« in »c«). Množica obravnavanj je obsegala 18 obravnavanj, po posameznem obravnavanju smo imeli tri ponovitve. Pred izvedbo poskusa smo preverili pogoje za uporabo analize variance. Testi homogenosti varianc (Levene, Hartley, Cochran, Bartlett) niso pokazali statistično značilne nehomogenosti varianc osnovnih faktorjev, razkrili pa so nehomogenost varianc v interakcijskih skupinah. To je bilo pričakovano, saj smo imeli na nivoju interakcije le tri ponovitve po obravnavanju. Ker nismo pričakovali značilnih razlik na nivoju interakcij, smo izvedli analizo variance za postavljeni dvofaktorski poskus (preglednica 7). Razlike med povprečno nosilnostjo odsekov so statistično značilne. Faktor »MERILNO MESTO« in njegova interakcija sta statistično neznačilna.

Preglednica 7: Značilnost razlik povprečne spomladanske nosilnost vlak med analiziranimi odseki in merilnimi mesti (značilni vplivi so označeni krepko)

Table 7: Significance in average spring skid trail bearing capacity among analysed sections and measurement spots (significant factors are marked bold)

Vplivni dejavnik / Factor	d. f.	SS	MS	F	p
oo (Odsek /Section)	5	281,0470	56,2094	7,9991	0,00286**
MM (Mesto /Spot)	2	3,0560	1,5280	0,2175	0,80828
oo x MM (Interakcija / Interaction)	10	70,2698	7,0270	0,6699	0,74426
Ostane / Residual	36	377,6435	10,4901		

Odseki so pripadali vlakam na različnih podlagah. S testom mnogoterih primerjav (Scheffe) smo potrdili značilno odstopanje povprečne nosilnosti le na odseku št. 1 na mešani podlagi (slika 45).



Slika 45: Povprečja in intervalne vrednosti vseh meritev nosilnosti na odseku za analizirane vlake spomladi 2009

Figure 45: Averages and interval values for all bearing capacity measurement within the section on analysed skid trails in spring 2009

Rezultati dvofaktorskega poskusa ne potrjujejo značilnega vpliva podlage, kot smo ga ugotovili s t-testom za merilno mesto v kolesnici na nasipu (slika 44). To postavlja za zbrane meritve vpliv faktorja »PODLAGA« pri vlakah pod vprašaj. Na obeh podlagah smo merili nosilnost po končanem spravilu lesa in opravljeni poravnavi planuma. Nobenega od teh delovnih postopkov nismo opazovali in ne vemo, kakšen je bil njihov vpliv na planum vlake. Vlake na mešani podlagi so bile v času meritev starejše in domnevno večkrat uporabljene. Ne gre pozabiti, da je bilo število ponovitev po obravnavanjih zelo majhno. Vpliv vseh naštetih pomislekov je velik, vendar neznan. Ugotovljene povprečne vrednosti in značilnosti razlik med obravnavanji ne gre posploševati.

V tem terminu smo izmerili nekaj visokih vrednosti na merilnem mestu »a«, ki so posledica meritev na ali v bližini večjih delov zdrobljene kamnine. Premer največjega zrna je tam praviloma presegal 63 mm, kar je deklarirana meja za uporabo dinamične obremenilne plošče. V primeru vlak (včasih pa tudi na nosilnih plasteh gozdnih cest) pri tem ne gre za merilno napako in netipične vrednosti, pač pa za osnovno značilnost vozišč grajenih gozdnih prometnic. Takih meritev v obravnavi zato praviloma nismo izločili, čeravno so bistveno povečevale nehomogenost varianc. Izjema je bila ena spomladanska meritev nosilnosti vlak

na karbonatni podlagi, na merilnem mestu »a«, kjer smo ekstremno vrednost ($44,3 \text{ MN/m}^2$) v predstavljenih analizah, po usmeritvah v literaturi (Field, 2013), nadomestili s povprečjem nosilnosti na tem profilu ($6,5 \text{ MN/m}^2$).

6.2.3 Razlike v povprečni spomladanski nosilnosti vozišč na gozdnih cestah

Differences in average spring carriageway bearing capacity on forest roads

6.2.3.1 Povprečna nosilnost glavnih gozdnih cest

Average bearing capacity of primary forest roads

Glavne gozdne ceste so z vidika nosilnosti nasprotje grajenim vlakam. Med vsemi grajenimi, z naravnimi materiali utrjenimi vozišči, naj bi imele največjo nosilnost. To smo želeli preveriti tudi v svoji raziskavi. Načrtovali smo petnajst ponovitev (profilov) po obravnavanju. Ker imamo v Sloveniji osnovno omrežje glavnih gozdnih cest večinoma zgrajeno, je tovrstnih novogradenj danes malo. V letu 2008 sta bili v Sloveniji dograjeni le dve glavni gozdni cesti, zato smo morali v načrtovanih vzorčnih poskusih temu obsegu prilagoditi število ponovitev tudi v ostalih obravnavanjih.

Spomladi 2009 smo izmerili nosilnost vozišč na štirih glavnih cestah. Dve sta bili zgrajeni na karbonatni podlagi, dve pa na mešani. Od vsakih je bila ena nova, druga pa stara. Za vsako kombinacijo nivojev faktorjev smo imeli najmanj dva odseka s tremi profili, na vsakem profilu pa izmerjeno nosilnost na merilnem mestu **a**, **b** in **c**. Skupno smo zbrali 90 vrednosti E_{vd} . Za nadaljnje obravnave je bilo pomembno ugotoviti, ali so med odseki razlike v povprečni nosilnosti in ali je morda pri tej kategoriji merilno mesto pomemben vplivni dejavnik. Ker smo imeli za geološko podlago v skupini novih cest premalo podatkov, smo odseke združili v skupino starih odsekov (gradnja zaključena vsaj pred tremi leti) in skupino novih odsekov (gradnja končana v 2008) ter za vsako skupino izvedli ločen vzorčni dvofaktorski poskus. Faktor »odsek« je imel značaj slučajnega faktorja s petimi nivoji, pri čemer sta dva odseka pripadala prvi cesti, preostali trije pa drugi cesti. Faktor »MERILNO MESTO« je imel značaj fiksnega faktorja s tremi nivoji.

Rezultati dvofaktorskega poskusa za nove odseke glavnih gozdnih cest (preglednica 8) kažejo, da so aritmetične sredine nosilnosti med »odseki« statistično značilno različne ($p < 0,01$). Faktor »MERILNO MESTO« ni statistično značilen, značilna pa je interakcija med faktorjema. Aritmetične sredine vrednosti E_{vd} za odseke, koeficient variacije po obravnavanju in intervalne vrednosti pripadajočih aritmetičnih vrednosti za 5 % tveganje so prikazane v spodnjem delu preglednice 8. Ker sta prva dva odseka pripadala cesti na karbonatni podlagi, drugi trije pa cesti na mešani podlagi, smo z ustreznimi kontrasti

preverili značilnost razlik aritmetičnih sredin teh podskupin. Test značilnosti razlik za načrtovane primerjave je pokazal zelo visoko statistično značilnost razlik ($p < 0,0001$), višja nosilnost je bila na karbonatni podlagi. Pri vrednotenju tega rezultata je potrebna previdnost. Cesta »Bajs« (preglednica 8, cesta 2) je bila v času spomladanskih meritev v stanju nove, valjane in nevožene voziščne konstrukcije, cesta »Soteska« pa je bila vse od jeseni 2008 dnevno v uporabi. Ker odseki iste ceste niso značilno različni, lahko trdimo, da sta imeli analizirani cesti spomladi 2009 različno nosilnost. Razlik ne smemo pripisati različnim podlagam, saj bi za to potrebovali ponovitve na več cestah.

Preglednica 8: Značilnost razlik povprečne spomladanske nosilnost novih glavnih gozdnih cest glede na analizirane odseke in merilna mesta

Table 8: Significant differences in average spring bearing capacity on new primary forest roads regarding the analysed sections and measurement spots

Vplivni dejavnik / Factor	d.f.	SS	MS	F	p
oo (Odsek / Section)	4	24400,29	6100,07	10,60286	0,003**
MM (Mesto / Spot)	2	127,36	63,68	0,11068	0,897
oo x MM (Interakcija / Interaction)	8	4602,59	575,32	2,76934	0,020*
Ostanek / Residual	30	6232,43	207,75		
Obravnavanje / Treatment	n	AVE	CV	+1,96*SE	-1,96*SE
oo1 (cesta1) / oo1 (road1)	9	87,8	17,77	77,63	98,02
oo2 (cesta1) / oo2 (road1)	9	92,0	26,47	76,05	107,85
oo1 (cesta2) / oo1 (road2)	9	47,4	31,44	37,64	57,10
oo2 (cesta2) / oo2 (road2)	9	43,3	36,91	32,86	53,75
oo3 (cesta2) / oo3 (road2)	9	37,8	19,96	32,90	42,76

Rezultate dvofaktorskega poskusa za stare odseke glavnih gozdnih cest prikazujemo v preglednici 9. Faktor »odsek« je visoko statistično značilen ($p < 0,001$), medtem ko faktor »MERILNO MESTO« in njuna interakcija nista statistično značilna. Aritmetične sredine vrednosti E_{vd} , koeficient variacije po obravnavanju ter intervalne vrednosti pripadajočih aritmetičnih vrednosti za 5 % tveganje so prikazane v spodnjem delu preglednice 9. Prva dva odseka pripadata cesti »Ravnik« na karbonatni podlagi, drugi trije pa cesti »Knipajz« na mešani podlagi. Tudi v tem primeru je test značilnosti razlik za načrtovane primerjave pokazal statistično visoko značilnost razlik v aritmetičnih sredinah odsekov in tudi v tem primeru je višja nosilnost pripadla karbonatni podlagi. Test mnogoterih primerjav je pokazal, da od starih odsekov glavnih gozdnih cest značilno odstopa le odsek 3 na cesti 4 (»Knipajz«).

Preglednica 9: Značilnost razlik povprečne spomladanske nosilnosti starih glavnih gozdnih cest glede na analizirane odseke in merilna mesta

Table 9: Significant differences in average spring bearing capacity on old primary forest roads regarding the analysed sections and measurement spots

Vplivni dejavnik / Factor	d.f.	SS	MS	F	p
oo (Odsek / Section)	4	11731,73	2932,93	26,95056	0,000***
MM (Mesto / Spot)	2	374,03	187,02	1,71848	0,239
oo x MM (Interakcija / Interaction)	8	870,61	108,83	0,90978	0,522
Ostanek / Residual	30	3588,55	119,62		
Obravnavanje / Treatment	n	AVE	CV	+1,96*SE	-1,96*SE
oo1 (cesta3) / oo1 (road3)	9	83,6	11,47	77,35	89,88
oo2 (cesta3) / oo2 (road3)	9	80,1	14,49	72,48	87,64
oo1 (cesta4) / oo1 (road4)	9	63,5	14,10	57,67	69,37
oo2 (cesta4) / oo2 (road4)	9	77,6	18,43	68,22	86,90
oo3 (cesta4) / oo3 (road4)	9	39,6	24,34	33,30	45,90

Vsaka od štirih analiziranih glavnih cest je z vidika nosilnosti zgodba zase. Izstopata cesti na mešani podlagi, kjer smo z vidika nosilnosti ugotovili nehomogene odseke. Tekom meritev nosilnosti smo ugotovili, da odseki na cesti »Bajs« (cesta 2) z vidika podlage niso homogeni. Odsek 1 na cesti »Bajs« je zgrajen pretežno na dolomitu, medtem ko sta ostala dva odseka zgrajena na peščenjakih. Podobno smo tekom vzorčnih izkopov voziščnih konstrukcij ugotovili, da se profili tretjega odseka na cesti 4 nahajajo na območju neustrezne utrditve z geotekstilom (slika 46). Nosilnosti obeh odsekov sta bistveno odstopali od drugih v primerljivem obravnavanju. Ker smo imeli pri teh dveh cestah meritve nosilnosti za tri odseke, smo oba netipična odseka izločili iz nadaljnjih analiz.



Slika 46: Neustrezna voziščna konstrukcija tretjega odseka na gozdni cesti »Knipajz« (cesta 4 v preglednici 9)
Figure 46: Inappropriate pavement of the third section on the forest road »Knipajz« (road No. 4 in table 9)

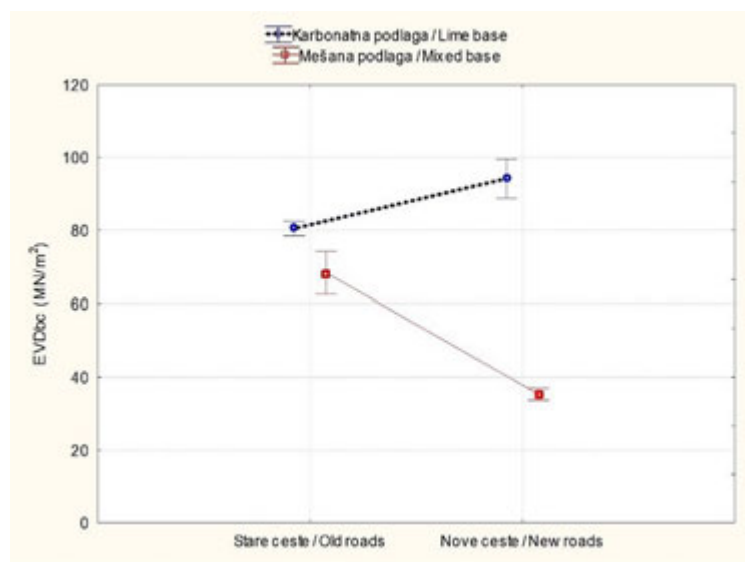
Po izločitvi netipičnih odsekov glavnih gozdnih cest na mešani podlagi nas je zanimala morebitna interakcija med faktorji »PODLAGA« in »STAROSTNI RAZRED«. Proučili smo jo s slučajnim dvofaktorskim poskusom, za odvisno spremenljivko smo izbrali povprečno nosilnost vozišča »EVD_{bc}«. V posameznem obravnavanju je bili šest ponovitev. Kljub temu da smo za odvisno spremenljivko uporabili povprečje dveh vrednosti nosilnosti na nasipu, variance zaradi majhnega števila ponovitev spet niso bile homogene. Ker smo imeli enako število ponovitev po tretmajih, smo upoštevali literaturo (Field, 2013), analizo variance izvedli brez transformacije odvisne spremenljivke (preglednica 10).

Preglednica 10: Razlike v spomladanski nosilnosti glavnih cest glede na starost in geološko podlago

Table 10: Differences in spring bearing capacity on primary roads regarding the age and geological base

Vplivni dejavnik / Factor	d.f.	SS	MS	F	p
PP (Podlaga / Base)	1	7556,176	7556,176	71,44144	0,000***
AA (Starostni razred / Age class)	1	565,157	565,157	5,34340	0,031*
PP x AA (Interakcija / Interaction)	1	3290,624	3290,624	31,11189	0,000**
Ostanek / Residual	20	2115,348	105,767		

Oba faktorja in njuna interakcija so statistično značilni (slika 47). Test mnogoterih primerjav je pokazal statistično značilne razlike med novimi cestami na mešani podlagi in ostalimi skupinami ter starimi cestami na mešani podlagi in novimi cestami na karbonatu.



Slika 47: Interakcije med geološko podlago in starostjo KPP na glavnih gozdnih cestah po 2 x 2 faktorskem vzorčnem poskusu za EVD_{bc} (glej tudi preglednico 10)

Figure 47: Interactions among geological base and road age for TCP on primary forest roads according to 2 x 2 factorial non-experimental design for EVD_{bc} (see also table 10)

Na rezultat je bistveno vplivala cesta na mešani podlagi (»Bajs«). Nosilnost analiziranih dveh novih glavnih cest je bistveno različna, nosilnost starih glavnih cest na obravnavanih podlagah je le nekoliko višja na cesti na karbonatni podlagi.

6.2.3.2 Povprečna nosilnost stranskih gozdnih cest

Average bearing capacity of secondary forest roads

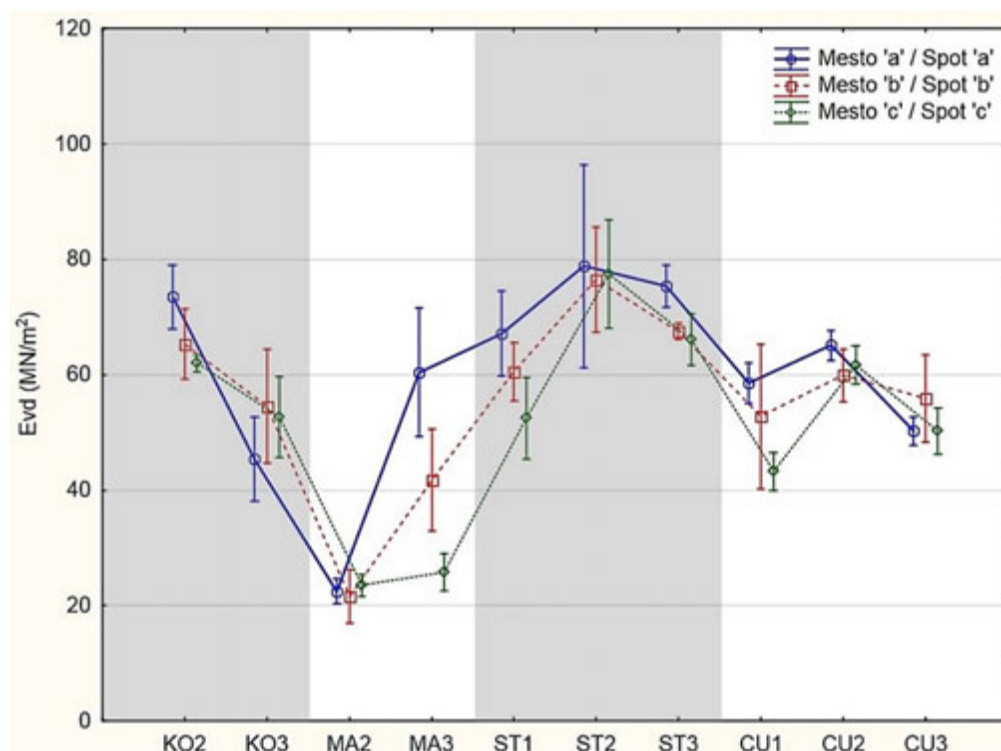
Za razliko od glavnih cest je bilo v letu 2008 zgrajenih dovolj stranskih gozdnih cest, da smo lahko zagotovili 15 ponovitev (profilov) po načrtovanih obravnavanjih (npr. nove stranske gozdne ceste na karbonatni podlagi). V prvi fazi obdelave spomladanske nosilnosti stranskih gozdnih cest smo z dvofaktorskim poskusom proučili značilnost razlik med desetimi odseki novih cest ter morebiten vpliv faktorja »MERILNO MESTO«. Analizirana faktorja sta statistično značilna, njuna interakcija je statistično neznačilna (preglednica 11).

Preglednica 11: Značilnost razlik spomladanske povprečne nosilnosti novih stranskih gozdnih cest glede na analizirane odseke in merilna mesta

Table 11: Significant differences in average spring bearing capacity on new secondary forest roads regarding analysed sections and measurement spots

Vplivni dejavnik / Factor	d.f.	SS	MS	F	p
oo (Odsek / Section)	9	19671,41	2185,712	18,71465	0,000***
MM (Mesto / Spot)	2	1005,12	502,558	4,30304	0,03*
oo x MM (Interakcija / Interaction)	18	2102,25	116,791	0,80560	0,686
Ostanek / Residual	60	8698,50	144,975		

Z apriorno analizo smo potrdili visoko značilno ($p < 0,001$) razliko med povprečno nosilnostjo vozišča novih stranskih cest na karbonatni podlagi in tistimi na mešani podlagi, a test mnogoterih primerjav je pokazal, da se značilno razlikujeta le povprečni nosilnosti odseka MA2 (»Macesnova«, odsek 2) in ST2 (»Strešni«, odsek 2). Pri vplivu faktorja »MERILNO MESTO« smo ugotovili statistično značilno razliko med merilnim mestom »a« in »c« (slika 48).

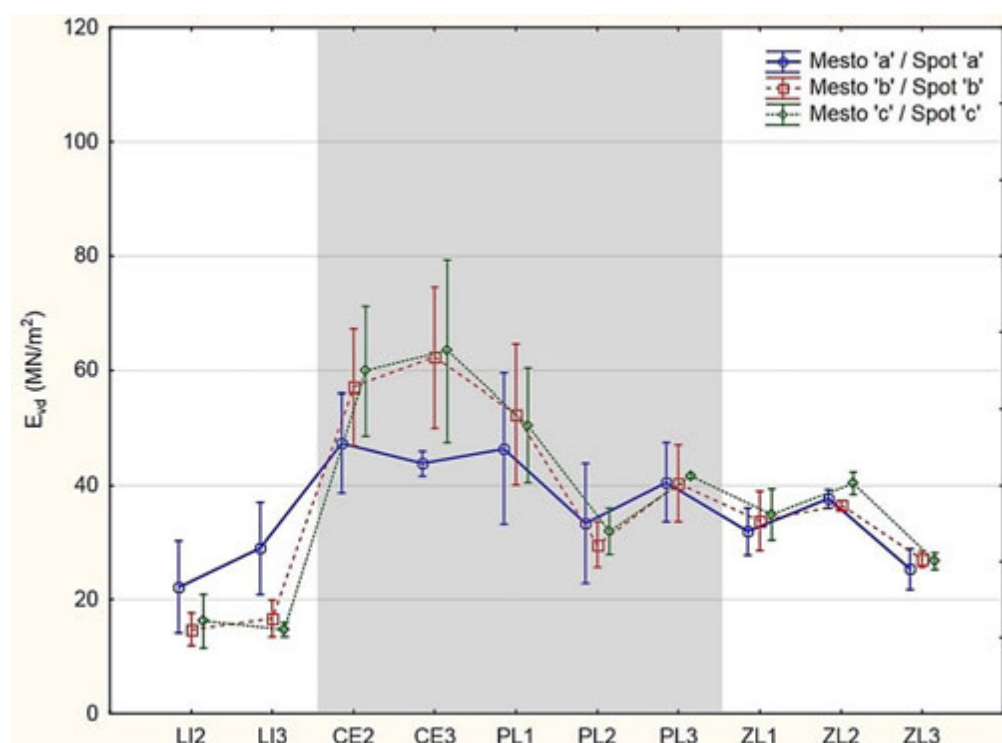


Slika 48: Vpliv odseka in merilnega mesta na spomladansko nosilnost novih stranskih cest (senčeno: mešana podlaga)

Figure 48: Influence of the section and measurement spot on the bearing capacity of new secondary roads in spring (shaded: mixed base)

Analizo smo ponovili še za stare stranske gozdne ceste. Razlike v povprečni nosilnosti med odseki so visoko statistično značilne ($p < 0,001$). Razlike med merilnimi mesti so statistično neznačilne. S kontrastno analizo smo potrdili razlike med odseki na karbonatni podlagi in skupino odsekov na mešani podlagi. S konzervativno analizo mnogoterih primerjav smo potrdili statistično značilno odstopanje ceste »Čemerje« in prvega odseka ceste »Planinca« od odsekov ceste »Lipovec« (slika 49).

Odseka »Lipovec« sta spomladi imela nosilnost, podobno povprečni nosilnosti vlak na mešani podlagi v enakem obdobju. V primeru starih stranskih cest je vpliv faktorja »MERILNO MESTO« statistično neznačilen. To razlagamo s tem, da kamioni z uporabo ceste sčasoma »utrdijo« nasipni del voziščne konstrukcije.



Slika 49: Vpliv odseka in merilnega mesta na spomladansko nosilnost starih stranskih cest (senčeno: karbonatna podlaga)

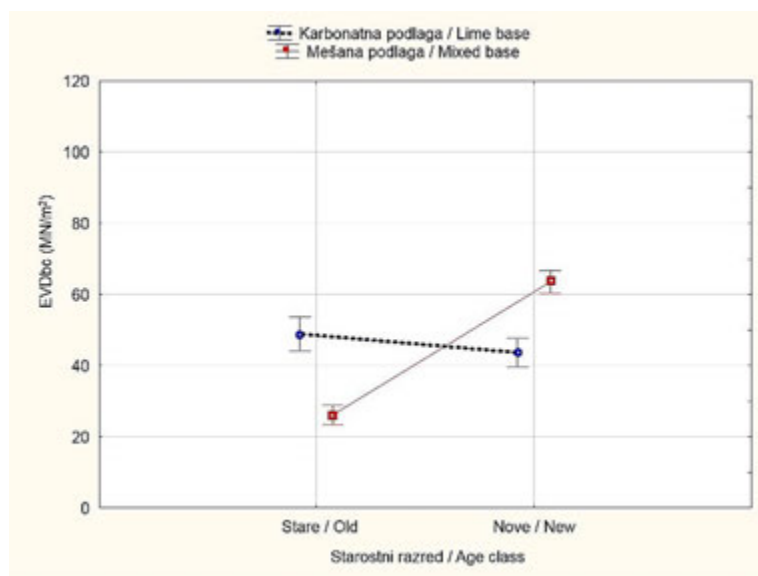
Figure 49: Influence of the section and measurement spot on the bearing capacity of old secondary roads in spring (shaded: lime base)

Po vzoru glavnih cest smo tudi za stranske ceste analizirali vpliv faktorjev »PODLAGA« in »STAROSTNI RAZRED« za odvisno spremenljivko EVD_{bc} (preglednica 12). Vpliv faktorja »PODLAGA« je neznačilen, vpliv faktorja »STAROSTNI RAZRED« pa visoko značilen. Interakcija med faktorjema je statistično značilna. To nakazuje vpliv prometa na nosilnost vozišč stranskih gozdnih cest, kaže pa tudi na »nedodelanost« in »ranljivost« vozišč ob zaključku gradnje. Nove stranske ceste na karbonatni podlagi se v spomladanskem času malo razlikujejo od starih stranskih na enaki podlagi, medtem ko so nove stranske ceste na mešani podlagi spomladi v povprečju enkrat bolj nosilne od ustreznih starih (slika 50).

Preglednica 12: Značilnost razlik spomladanske povprečne nosilnosti stranskih gozdnih cest

Table 12: Significant differences in average spring bearing capacity on secondary forest roads

Vplivni dejavnik / Factor	d.f.	SS	MS	F	p
PP (Podlaga / Base)	1	30,4	30,4	0,1457	0,704
AA (Starostni razred / Age class)	1	3860,0	3860,0	18,4941	0,000***
PP x AA (Interakcija / Interaction)	1	6811,0	6811,0	32,6335	0,000***
Ostanek / Residual	56	11687,9	208,7		



Slika 50: Interakcije med geološko podlago in starostjo KPP na stranskih gozdnih cestah po 2 x 2 faktorskem vzorčnem poskusu (glej tudi preglednico 12)

Figure 50: Interactions among geological base and road age for TCP on primary forest roads according to 2 x 2 factorial non-experimental design (see also table 12)

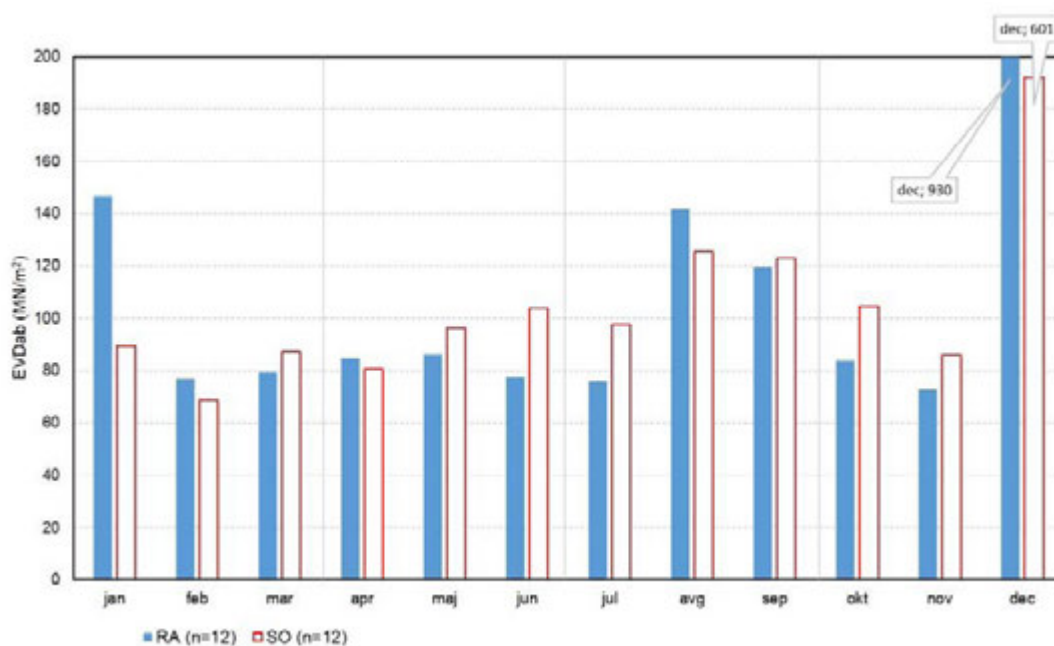
6.3 SPREMEMBE NOSILNOSTI VOZIŠČ V ČASU PAVEMENT BEARING CAPACITY VARIATIONS IN TIME

6.3.1 Mesečne spremembe nosilnosti dveh glavnih gozdnih cest Monthly variations in bearing capacity of two primary forest roads

Spremembe nosilnosti vozišč skozi čas smo najbolj podrobno spremljali na dveh različno starih glavnih gozdnih cestah na karbonatni podlagi. Gozdna cesta »Ravnik« je bila primer stare gozdne ceste, gozdna cesta »Soteska« pa primer nove gozdne ceste, zgrajene leta 2008. Na vsaki cesti smo imeli dva naključno izbrana odseka, na vsakem odseku pa tri karakteristične prečne profile. Na vsakem profilu smo po ustaljeni praksi merili nosilnost na treh merilnih mestih »a«, »b« in »c«. Meritve smo izvajali enkrat mesečno, praviloma v prvem tednu meseca. Meritve na obeh objektih so bile opravljene isti dan. Ker je šlo za glavni gozdni cesti in karbonatno podlago, smo domnevali, da z izjemo zimskega časa na posamezni cesti ne bi smelo biti večjih sprememb v povprečni nosilnosti tekom leta.

Rezultati mesečnih meritev nosilnosti za povprečje merilnega mesta mest »a« in »b« kažejo (slika 51), da se je povprečna nosilnost vozišč obravnavanih cest tekom leta izrazito spreminjala. Najvišje vrednosti smo zabeležili v zimskem času, ko so povprečni posedki znašali le kakšno stotinko milimetra in je bil izračunani dinamični deformacijski modul

preko 1.000 MN/m². Najnižjo nosilnost smo zabeležili zgodaj spomladi, v obdobju spomladanske odjuge. Takrat je povprečna nosilnost znašala le polovico vrednosti v poletnem času. Podoben letni hod smo našli na obeh cestah, ki sta druga od druge oddaljeni preko 100 km, pri tem pa je bila cesta »Soteska« stara eno leto, cesta »Ravnik« pa sedemintrideset let.



Slika 51: Primerjava letne dinamike povprečne nosilnosti dveh glavnih gozdnih cest na karbonatni podlagi

Figure 51: Comparison of annual dynamic in average bearing capacity for two primary forest roads on lime base

Razlike v povprečni nosilnosti med merilnima mestoma »a« in »b« so za analizirani cesti prikazane v preglednici 13. Značilnost razlik med merilnima mestoma v profilu smo preverjali s t-testom za odvisne vzorce. Za odvisne vzorce smo se odločili, ker sta se merilni mesti nahajali 2 metra narazen, meritve pa smo, kolikor je le bilo mogoče, izvajali vsak mesec na istih merilnih mestih. Med merilnimi mesti tekom leta z eno izjemo ni bilo značilnih razlik v povprečni nosilnosti. Razlik nismo pričakovali, saj je šlo za dobro utrjene voziščne konstrukcije in reden promet težkih tovornjakov skozi vse leto.

Ocenjujemo, da sta glavna vzroka za letno dinamiko nosilnosti na glavni gozdni cesti količina in agregatno stanje vode v voziščni konstrukciji. Večja kot je vsebnost vode v voziščni konstrukciji pri dani podlagi in prometni obremenitvi, manjša je nosilnost ceste. To velja, dokler voda v voziščni konstrukciji ne zmrzne. Ko pa se to zgodi, nosilnost skokovito naraste do odtajanja ledu, ko zaradi presežka vode v zemljini pride do izrazitega padca nosilnosti.

Pojav je dobro znan, za nas pa je bilo pomembno spoznanje, da dinamična plošča omogoča zaznavanje takih variacij v nosilnosti. Če smo to zaznali na dobro utrjenih voziščih, je bilo pričakovati, da bomo ta pojav zaznali tudi na stranskih gozdnih cestah s slabšo utrditvijo. Meritve nosilnosti v zimskem času so nenatančne in nehomogene, zato smo sezone meritve na ostalih profilih omejili na tri sezone: pomlad, poletje in jesen.

Preglednica 13: Značilnost razlik v povprečni nosilnosti med dvema merilnima mestoma na glavnih gozdnih cestah »Ravnik« in »Soteska« tekom leta 2009

Table 13: Significant differences in average bearing capacity among two measurement spots on the primary forest roads »Ravnik« and »Soteska« during the year 2009

Termin	Ravnik				Soteska			
Term	n	a	b	t-test	n	a	b	t-test
Jan.	6	121,9	170,9	0,5537	6	93,7	84,8	0,6668
Feb.	6	80,2	73,4	0,5576	6	65,3	72,0	0,5685
Mar.	6	84,5	74,7	0,0677	6	81,2	93,2	0,3662
Apr.	6	85,6	83,6	0,7967	6	77,4	83,6	0,4957
Maj.	6	87,6	84,8	0,7308	6	90,8	101,3	0,3244
Jun.	6	78,4	76,3	0,7205	6	105,4	102,0	0,9574
Jul.	6	77,5	73,9	0,6616	6	96,5	99,2	0,8159
Avg.	6	137,3	145,4	0,6079	6	142,8	108,2	0,0274
Sep.	6	119,0	119,7	0,9678	6	128,7	116,7	0,4340
Okt.	6	76,4	90,9	0,1239	6	113,9	95,3	0,3020
Nov.	6	74,3	71,1	0,7377	6	86,6	85,3	0,9199
Dec.	6	1243,7	616,3	- - -	5	596,6	606,3	- - -

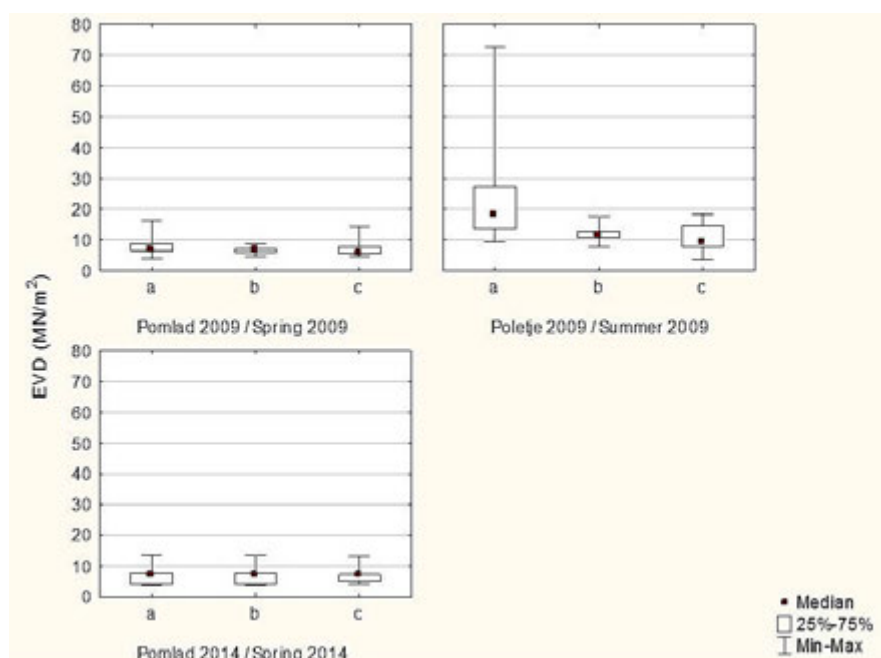
6.3.2 Razlike v povprečni nosilnosti traktorskih vlak po petih letih

Differences in average bearing capacity of skid trails after five years

Meritve nosilnosti planumov traktorskih vlak smo izvedli spomladi 2009, poleti 2009 in spomladi 2014. Spomladi leta 2009 so meritve nosilnosti potekale po spomladanski odjugi in pred olistanjem, spomladi leta 2014 pa po odjugi in ob olistanju. Stanje vlak ob spomladanskih meritvah je dokumentirano v prilogi J in prilogi K. Mediane, kvartili in intervali izmerjenih vrednosti dinamičnega deformacijskega modula so za posamezne termine in merilna mesta na profilih vlak na karbonatni podlagi prikazani na sliki 52. Porazdelitve vrednosti po obravnavanjih so asimetrične, polno je netipičnih vrednosti. To povzroča nehomogenosti in vpliva na izbiro metod analize varianc.

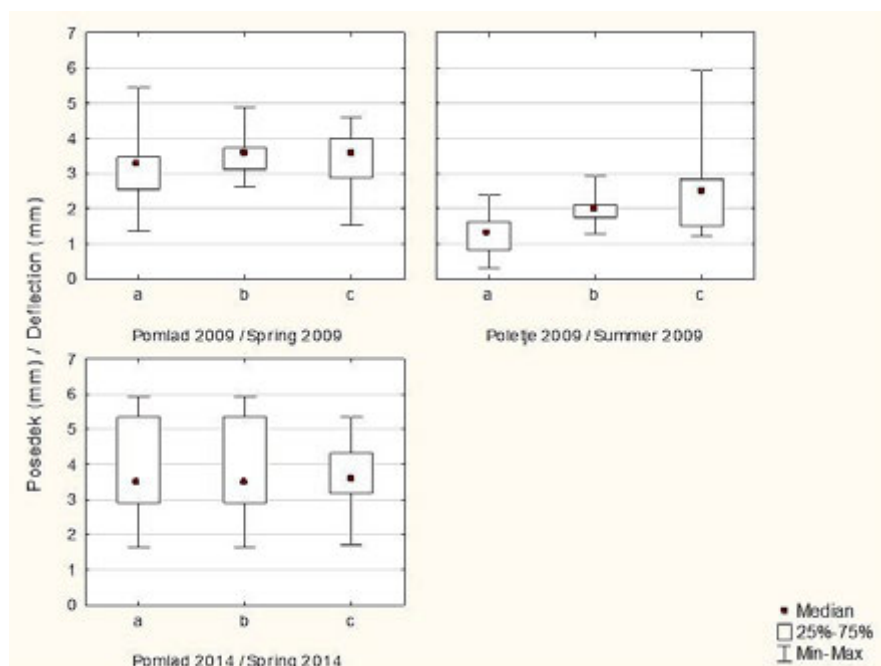
Problem nehomogenih varianc je mogoče rešiti na dva načina. Lahko uporabimo neparametrične metode ali pa odvisno spremenljivko transformiramo. Prvega načina nismo želeli uporabiti, ker so nas zanimale metode mnogoterih naknadnih primerjav. Transformacija osnovnih podatkov prav tako ni bila ustrezna, saj je EVD reciprok posedka. Slednje je tudi razlog, da se znak zlasti na robu merilnega območja ne porazdeljuje normalno

in so variance po obravnavanjih nehomogene oziroma »heteroskedastične« (Field, 2013). Če namesto E_{vd} uporabimo posedek »S«, postane porazdelitev vrednosti po obravnavanjih veliko bližja normalni porazdelitvi (slika 53), parametrična statistika pa dopustna.



Slika 52: Razlike v nosilnosti vlak na karbonatni podlagi glede na sezono in merilno mesto

Figure 52: Variations in skid trail bearing capacity on lime base regarding the season and measurement spot



Slika 53: Razlike v izmerjenih posedkih pri vlakah na karbonatni podlagi glede na sezono in merilno mesto

Figure 53: Variations in skid trail bearing capacity on lime base regarding the season and measurement spot

Če namesto »S« po analogiji uporabimo povprečni posedek »Sabc«, se variance še bolj homogenizirajo, razlike med tretmaji pa izčistijo, kar nam omogoča v primerljivih terminih izvesti kompleksnejše primerjave med več faktorji. Uporabljeni postopek je izhod v sili, saj ugotovitve veljajo za posedek in ne za dinamični deformacijski modul.

Rezultati primerjav nosilnosti vlak na nasipni in odkopni kolesnici (podpoglavje 6.2.2) niso potrdili značilnega vpliva merilnega mesta oziroma je bila za dano število ponovitev variabilnost prevelika, zato smo se pri multitemporalnih analizah nosilnosti vlak osredotočili samo na nasipno kolesnico ter izvedli dvofaktorski vzorčni poskus.

Fiksni faktor »KATEGORIJA« je imel dva nivoja: nove glavne vlake na karbonatni podlagi in stare glavne vlake na mešani podlagi. Fiksni faktor »TERMIN« je imel tri nivoje: pomlad 2009, poletje 2009 in pomlad 2014. Ker je v našem primeru glavni vir nehomogenosti varianc pri vlakah predvsem merilno mesto »a«, smo za odvisno spremenljivko izbrali povprečen posedek na merilnih mestih »b« in »c«. Meritve posedkov so potekale v treh terminih na istih profilih, vendar ne na povsem istih mestih. Razlog temu je bila velika količina skeleta (grobih zrn), ki smo se mu morali pri pripravi podlage za izvedbo meritve izogibati. To je bilo še posebej izrazito, ko smo se na profile vrnili po petih letih. Če je bil odsek bolj na strmem odseku vlake, je bila mikrolokacija erodirana in tudi sicer zelo spremenjena (priloga J in priloga K).

Zaradi naštetega se nismo odločili za izvrednotenje faktorskega poskusa s tehnikami za ponovitve meritev na istih enotah, ampak smo izvedli navaden dvofaktorski poskus z devetimi ponovitvami (preglednica 14). Oba obravnavana faktorja in njuna interakcija so med obravnavanji statistično značilno različni.

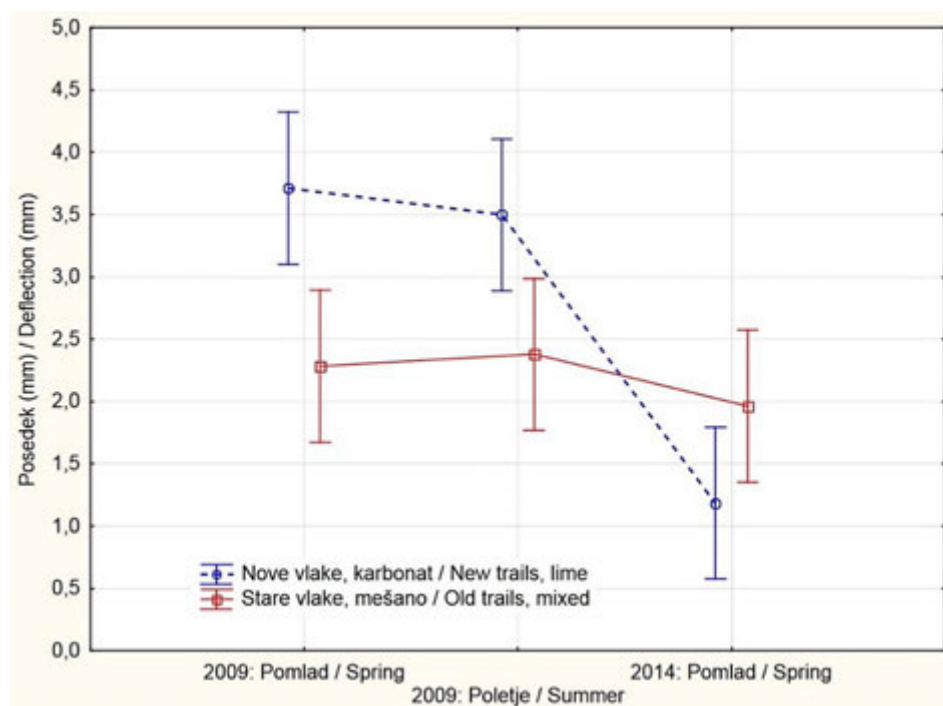
Preglednica 14: Razlike v povprečnem posedku med dvema kategorijama vlak in tremi termini meritev

Table 14: Differences in average deflection among two skid trail classes and three measurement terms

Vplivni dejavnik / Factor	d.f.	SS	MS	F	p
AAPP (Kategorija vlake / Skid trail class)	1	4,7023	4,7023	5,6669	0,021*
TT (Termin / Term)	2	23,3841	11,6921	14,0904	0,000***
AAPP x TT (Interakcija / Interaction)	2	12,8595	6,4297	7,7487	0,001**
Ostanek / Residual	48	39,8298	0,8298		

Slika 54 prikazuje razmerja povprečnih posedkov (povprečje merilnih mest »b« in »c«) v treh terminih za dve skupini vlak. V letu 2009 so bili posedki na novih vlakah na karbonatu značilno manjši od tistih na starih vlakah na mešanih podlagah. Pet let po tem so se posedki

starih vlak na mešanih podlagah le nekoliko zmanjšali, medtem ko so bili posedki na vlakah na karbonatni podlagi le še tretjina tistih izpred petih let. Leta 2014 posedki med analiziranimi skupinama vlak niso bili več značilno različni.



Slika 54: Razlike v izmerjenih posedkih pri dveh skupinah vlakah v roku petih let

Figure 54: Variations in measured deflections on two groups of skid trails in five-year period

6.3.3 Sezonske spremembe nosilnosti gozdnih cest

Seasonal variations in the bearing capacity of forest roads

Za razliko od cest »Ravnik« in »Soteska« smo na ostalih proučevanih odsekih v vsakem letnem času izvedli eno serijo meritev nosilnosti na vseh proučevanih cestah. Celotno serijo meritev smo skoncentrirali na obdobje enega tedna in tako nekoliko zmanjšali vpliv različnih količin padavin na sezonske meritve.

6.3.3.1 Sezonske spremembe povprečne nosilnosti glavnih gozdnih cest

Seasonal variations in average bearing capacity of primary forest roads

Osnovni problem analize nosilnosti novih cest je bilo majhno število objektov, zgrajenih v proučevanem obdobju. Na voljo smo imeli le štiri glavne ceste, pa še na njih smo pri analizi spomladanskih nosilnosti ugotovili netipične odseke. Seveda bi lahko povečali število odsekov, a s tem ne bi dobili prave variabilnosti v obravnavanju, temveč le več meritev

znotraj iste ceste. V spomladanskem terminu smo ugotovili statistično značilen vpliv merilnega mesta le za nove stranske ceste, pa tudi tam razlike niso bile visoko značilne.

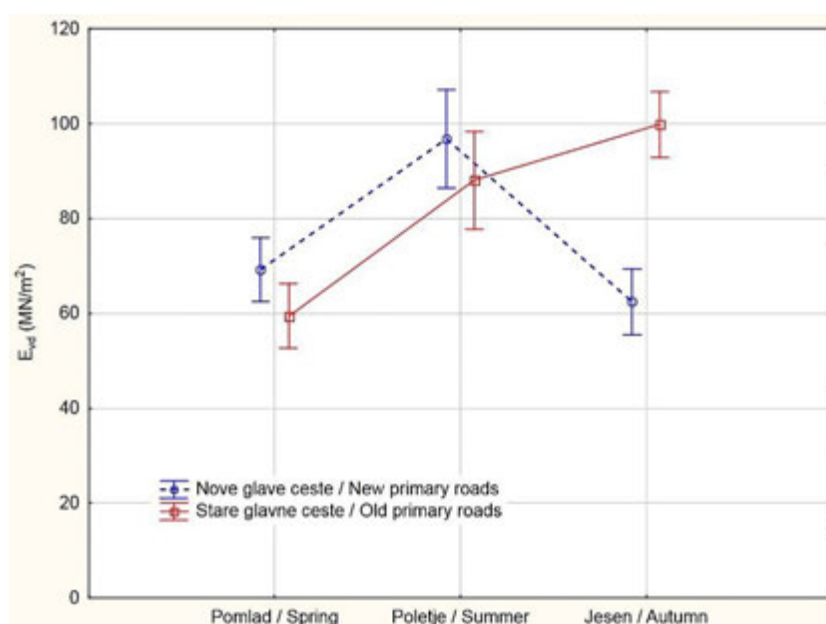
Upošteva vse te omejitve, smo multitemporalno analizo nosilnosti glavnih gozdnih cest opravili z dvofaktorsko analizo variance, pri čemer smo za odvisno spremenljivko vzeli nosilnost na nasipni kolesnici (merilno mesto »b«). Fiksni faktor »KATEGORIJA« je imel dva nivoja: nove glavne ceste (zgrajene leta 2008) in stare glavne ceste. Fiksni faktor »SEZONA« je imel tri nivoje: pomlad, poletje in jesen. Faktor »SEZONA« je predstavljal ponovitve na istih enotah (profilih). Za razliko od vlak je bilo obdobje med meritvami krajše in smo ob vsakokratnem prihodu na profil praviloma našli sled prejšnje meritve (ostanek belega kalcitnega peska za izravnavo terena pod ploščo). Domnevali smo, da bo metoda »ponovitve na istih enotah« izčistila variance med obravnavanji, zato nismo izločili netipičnih odsekov na mešani podlagi (BA1, KN3). Po posameznem obravnavanju je bilo petnajst ponovitev.

Rezultati kažejo (preglednica 15), da kategorija glavne ceste ni statistično značilen faktor medtem, ko sta faktorja sezona meritev ter interakcija med sezono in kategorijo visoko statistično značilna. Mauchyjev test sferičnosti ni značilen, zato nismo izvedli Greenhouse-Geisserjeve korekcije (Field, 2013). Povprečja nosilnosti glavnih cest za posamezne sezone so prikazana na sliki 55. Padeč nosilnosti novih cest v jeseni gre na račun nekonsolidirane ceste »Bajs«.

Preglednica 15: Značilnost razlik v nosilnosti nasipne kolesnice med dvema različno starima skupinama glavnih cest v treh letnih časih leta 2009

Table 15: Significant differences in embankment rut bearing capacity among two differently old primary roads during three seasons in 2009

Vplivni dejavnik / Factor	d.f.	SS	MS	F	p
KKAA (Kategorija ceste / Road class)	1	898,2	898,2	0,4663	0,500
Ostanek / Residual	28	53926,9	1926,0		
SSS (Sezona / Season)	2	11950,6	5975,3	11,1029	0,000***
KKAA x SSS (Interakcija / Interaction)	2	10892,7	5446,4	10,1201	0,000***
Ostanek / Residual	56	30137,6	538,2		



Slika 55: Razlike v nosilnosti voziščnih konstrukcij dveh skupin glavnih cest v treh letnih časih leta 2009

Figure 55: Variations in pavement bearing capacity for two groups of primary roads during three seasons in 2009

6.3.3.2 Sezonske spremembe povprečne nosilnosti stranskih gozdnih cest

Seasonal variations in average bearing capacity of secondary forest roads

Naše glavno zanimanje v raziskavi je bilo usmerjeno v nosilnost stranskih gozdnih cest. Z vzorčnim poskusom smo preverili vpliv letnih časov na štiri skupine stranskih gozdnih cest. Fiksni faktor »SEZONA« je imel tri ravni: pomlad, poletje in jesen. Fiksni faktor »KATEGORIJA« se je nanašal samo na stranske gozdne ceste in je imel štiri ravni: stare stranske ceste na karbonatni podlagi, nove stranske ceste na karbonatni podlagi, stare stranske ceste na mešani podlagi ter nove stranske ceste na mešani podlagi. Odvisna spremenljivka je bila vrednost dinamičnega deformacijskega modula, izmerjena na kolesnici v nasipu (merilno mesto »b«). Skupno je bilo dvanajst obravnavanj, za vsako obravnavanje smo imeli petnajst ponovitev (profilov), pri čemer so bile meritve v treh letnih časih narejene na istih mestih.

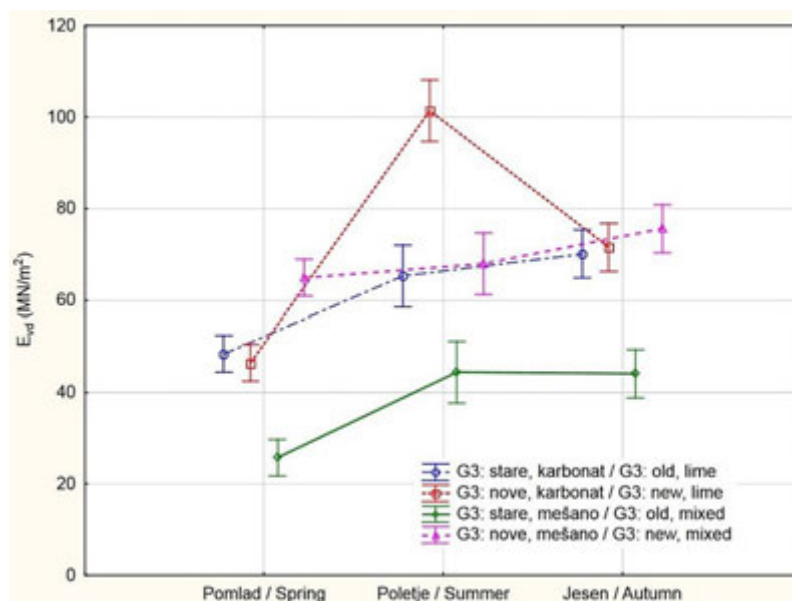
Rezultati vzorčnega dvofaktorskega poskusa s ponovitvami na istih enotah kažejo (preglednica 16), da sta oba glavna faktorja visoko statistično značilno različna, prav tako pa je visoko statistično značilna tudi interakcija med njima. Mauchlyjev test sferičnosti je bil značilen ($p < 0,04$). Ker je znašal $\varepsilon > 0,75$, smo upoštevali Huynh-Feldtova korekcijo (Field, 2013) ter prilagodili prostostne stopinje. Tudi po korekciji se vrednost F v analizi variance ni bistveno spremenila, faktorja in interakcija so ostali visoko značilni.

Preglednica 16: Značilnost razlik v nosilnosti nasipne kolesnice med štirimi skupinami stranskih gozdnih cest v treh letnih časih leta 2009

Table 16: Significant differences in embankment rut bearing capacity among four groups of secondary forest roads during three seasons in 2009

Vplivni dejavnik / Factor	d.f.	SS	MS	F	p
KKAA (Kategorija ceste / Road class)	3	33444,1	11148,0	12,5853	0,000***
Ostanek / Residual	56	49604,7	885,8		
SSS (Sezona / Season)	2	18517,7	9258,8	41,1274	0,000***
KKAA x SSS (Interakcija / Interaction)	6	12410,3	2068,4	9,1877	0,000***
Ostanek / Residual	112	25214,1	225,1		

Bistveni rezultati značilnosti razlik med analiziranimi stranskimi gozdnimi cestami so jasno vidni na sliki 56. V vseh treh analiziranih letnih časih so leta 2009 imele najslabšo nosilnost stare ceste na mešani podlagi. Brez dvoma je k temu pomembno prispevala cesta »Lipovec«, za katero je bilo že prej ugotovljeno, da ima neustrezno nosilnost. Vendar pa so to skupino sestavljali tudi profili gozdne ceste »Zlaka«, ki so na terenu delovali zelo kakovostno.



Slika 56: Razlike v nosilnosti voziščnih konstrukcij dveh skupin stranskih cest v treh letnih časih leta 2009

Figure 56: Variations in pavement bearing capacity for two groups of secondary roads during three seasons in 2009

Stare stranske ceste na mešani podlagi niso tekom leta dosegle praga minimalne nosilnosti za nosilne in obrabne plasti iz nevezanih zmesi zrn (TSC 06.200 : 2003). Tega praga niso dosegle niti stranske ceste na karbonatnih podlagah v spomladanskem času. V vseh drugih terminih je bila nosilnost ostalih treh skupin stranskih cest ustrezna. Posebej visoke vrednosti

nosilnosti smo izmerili na novih stranskih cestah na karbonatni podlagi v poletnem času, a je visoka nosilnost v jesenskem času upadla kar za 30 %. Padca nosilnosti ostalih stranskih cest v jesenskem času nismo ugotovili. To nas je presenetilo, saj smo zaradi povečane vlažnosti v tem obdobju pričakovali slabšo nosilnost stranskih gozdnih cest.

Ocene intervalnih vrednosti aritmetičnih sredin nosilnosti (oziroma E_{vd}) za posamezno skupino so sorazmerno konstantne. To je pomemben znak, da je bil vpliv ostalih dejavnikov (npr. vlažnost, zgoščenost) skozi vse leto podoben.

6.3.4 Spremembe nosilnosti vozišča med gradnjo gozdne ceste

Variations in pavement bearing capacity during forest road construction

6.3.4.1 Povprečna debelina vgrajenih plasti na opazovalnem odseku »Bajs«

Average thickness of constructed layers on observational track »Bajs«

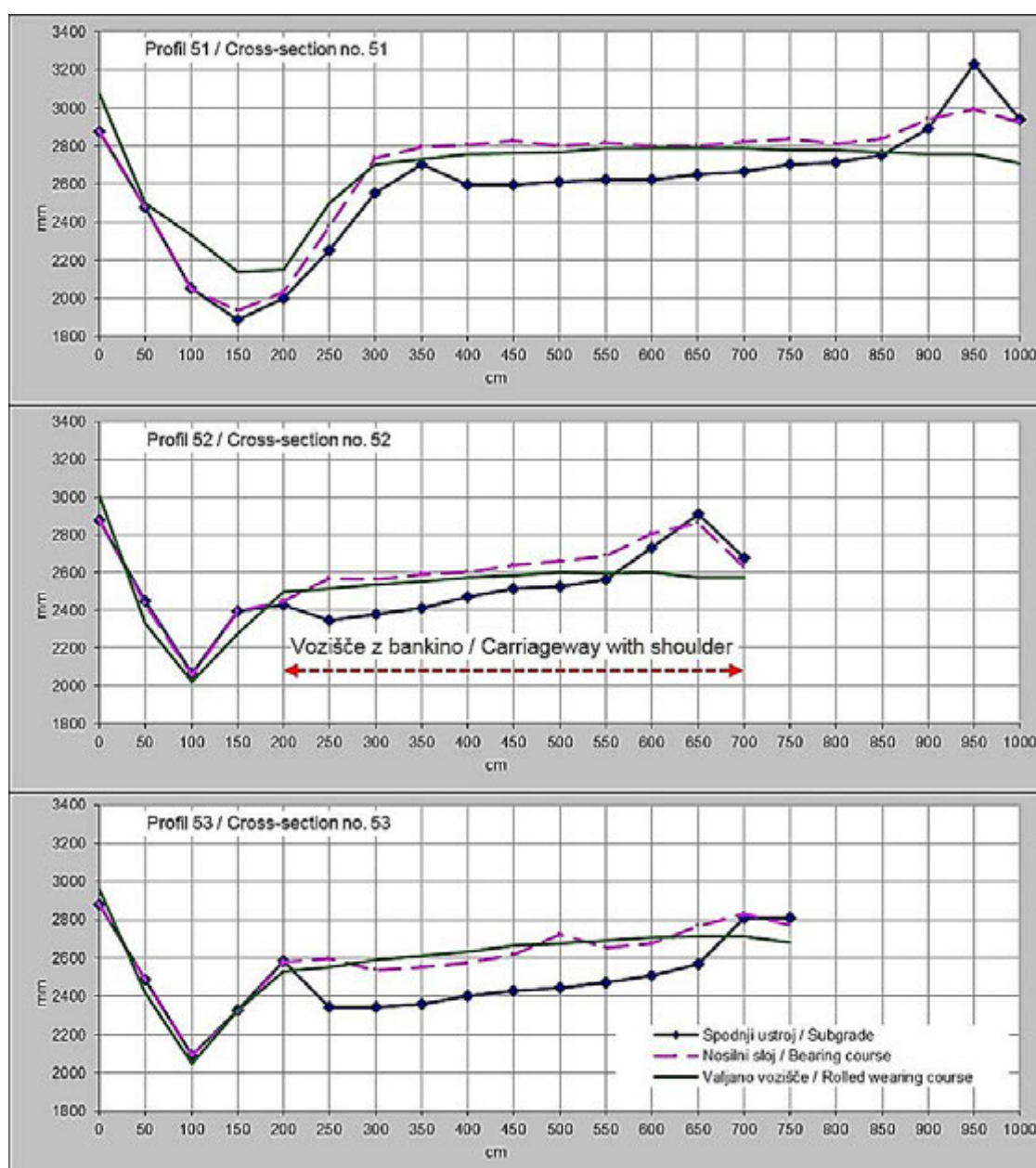
Na opazovalnem polju »Bajs« smo v dolžini 210 metrov spremljali izgradnjo voziščne konstrukcije na devetih profilih. Posneli smo obliko planuma spodnjega ustroja pred začetkom izdelave voziščne konstrukcije (slika 57), obliko planuma nevaljane nosilne plasti in obliko planuma valjane obrabne plasti vozišča pred začetkom uporabe ceste (slika 58, priloga L in priloga M). Planum spodnjega ustroja je bil izdelan z »obrobo«, ki onemogoča неконтролирано raztresanje materiala nosilne plasti v jarek in po nasipni brežini. Na prečnih profilih je viden enostranski prečni naklon planuma spodnjega ustroja.



Slika 57: Vrsta materiala ter oblika spodnjega ustroja na opazovalnem polju »Bajs« (profil št. 61)

Figure 57: Type of material and shape of the subgrade on observational track »Bajs« (cross-section No. 61)

Slika 57 prikazuje značilen material spodnjega ustroja gozdne ceste. Čeprav cesta »Bajs« poteka pretežno na miocenskih peščenjaki in laporjih, so na opazovalnem odseku apnena podlaga in ilovnata tla. Gradbeni stroji med gradnjo voziščne konstrukcije izvedejo zgoščevanje spodnjega ustroja, ki je v primeru večjega dela ilovice manj učinkovito. Debelina nosilne plasti in izdelane voziščne konstrukcije se zelo spreminja tako na profilu kot tudi med profili. Debeline voziščne konstrukcije na nasipni kolesnici so manjše od tistih na odkopni kolesnici.



Slika 58: Oblike voziščne konstrukcije na opazovalnem polju »Bajs«: profili 51 – 53

Figure 58: Pavement shapes on observational track »Bajs«: cross-sections 51 – 53

Preglednica 17 prikazuje povprečne debeline nosilne plasti pred valjanjem in končno debelino nosilne in obrabne plasti po valjanju. Povprečne debeline nevaljane nosilne plasti so večje od končne povprečne debeline celotne voziščne konstrukcije. Povprečna debelina nevaljane nosilne plasti za vseh devet profilov znaša 125 mm, za končano cesto na opazovalnem odseku pa le 96 mm. Ugotovljene vrednosti debelin voziščne konstrukcije na profilih so manjše od projektiranih. Širina vozišča z bankino se na opazovalnem odseku giblje med 5,0 in 7,0 m. To je za en meter več od projektirane geometrije.

Preglednica 17: Povprečne debeline plasti voziščne konstrukcije na opazovalnem odseku »Bajs«

Table 17: Average thickness of pavement layers on observational track »Bajs«

Profil	Nosilna plast	KV-nosilni	Voziščna konstrukcija	KV-voziščna	Širina vozišča**
Cross-section	Bearing course	CV-bearing	Pavement	CV-pavement	Carriageway width**
	(mm)	%	(mm)	%	(m)
P41	118	75	42	290	5,5
P42	145	80	94	137	5,0
P43	97	168	59	308	6,0
P51	113	99	39	456	7,0
P52	100	87	22	659	5,0
P53	149	65	138	100	5,5
P61	124	78	145	90	5,0
P62	123	72	135	93	5,5
P63	154	65	188	55	6,0

* KV-koeficient variacije / CV-coefficient of variation; ** Z bankino / With shoulder

6.3.4.2 Stopnjevanje nosilnosti med gradnjo voziščne konstrukcije

Bearing capacity increment during pavement construction

Na opazovalnem polju je bil jeseni 2008 izdelan spodnji ustroj iz kamnitega materiala odkopa. Navoz materiala nosilne plasti iz dolomitnega drobljenca je bil opravljen 11. junija 2009. Meritve nosilnosti so bile opravljene pred in po navozu nosilnega sloja 14. junija 2009 (slika 25). Srednje vrednosti in raztros dinamičnega deformacijskega modula za devet profilov testnega polja kažejo na padec nosilnosti po spomladanski odjugi, majhen pribitek nosilnosti na nevaljani nosilni plasti in ustrezno nosilnost končane ceste (preglednica 18). Variance so bile za faktor »termin« in »MERILNO MESTO« visoko nehomogene, zato smo izvedli neparametrični Kruskal-Wallisov test. Razlike v povprečni nosilnosti med kolesnico v odkopu in kolesnico v nasipu (odvisni vzorci) so za vse primerjane termine statistično neznačilne. Povprečna nosilnost končanega odseka ceste presega zahtevano vrednost nosilnosti za težko prometno obremenitev, ki znaša 55 MN/m² (TSC 06.200:2003).

Preglednica 18: Spremembe povprečne nosilnosti vozišča in njena variabilnost na opazovalnem polju »Bajs«
Table 18: Differences in average carriageway bearing capacity and its variability on the observational track
»Bajs«

Termin Term	Stanje površja Surface status	Kolesnica v odkopu Rut in excavation		Kolesnica v nasipu Rut in embankment	
		$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s
		(MN/m ²)	(MN/m ²)	(MN/m ²)	(MN/m ²)
2008: Jesen / Autumn	Valjan sp. ustroj / Rolled subgrade	- - -	- - -	65,6	25,3
2009: Pomlad / Spring	Valjan sp. ustroj / Rolled subgrade	23,7	9,0	19,9	8,0
2009: Poletje / Summer	Valjan sp. ustroj / Rolled subgrade	34,3	9,7	40,7	17,9
2009: Poletje / Summer	Nosilna plast / Bearing course	46,2	4,2	48,2	11,3
2009: Jesen / Autumn	Končana cesta / Finished road	85,3	22,4	81,1	27,1

6.4 VPLIV VODE NA NOSILNOST EFFECTS OF WATER ON BEARING CAPACITY

6.4.1 Določanje vsebnosti vlage v voziščni konstrukciji Determination of moisture content in the pavement

Vsebnost vlage v voziščni konstrukciji smo ugotavljali z izotopsko sondo in z gravimetrično metodo. Skupno smo z izotopsko sondo določili 96 % vsebnosti vlage. Z gravimetrično metodo smo določili vsebnost vlage 541 vzorcem, od tega je 462 vzorcev na povprečni globini 5 cm, 55 na povprečni globini 20 cm in 24 vzorcev na povprečni globini 35 cm. 45 gravimetričnih vzorcev je bilo izkopanih na vlakah na povprečni globini 5 cm, ostali pa na cestah. V nadaljevanju bomo vsebnost vlage, določeno z izotopsko metodo, imenovali »izotopska vlažnost«, vsebnost vode, določeno z gravimetrično metodo, pa »gravimetrična vlažnost«.

6.4.1.1 Referenčna vrednost vsebnosti vlage v voziščni konstrukciji Reference value of moisture content in the pavement

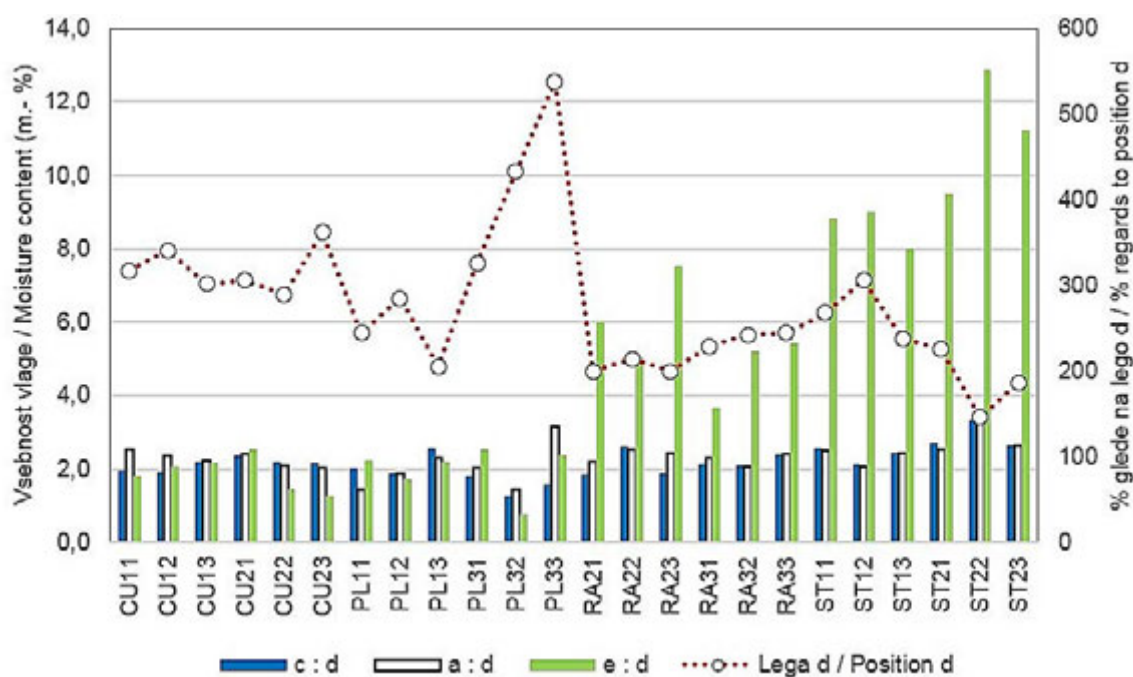
Izotopska vlažnost nam predstavlja pravo oziroma referenčno vsebnost vlage v voziščni konstrukciji, saj določi povprečno vlažnost plasti do globine 0,5 metra pod dnem merilnika.

Izotopsko vlažnost voziščne konstrukcije smo izmerili 7. aprila 2009 na štiriindvajsetih profilih na cesti »Ravnik«, »Čutarovka«, »Planinca« in »Strešni«. Na vsaki cesti smo izmerili šest profilov, na vsakem profilu pa določili vsebnost vlage na merilnih mestih »a« (odkopna kolesnica), »d« (med kolesnicama), »c« (nasipna kolesnica) in »e« (bankina). Ker

smo imeli večino podatkov o vsebnosti vlage z gravimetrično metodo z merilnega mesta »d«, smo za referenčno lego izbrali merilno mesto »d«.

Slika 59 prikazuje vsebnosti vlage na merilni dan. Izmerili smo vrednosti med 4 m.-% in 12 m.-% vlage v masi suhe snovi v tleh, kar je v okviru normalnih vrednost vsebnosti vlage za gramozna vozišča. Čeprav smo meritve izvajali v spomladanskem času, je na dan meritev minilo pet dni od zadnjih (manjših) padavin. Te razmere so bile za vse štiri analizirane ceste enake, saj so bile med seboj oddaljene manj kot 70 km zračne razdalje.

Primerjave vsebnosti izotopske vlažnosti znotraj profila kažejo, da so vsebnosti vlage v voziščni konstrukciji pod kolesnicama podobne tisti med kolesnicama (slika 59). Vsebnosti vlage na bankini so lahko enake ali pa znatno odstopajo od tistih med kolesnicama. Ta odstopanja so zelo podobna na profilih istega odseka, kar nakazuje, da so pomembni vplivni dejavniki potek ceste, lokalne hidrološke razmere in vrsta vgrajenega materiala.



Slika 59: Izotopska vlažnost analiziranih voziščnih konstrukcij gozdnih cest 7. aprila 2009 ter primerjave vsebnosti vlage glede na referenčno lego »d« (med kolesnicami)

Figure 59: Isotope moisture content on April 7th 2009 for the analysed forest road pavements and comparisons of moisture content according to the reference position »d« (between wheel ruts)

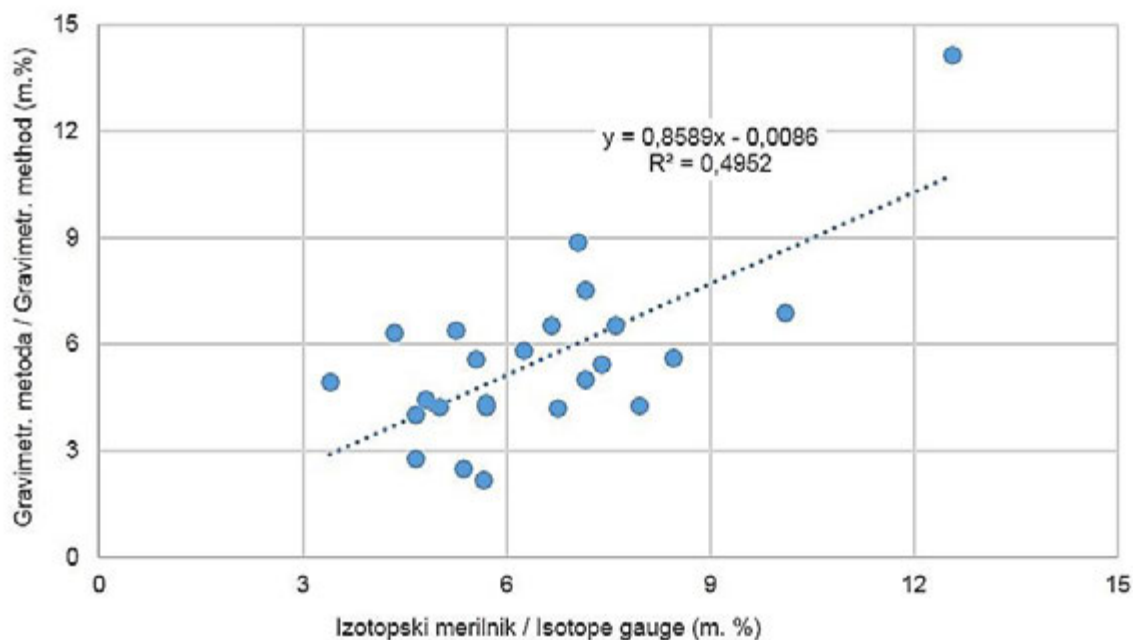
6.4.1.2 Ocena vsebnosti vlage z gravimetričnimi vzorci materiala obrabne plasti

Estimating moisture content with gravimetric samples of wearing course material

Ker v raziskavi nismo razpolagali z lastnim izotopskim merilnikom, smo večino podatkov o vsebnosti vlage v voziščni konstrukciji v trenutku na mestu meritev nosilnosti pridobili z izkopom dva- do trikilogramskih vzorcev površinske plasti vozišča v neposredni bližini meritve nosilnosti.

Vlažnost površinskih plasti voziščne konstrukcije je močno odvisna od granulometrijske sestave vgrajenega materiala, še bolj pa od trenutnih vremenskih razmer. Površinska plast se ob padavinah najhitreje navlaži, po njih pa najhitreje osuši.

Zanimalo nas je, kako dobra ocena povprečne vlažnosti v voziščni konstrukciji je podatek o gravimetrični vsebnosti vlage obrabne plasti. V ta namen smo na dan meritev izotopske vlažnosti na istih mestih vzeli tudi gravimetrične vzorce med kolesnicama na globini 5 cm in 20 cm. Iz dveh podatkov smo izračunali povprečno gravimetrično vlažnost ter jo primerjali z izotopsko vlažnostjo. Korelacija med njima (slika 60) je zmerna in premo sorazmerna. Izvedli smo tudi primerjavo med izotopsko in gravimetrično vlažnostjo z globine 0–10 cm, a je korelacija pričakovano slabša.



Slika 60: Korelacija med izotopsko in gravimetrično vlažnostjo gramozne VK med kolesnicama

Figure 60: Correlation between isotope and gravimetric moisture content of gravel pavement between wheel ruts

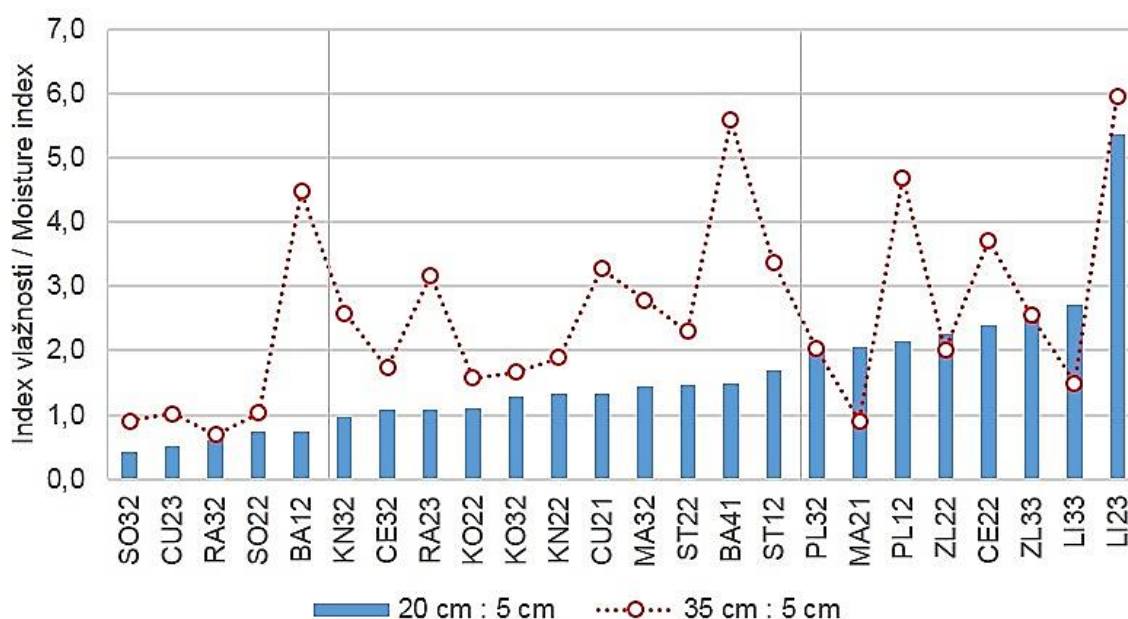
6.4.1.3 Ocena vsebnosti vlage z gravimetričnimi vzorci iz vzorčnih izkopov

Estimating moisture content with gravimetric samples from sampling pits

Vlažnost pomembno vpliva na nosilnost vozišča. Potrebovali bi kakovosten podatek o povprečni vlažnosti, a je njegovo pridobivanje z gravimetričnimi vzorci na različnih globinah po obsegu terenskega in laboratorijskega dela zelo zamudno.

Ker smo v sklopu raziskave izvedli 24 vzorčnih izkopov nasipnega dela vozišč gozdnih cest, smo takrat odvzeli tudi gravimetrične vzorce za določitev vlažnosti na globinah 5 cm, 20 cm in 35 cm. Izkope smo izvedli v začetku septembra v sušnem obdobju na različnih koncih Slovenije in gozdnih cestah različnih kategorij. Bolj kot absolutne vrednosti vlažnosti so nas zanimali odnosi med vrednostmi vsebnosti vlage znotraj posameznega profila. Izračunali smo indekse med gravimetrično vlažnostjo na dani globini in gravimetrično vlažnostjo na referenčni globini, ki je bila 0–10 cm.

Rezultati kažejo (slika 61, stolpci), da je vsebnost vlage na globini 20 cm na večini cest višja kot na površju ceste. Izjema so glavne gozdne ceste na (slika 61, levo), pri katerih po našem mnenju razlika nastaja zaradi natančnosti merilnih metod in nizkih vsebnosti vlage.



Slika 61: Indeksi vlažnosti za vzorce materialov voziščnih konstrukcij z vzorčnih izkopov

Figure 61: Moisture indexes for pavement aggregate samples from sampling pits

Izkopi, pri katerih dosega indeks med vlažnostjo na globini 20 cm in vlažnostjo na globini 5 cm vrednost preko dva (desno), se večinoma nanašajo na stranske gozdne ceste na mešani podlagi. Za nekatere izmed njih smo ugotovili (podpoglavje 6.5), da so zgrajene iz granulometrijsko neustreznih materialov, drugi se nahajajo na vodonepropustnih podlagah, kar deloma pojasnjuje visoke vrednosti indeksa.

Zanimiva je tudi primerjava vsebnosti vlage v globini 35 cm z vlažnostjo obrabne plasti. Indeksi praviloma presegajo vrednost 2,0. To nakazuje trajno prisotnost kapilarne vode v spodnjih plasteh voziščne konstrukcije. Najverjetnejši vzrok so uporabljeni materiali z velikim deležem finih delcev. Pri tem je treba poudariti, da imajo vse analizirane ceste na mestih izkopov urejeno odvodnjavanje (vzdrževane koritnice in jarki), v bližini pa ni nobenih vidnih vodnih virov.

Gravimetrična vsebnost vlage obrabne plasti gozdne ceste je groba ocena povprečne vlažnosti voziščne konstrukcije. Ker ne razpolagamo z bolj kakovostnim podatkom, smo preverili njeno uporabnost za kovariato v analizah nosilnosti.

6.4.2 Vpliv vsebnosti vlage na meritve nosilnosti vozišča

Effects of moisture content on carriageway bearing capacity measurements

6.4.2.1 Vlažnostne razmere na cestah v času sezonskih meritev nosilnosti

Moisture conditions on roads during seasonal measurements of bearing capacity

Vlažnostne razmere v času sezonskih meritev nosilnosti cest smo ocenili z gravimetričnimi vzorci obrabne plasti, rezultate pa združili glede na letni čas. Povprečna vsebnost vlage v obrabni plasti je karakteristika ceste na določenem območju, ki je odvisna od zgodovine padavinskih razmer ter primerljivosti geometrijskih elementov in vgrajenih materialov na analiziranih prečnih profilih. Zbrani podatki so omogočili proučitev razlik med povprečji za posamezna obdobja istih profilov, ne pa tudi značilnosti razlik med različnimi cestami.

Povprečna vsebnost vlage obrabnih plasti se skozi leto spreminja (preglednica 19). Vzorec sprememb je podoben ne glede na to, ali gre za glavne, stranske, nove ali stare ceste. Najvišja povprečna vsebnost vlage za vse ceste je pozimi (10,1 m.-%), najnižja pa poleti (5,1 m.-%). Povprečje jesenskih vrednosti (5,8 m.-%) je med poletnim in pomladanskim povprečjem (6,8 m.-%). Razlike v povprečnih sezonskih vrednostih so značilne pri večini cest. Z naknadno analizo smo poiskali skupine z značilno razliko v povprečni vlažnosti, skupino pa označili s kratico. Praviloma izstopa vlažnost v zimskem času (preglednica 19). Na cestah »Planinca« in »Strešni« zaradi velike variabilnosti razlike niso značilne niti pozimi.

Preglednica 19: Povprečna sezonska vsebnost vlage obrabne plasti na analiziranih gozdnih cestah leta 2009²¹

Table 19: Average seasonal moisture content of wearing course on the analysed forest roads in 2009²⁰

Cesta Road	Kategorija Road class	Podlaga* Base*	Pomlad: p Spring: p			Poletje: s Summer: s			Jesen: j Autumn: j			Zima: z Winter: z		
			n	$\bar{x}$	p<0,05	n	$\bar{x}$	p<0,05	n	$\bar{x}$	p<0,05	n	$\bar{x}$	p<0,05
Ravnik	G2	K	12	4,5	z	32	4,3	z	12	6,0		15	7,1	p, s
Soteska	G2	K	6	3,7	z	20	3,7	z	11	4,3	z	12	7,2	p, s, j
Knipajz	G2	M	3	3,3	z	11	3,1	z	9	3,4	z	6	10,9	p, s, j
Bajs	G2	M	4	5,3	z	19	6,0	z	4	4,3	z	5	10,4	p, s, j
Planinca	G3	K	6	6,6		11	5,8		7	6,1		3	10,4	
Čemerje	G3	K	---	---	---	8	6,8		6	8,5	---	---	---	---
Čutarovka	G3	K	15	5,6		29	3,6	z	9	7,4		3	7,6	s
Macesnova	G3	K	---	---	---	8	4,1	z	6	6,9		5	9,0	s
Zlaka	G3	M	---	---	---	11	5,4		4	5,1	---	---	---	---
Lipovec	G3	M	---	---	---	8	7,0		6	7,2	---	---	---	---
Kovkovo	G3	M	4	8,0	z	8	5,0	p, z	6	5,1	p, z	3	12,6	p, s, j
Strešni	G3	M	6	5,6		11	6,8		7	5,8		3	13,5	

* K-karbonat / lime, M-mešana / mixed

6.4.2.2 Odvisnost nosilnosti vozišča cest od gravimetrične vlažnosti

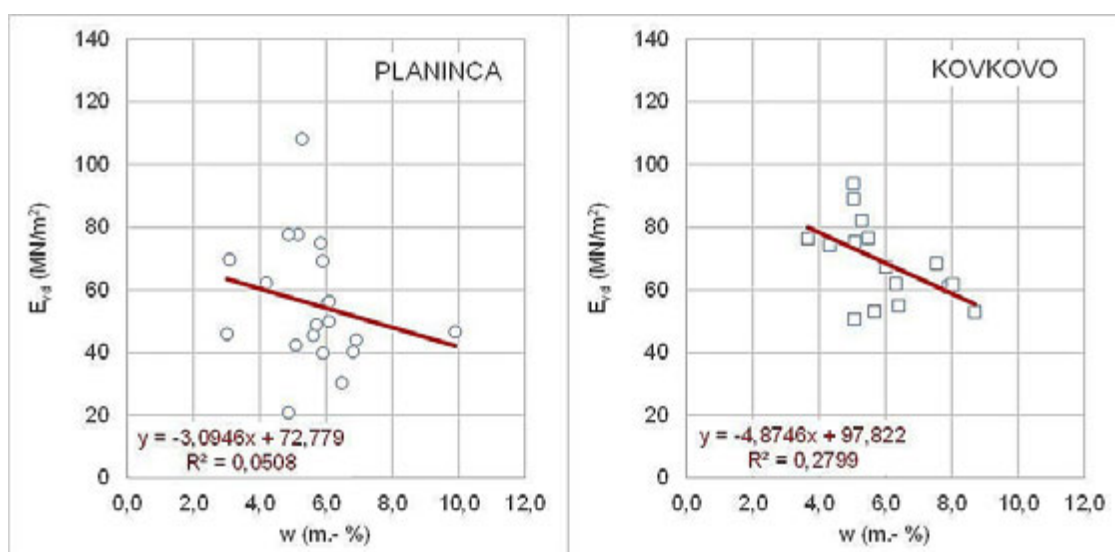
Dependence of road carriageway bearing capacity on gravimetric moisture

Oblikovali smo bazo meritev nosilnosti vozišča, za katere smo razpolagali tudi s podatkom o gravimetrični vsebnosti vlage obrabne plasti v trenutku meritve nosilnosti. Upoštevali smo podatke za pomlad, poletje in jesen. Meritev nosilnosti vozišč in vsebnosti vlage v zimskem nismo upoštevali.

Na podlagi meritev v letu 2009 ugotavljamo, da je nosilnost vozišča v kolesnici na nasipu v slabi korelaciji z gravimetrično vsebnostjo vlage obrabne plasti (slika 62 in slika 63). Z večanjem vsebnosti vlage nosilnost pada, korelacije pa so šibke. Vsebnost vlage je grob indikator vlažnosti podlage (nosilne plasti in predvsem nasipa). Te ugotovitve veljajo za obe kategoriji gozdnih cest ter vse obravnavane podlage in starosti.

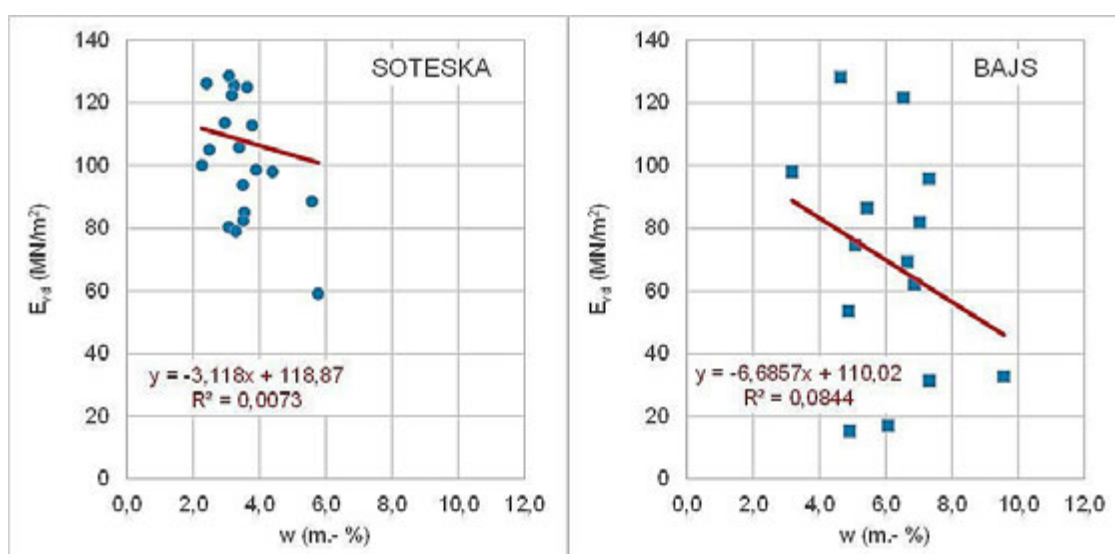
Pričakovali smo večje razlike v vsebnosti vlage obrabne plasti gozdnih cest preko leta, predvsem pa močnejšo odvisnost nosilnosti od vlažnosti v trenutku meritve nosilnosti. Večje stopnje odvisnosti smo pričakovali pri novih cestah na mešani podlagi (slika 62) ter zlasti pri stranskih cestah (slika 63), vendar meritve niso potrdile nobene od naših pričakovanj.

²¹ Obdobja brez podatkov smo v preglednici 19 označili s črticami. (Seasons without data are marked with lines in table 19.)



Slika 62: Odvisnost nosilnosti kolesnice v nasipu od gravimetrične vsebnosti vlage obrabne plasti za staro stransko cesto na karbonatni podlagi (levo) in novo stransko cesto na mešeni podlagi (desno)

Figure 62: Dependence of bearing capacity at wheel rut in embankment from wearing course gravimetric moisture content for an old secondary road on lime base (left) and a new secondary road on mixed base (right)



Slika 63: Odvisnost nosilnosti kolesnice v nasipu od gravimetrične vsebnosti vlage obrabne plasti za novo glavno cesto na karbonatni podlagi (levo) in novo glavno cesto na mešeni podlagi (desno)

Figure 63: Dependence of bearing capacity at wheel rut in embankment from wearing course gravimetric moisture content for a new primary road on lime base (left) and a new primary road on mixed base (right)

Gravimetrična vsebnost vlage v obrabni plasti je bila ugotovljena vsaj en dan po padavinah. Poroznost obrabne plasti analiziranih gozdnih cest je taka, da so meritve nosilnosti očitno

potekale v pogojih »izpraznjenega« sistema por. Gravitacijska voda je odtekla, ostala je vezana voda, ki je relativno malo. Odtekla je v nosilno plast, kjer pa je njen vpliv na nosilnost močno odvisen od vrste vgrajenega materiala, načina vgradnje (zgoščenost), debeline nosilne plasti, nosilnosti podlage ter ne nazadnje tudi od oblike ceste in možnosti odvajanja vode. Če ima cesta jarek in je ta zgrajen preplitvo, bo voda iz jarka namakala nosilno plast, namesto da bi jo sušila. Posledica je velika variabilnost analizirane odvisnosti.

Odvisnost nosilnosti od vlažnosti je na območju do točke zasičenosti tal z vodo obratno sorazmerna in nelinearna. Sprva je njen vpliv velik, z nadaljnjim povečevanjem vlažnosti pa je vpliv vse manjši.

Vsebnost vlage obrabne plasti je v našem primeru slab indikator vlažnosti voziščne konstrukcije. Na osnovi prikazanih rezultatov smo se odločili, da gravimetrične vsebnosti vlage obrabne plasti ne uporabimo za kovariato v poskusih značilnosti razlik med povprečno nosilnostjo različnih skupin cest.

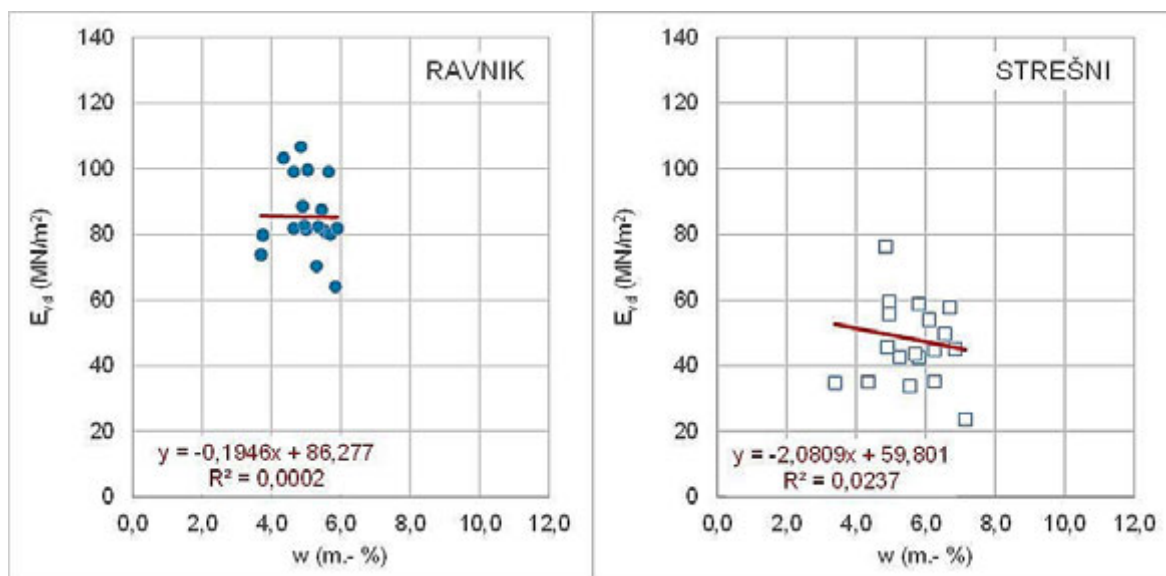
6.4.2.3 Odvisnost nosilnosti vozišča cest od izotopske vlažnosti

Dependence of road carriageway bearing capacity on isotope moisture

Tekom meritev izotopske vlažnosti smo na merilnih mestih »a«, »b«, »c«, »d« in »e« izmerili tudi nosilnost. S tem smo dobili možnost proučiti neposredno zvezo med povprečno vlažnostjo in dinamičnim deformacijskim modulom cestnega telesa pod merilnim mestom.

Odvisnost med izotopsko vsebnostjo vlage in nosilnostjo je za dve cesti prikazana na sliki 64, za nosilnost na profilu smo upoštevali povprečje dveh meritev na kolesnici v nasipu. Cesta »Ravnik« je primer 30 let stare, a redno vzdrževane glavne gozdne ceste na dobro prepustni karbonatni podlagi. Cesta »Strešni« je primer povsem nove stranske gozdne ceste na slabo prepustni mešani geološki podlagi, ki v trenutku teh meritev še ni bila uporabljena, vendar je eno leto prezimila. Gre torej za dva ekstrema. Povprečna nosilnost med njima je različna. Nova stranska cesta ima pol manjšo nosilnost od stare glavne ceste. Interval vsebnosti vlage med njima je podoben, kljub temu da smo ga izmerili z izotopsko sondo. Korelacije med znakoma praktično ni.

Podobne rezultate smo dobili tudi za dve stranski cesti na prepustni podlagi, od katerih je bila ena nova, druga pa stara 5 let (priloga N). Pri tem smo namesto linearne zveze uporabili potenčno krivuljo, saj gre v resnici za nelinearno zvezo. Rezultat je podoben (slika 64) in kaže, da pri meritvah nosilnosti vpliva vlaga ni mogoče enostavno izločiti.



Slika 64: Odvisnost nosilnosti vozišča (povprečje merilnih mest »b« in »c«) od izotopske vsebnosti vlage za staro glavno cesto na karbonatni podlagi (levo) in novo stransko cesto na mešeni podlagi (desno)

Figure 64: Dependence of carriageway bearing capacity (average of measurement spots »b« and »c«) from isotope moisture content for an old primary road on lime base (left) and a new secondary road on mixed base (right)

6.4.2.4 Spremembe povprečne nosilnosti vozišča ob nevihti

Variations in average bearing capacity of the road in case of storm

En dan po terminu poletne sezone meritev nosilnosti na vseh proučevanih cestah se je v popoldanskem času 4. avgusta 2009 nad območjem Planinskega polja razbesnela poletna nevihta ravno v času, ko smo na profilu »Ravnik« menjali baterije v števcu prometa. Še med nevihto smo se odpeljali na lokacijo ceste »Čutarovka«, ki je 6 km zračne razdalje oddaljena od ceste »Ravnik«. Ker je nevihta zajela tudi cesto »Čutarovka«, smo se odločili, da preverimo, kako kratkotrajne intenzivne padavine vplivajo na nosilnost gozdnih cest. Pred nevihto na območju obeh cest ni bilo padavin 11 dni. Po nevihti je bilo vroče poletno vreme brez padavin še 7 dni.

Cesta »Ravnik« je stara glavna gozdna cesta na prepustni karbonatni podlagi, cesta »Čutarovka« pa nova stranska gozdna cesta na prepustni karbonatni podlagi. Ugodne okoliščine so omogočile izvedbo dveh dvofaktorskih poskusov. Prvi faktor je bil »termin« in je imel tri obravnavanja, drugi faktor je bil »MERILNO MESTO« in je imel dva nivoja. Oba faktorja sta slučajna. Za obe cesti smo meritve nosilnosti izvedli v polnem obsegu 3. avgusta 2009 in smo torej imeli primerljivo izhodiščno stanje. Meritve nosilnosti po nevihti smo izvedli 18 ur po koncu padavin. Dodatne meritve nosilnosti smo ponovili na istih

profilih štiri oziroma pet dni po koncu nevihte. Oba faktorja sta bila fiksna. Za vsako cesto smo izvedli ločen dvofaktorski poskus, glavni rezultati obeh poskusov so prikazani v preglednici 20.

Preglednica 20: Padec nosilnosti vozišča dveh gozdnih cest na karbonatni podlagi ob nevihti 4. avgusta 2009
Table 20: Drop in carriageway bearing capacity for two forest roads on lime base after a storm on August 4th 2009

Cesta Road	Termin Term	Vsebnost vlage (m. %) Moisture content (m. %)			Kolesnica v odkopu Rut in excavation		Kolesnica v nasipu Rut in embankment	
	DD.MM.YY	n	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s
Ravnik	03.08.09	6	2,7	0,7	117,7	13,8	134,4	23,4
Ravnik	05.08.09	6	5,0	0,6	91,7*	11,0	114,0	21,9
Ravnik	08.08.09.	6	4,7	2,3	127,5*	19,9	132,0	34,2
Čutarovka	03.08.09	9	2,5	1,1	134,8*	26,2	146,2**	33,4
Čutarovka	05.08.09	9	5,0	0,4	84,6*	11,0	83,0**	8,2
Čutarovka	09.08.09.	9	3,2	0,6	103,8	24,4	104,7*	19,2

* ($p < 0.05$), ** ($p < 0.01$)

Dan po nevihti je vrednost povprečne nosilnosti ceste »Ravnik« padla za 20 %, ceste »Čutarovka« pa povprečno za 40 %. Razlike v poprečni nosilnosti do dneva poprej so bile značilne za stransko gozdno cesto, ne pa tudi za glavno gozdno cesto. Na stranski gozdni cesti so bile razlike značilno bolj izrazite na nasipni kolesnici. Razlike v povprečni nosilnosti glede na kontrolne meritve štiri (oz. pet) dni po nevihti so bile statistično značilne za glavno gozdno cesto na odkopni kolesnici in stransko gozdno cesto na nasipni kolesnici.

6.5 VPLIV VGRAJENIH MATERIALOV NA NOSILNOST EFFECTS OF INSTALLED MATERIAL ON BEARING CAPACITY

6.5.1 Zrnastost materialov v voziščnih konstrukcijah Aggregate gradations in pavements

Zrnastost materialov VK smo proučili na dveh skupinah porušnih vzorcev. Prva skupina so vzorci, izkopani med kolesnicama, za gravimetrično določitev vlage. Druga skupina so vzorci, odvzeti tekom izkopov vozišč. Od 543 vzorcev, vključenih v raziskavo, je bilo 471 gravimetričnih in 72 iz vzorčnih izkopov. Sejalne analize smo opravili na 225 vzorcih. Za 225 sejálnih analiz smo izvedli vzorčno kontrolo mas na 45 vzorcih. Osem jih je presegalo toleranco v »izgubi« mase in smo jih izločili iz obdelav, za 217 zrnitev pa smo podatke obdelali.

Zrnavost smo določili 145 gravimetričnim vzorcem. Med 395 vzorci na cestah iz globine 5 cm smo zrnavost določili 103 vzorcem. Izmed 31 gravimetričnih vzorcev na cestah iz globine 15 cm smo rezultate zrnavosti uporabili za tistih 24, ki so bili izkopani v letu 2009. Med 45 vzorci na vlakah iz povprečne globine 5 cm smo zrnavost določili 18 vzorcem.

Zrnavost smo določili 72 vzorcem iz 24 izkopov na 12 cestah. Med izkopom smo pridobili po tri vzorce, iz vsake globine po enega. Povprečne globine vzorcev so bile: 05 cm, 20 cm in 35 cm, povprečne mase vzorcev izkopa pa 2,6 kg. Zrnitve dveh vzorcev izkopa na enaki globini iz iste ceste smo združili v enoten vzorec. Rezultati zrnitve vzorcev posameznega izkopa (slika 65) kažejo, da se material zgornjega nivoja razlikuje od drugih dveh nivojev.



Slika 65: Zrnavost materialov voziščne konstrukcije enega izkopa gozdne ceste na mešani podlagi (levo: globina 0–10 cm; sredina: globina 10–30 cm; desno: globina 30–40 cm)

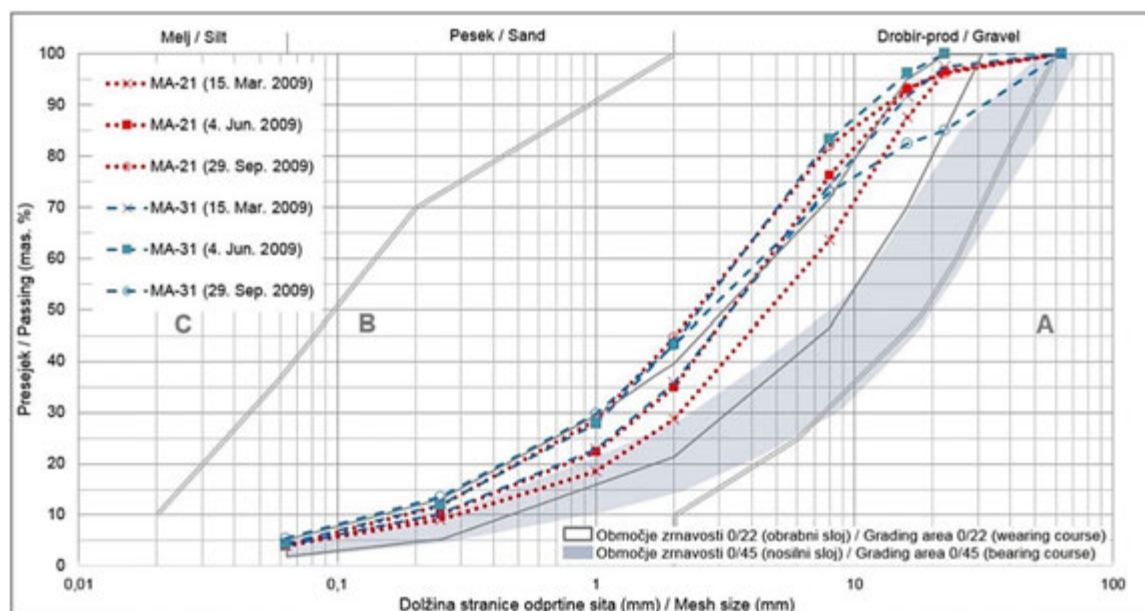
Figure 65: Gradation of the pavement material from a single test pit of the forest road on mixed base (left: depth 0–10 cm; middle: depth 10–30 cm; right: depth 30–40 cm)

Nivojev izkopa ne gre enačiti s plastmi voziščne konstrukcije. V nadaljevanju ločeno prikazujemo rezultate zgornjega nivoja od spodnjih dveh. Pri zgornjem nivoju lahko z določenim pridržkom govorimo o materialu obrabne plasti. Ta je bil na večini od analiziranih cest pripeljan od drugod, vendar ne nujno iz kamnoloma. Kljub temu bomo v nadaljevanju material zgornje plasti cest obravnavali v skladu s standardom za zmesi zrn za nevezane in hidravlično vezane materiale za uporabo v inženirskih objektih in za gradnjo cest (SIST EN 13242:2003+A1). Material spodnjih dveh nivojev je praviloma izviral iz območja trase oziroma smo ocenili, da je iz neposredne okolice gradbišča. Te materiale bomo v nadaljevanju obravnavali kot zemljine, uporabljene kot gradbeni material in kot zmesi zrn.

6.5.1.1 Značilnost zmesi zrn obrabne plasti na analiziranih odsekih cestah

Grading characteristics of wearing course aggregates on the analysed road sections

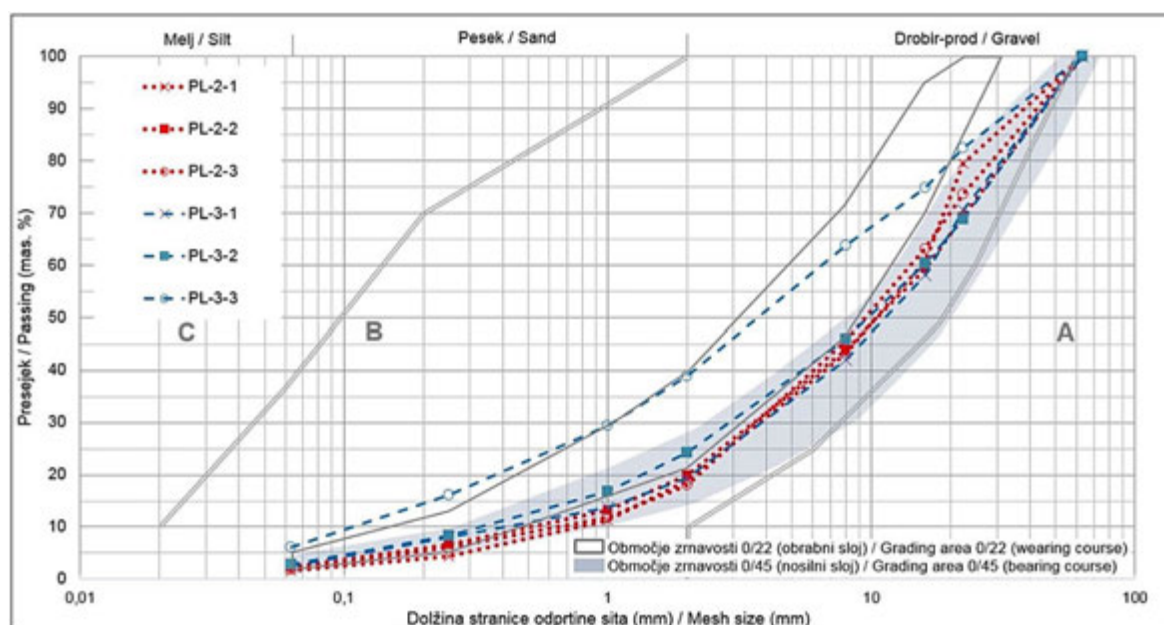
Vzorci za gravimetrično določanje vlažnosti vozišča smo na posameznih profilih vzeli večkrat v letu 2009. Zrnavost posameznih vzorcev za profila št. 21 in 31 na stranski gozdni cesti »Macesnova« (MA, karbonatna podlaga) kaže, da imajo krivulje različnih profilov in različnih terminov izkopa podoben potek (slika 66). Ta je enakomerno zrnat in zvezen ter poteka po zgornjem robu območja zrnavosti 0/22, ki je predpisan za obrabne plasti gramoznih vozišč, medtem ko se sivo polje nanaša na območje ustreznosti zmesi zrn za nevezane nosilne plasti cest. Prikazane zmesi zrn so primer ustreznega materiala obrabne plasti gozdne ceste z malo kamene moke za zaprtje medzrnskih prostorov na vozni površini.



Slika 66: Potek krivulj zrnavosti zmesi zrn obrabne plasti na dveh profilih nove stranske gozdne ceste »Macesnova« (MA) v treh terminih izkopa gravimetričnih vzorcev (globina 0–10 cm)

Figure 66: Course of grading curves for wearing course aggregate on two cross-sections of the new secondary forest road »Macesnova« (MA) on three dates of extraction the gravimetric samples (depth 0–10 cm)

Čprav profila na sliki 66 nista na istem odseku, sta zrnavosti podobni. To ni vedno tako. Slika 67 prikazuje potek zrnavosti za šest profilov stare stranske gozdne ceste »Planinca« na dveh petdeset metrov dolgih odsekih, med seboj oddaljenih 750 metrov. Razlike v zrnavosti med profili znotraj odseka 2 so majhne, znotraj odseka 3 pa velike. Odseka se značilno razlikujeta z vidika povprečne zrnavosti materiala obrabne plasti. Združevanje zrnavosti osnovnih vzorcev v enotno zrnavost za celotno cesto zaradi drugačnosti profila »PL-3-3« (slika 67) pokaže drugačno sliko od zrnavosti večine profilov na tej cesti.



Slika 67: Zrnavost zmesi zrn obrabne plasti šestih profilov na dveh odsekih stranske gozdne ceste »Planinca«

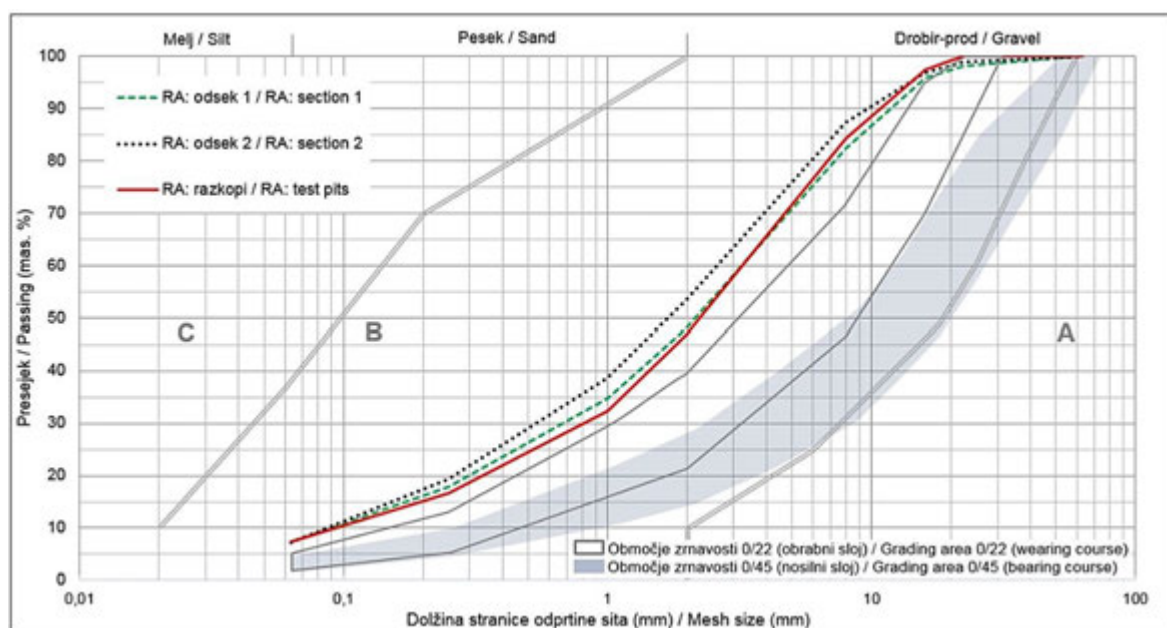
Figure 67: Gradation for wearing course aggregate on six cross-sections of the secondary forest road »Planinca«

6.5.1.2 Reprezentativnost vzorcev materialov iz vzorčnih izkopov

Representativeness of the material specimens from sample pits

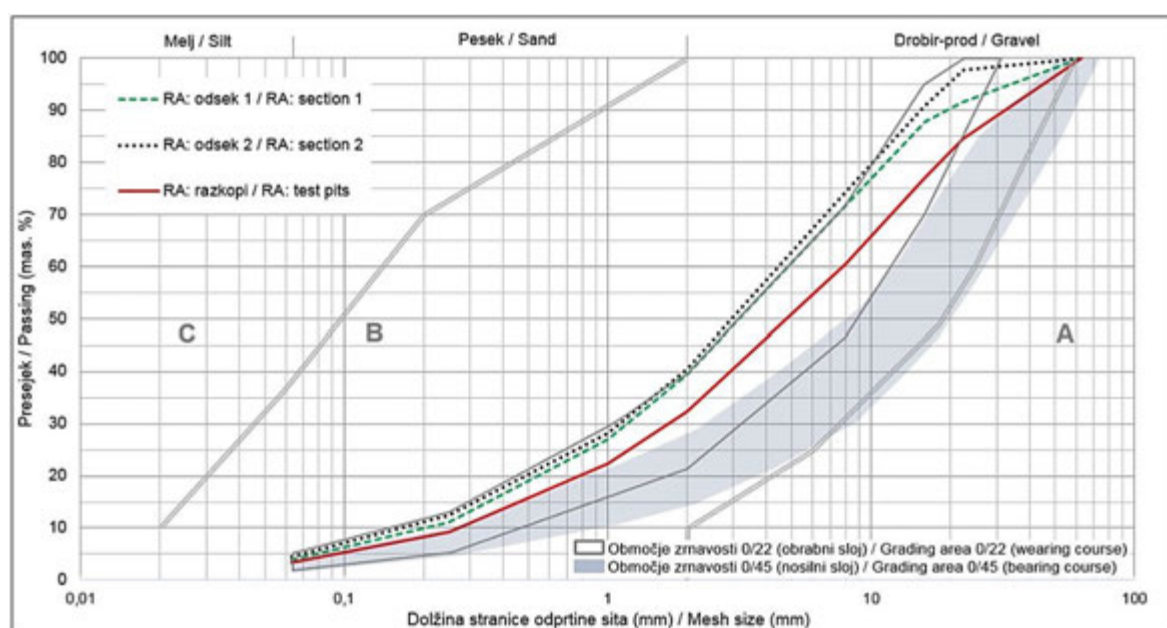
Poleg izkopov vzorcev za določitev gravimetrične vlažnosti vozišča smo izvedli 24 vzorčnih izkopov nasipnih delov vozišča v mešanem profilu. Vsi izkopi so bili izvedeni med 4. in 7. septembrom 2009 na proučevanih cestah.

Razlike med zrnavostjo odsekov in vzorčnih izkopov za obrabne plasti starih glavnih cest so prikazane na sliki 68, za globino 20 cm pa na sliki 69. V obeh primerih zrnavost vzorcev iz izkopov vsebuje več grobih zrn kot primerljivi vzorci gravimetričnih meritev. Podobne rezultate smo dobili za vse ceste (primer za cesti na mešani podlagi je v prilogi O). Vzorčni izkopi vsebujejo več grobih zrn. Gravimetrične vzorce smo jemali glede na potrebno maso in ne glede na debelino nivoja, zato domnevamo, da so srednje globine gravimetričnih vzorcev manjše od tistih pri izkopih. Gravimetrični vzorci bolje reprezentirajo obrabno plast kot vzorci izkopov, zato smo analizo zmesi zrn obrabnih plasti v nadaljevanju opravili samo z gravimetričnimi vzorci. Razlike med zrnavostmi gravimetričnih vzorcev in vzorcev izkopov so za nosilne plasti manjše. Ker smo imeli gravimetrične vzorce nosilnih plasti le za štiri ceste, smo analizo materialov nosilnih plasti izvedli samo z vzorci izkopov.



Slika 68: Primerjava zrnivosti odsekov in izkopov na glavni gozdni cesti »Ravnik« (globina 0–10 cm)

Figure 68: Comparison of gradations between sections and test pits on the primary forest road »Ravnik« (depth 0–10 cm)



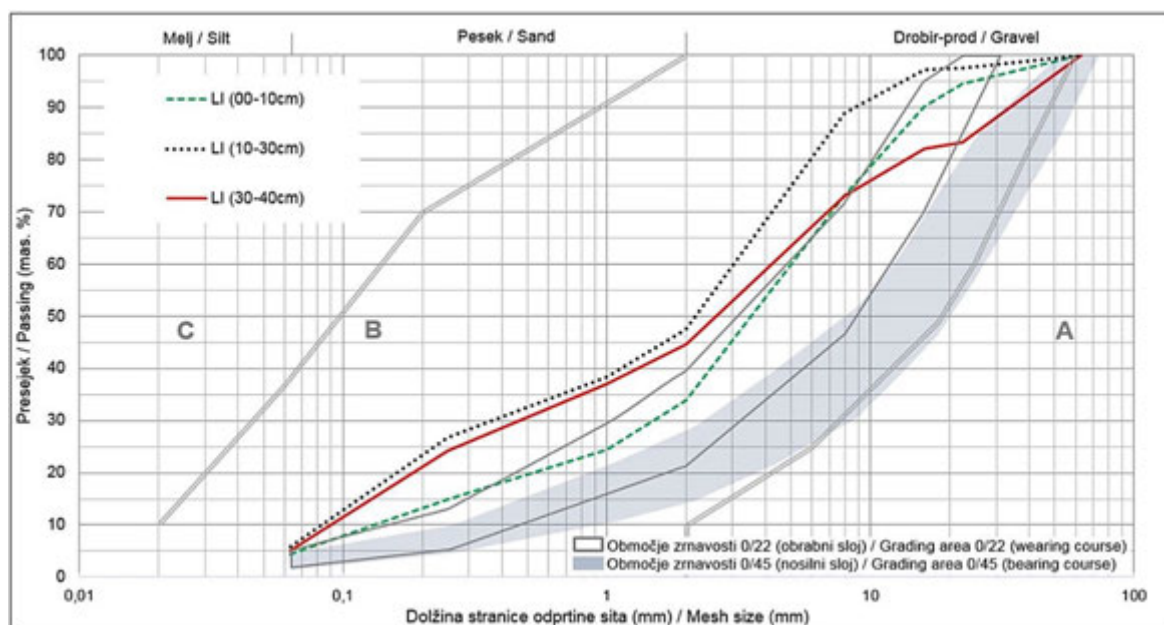
Slika 69: Primerjava zrnivosti odsekov in izkopov na glavni gozdni cesti »Ravnik« (globina 10–30 cm)

Figure 69: Comparison of gradations between sections and test pits on the primary forest road »Ravnik« (depth 10–30 cm)

6.5.1.3 Zrnavost nosilnih plasti v vzorčnih izkopih

Grading for bearing course materials in sample pits

Celovito podobo zrnivosti materialov voziščne konstrukcije na enem izkopu prikazuje slika 70. Je primer delno ustrezne gradnje voziščne konstrukcije z vidika izbire materialov. Material obrabne plasti je ustrezen, medtem ko je material nosilne plasti povsem neustrezen. Za plast na globini 35 cm iz krivulje zrnivosti ni mogoče trditi, da pripada nosilni plasti ali pa gre morda že za nasip iz lokalnega materiala. V vsakem primeru je zrnavostno neustrezen zaradi prevelikega deleža finih zrn in premalo zrn velikosti 5–22 mm.



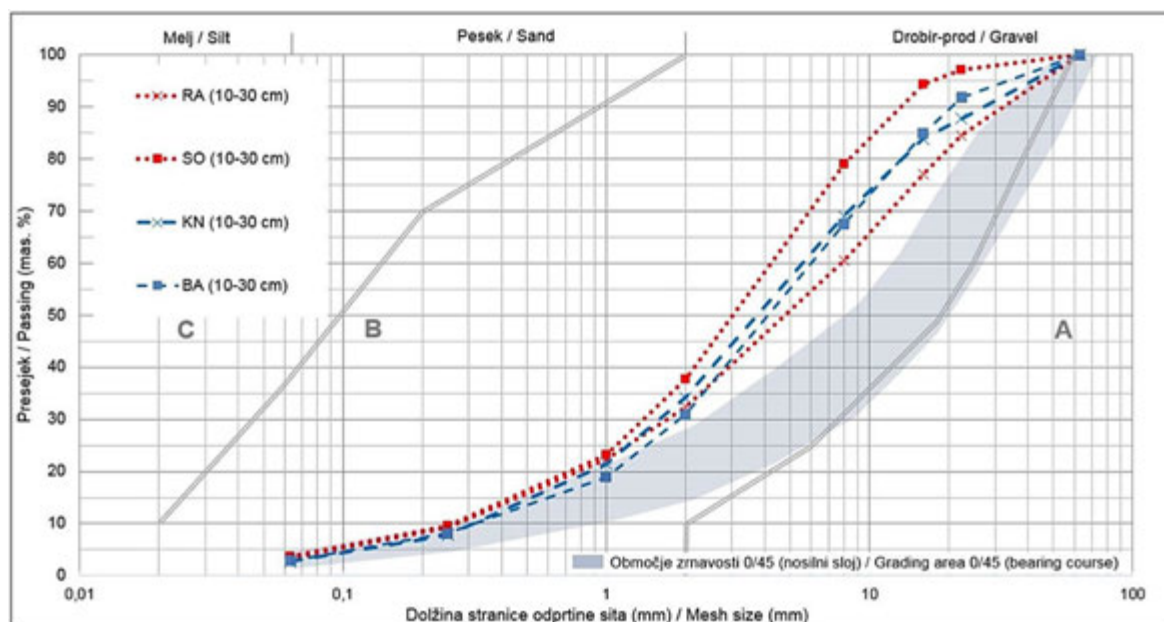
Slika 70: Zrnivosti treh plasti vzorčnega izkopa na stranski gozdni cesti »Lipovec« (mešana podlaga)

Figure 70: Gradations of three layers from test pits on the secondary forest road »Lipovec« (mixed base)

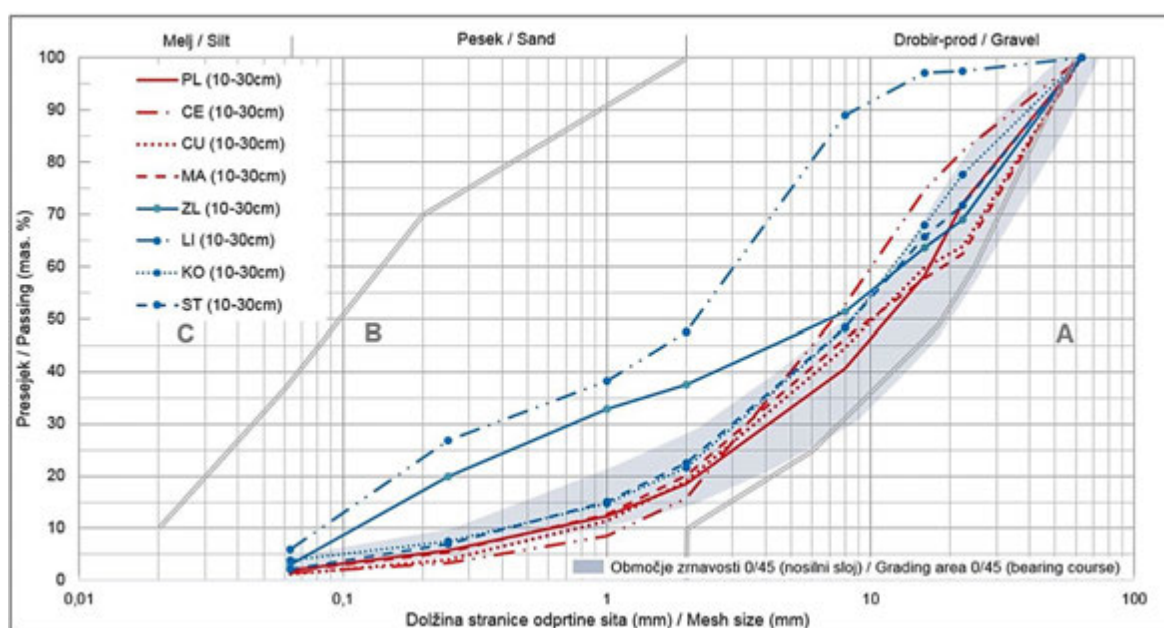
Krivulje zrnivosti omogočajo primerjave med različnimi prometnicami. Primerjave zrnivosti v globini 20 cm med analiziranimi glavnimi gozdnimi cestami prikazuje slika 71, med analiziranimi stranskimi gozdnimi cestami pa slika 72. Primerjave za globino 35 cm prikazuje priloga P. Zrnavost materialov nosilnih plasti analiziranih glavnih cest odstopa od predpisanih geometrijskih lastnosti za nevezane zmesi zrn nosilne plasti cest. Ima preveč zrn velikosti 1/22. Na globini 35 cm je najmanj primeren material ceste »Bajs«, njegova zrnavost je enaka zrnivosti obrabne plasti (priloga Q).

Zrnavost nosilnih plasti štirih analiziranih stranskih gozdnih cest na karbonatni podlagi je na globini 20 cm ustrezna. Na globini 35 cm je v tej skupini preveč zrn 11/32. Zrnavost nosilnih plasti stranskih gozdnih cest na mešani podlagi je treba obravnavati individualno. Zrnavost

nosilnih plasti stranske gozdne ceste »Kovkovo« je ustrezna in gozdne ceste »Strešni« delno ustrezna. Zrnavosti nosilnih plasti cest »Lipovec« in »Zlaka« sta neustrezni. Imata izpadlo zrnavost in preveč finih frakcij, kar onemogoča učinkovito zgoščevanje in nakazuje zmrzlinsko neobstoje nosilne plasti.



Slika 71: Primerjava povprečne zrnivosti izkopov v globini 20 cm za analizirane glavne gozdne ceste
Figure 71: Comparison of test pit average gradations at 20 cm depth for the analysed primary forest roads



Slika 72: Primerjava povprečne zrnivosti izkopov v globini 20 cm za analizirane stranske gozdne ceste
Figure 72: Comparison of test pit average gradations at 20 cm depth for the analysed secondary forest roads

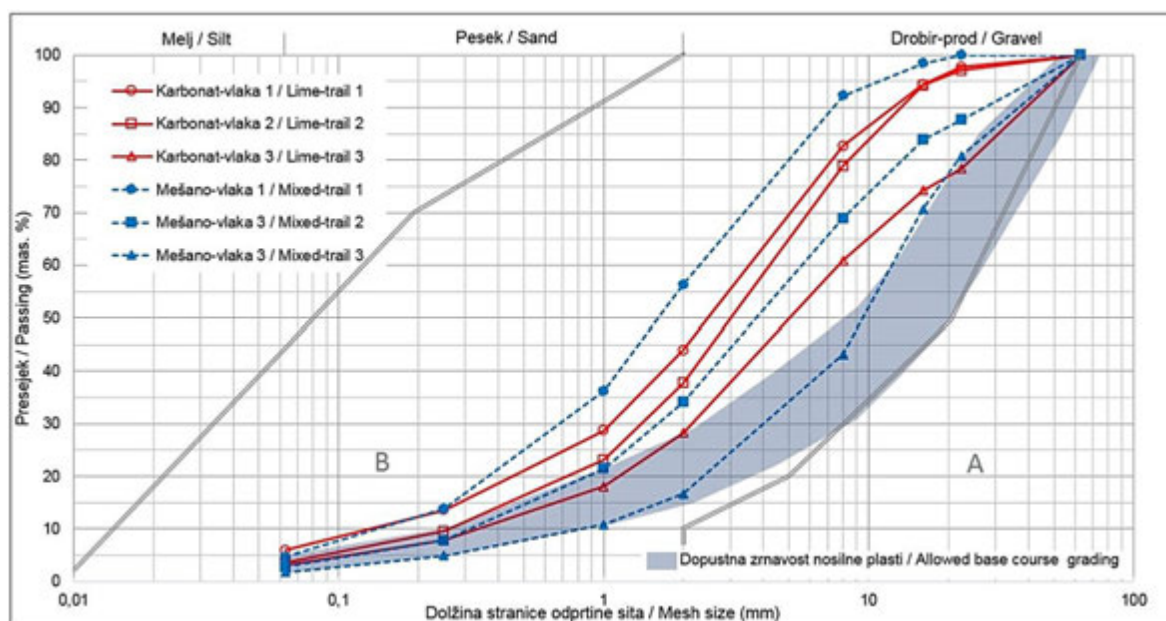
6.5.1.4 Zrnavost materialov na voznih površinah traktorskih vlak

Grading of the materials on skid trail driving lanes

Na podlagi gravimetričnih vzorcev iz globine 0–10 cm smo analizirali zrnavost šestih odsekov grajenih vlak, treh na karbonatni podlagi in treh na mešani podlagi. Planumi vozišč so bili v vseh primerih izdelani iz materiala izkopa, brez odstranjevanja humusa. Čeprav gre za obrabno plast, je ta zgrajena iz materiala, ki je enak materialu nosilne plasti. Zrnavost gravimetričnih vzorcev na vlakah smo obravnavali kot material nosilnih plasti na cestah.

Slika 73 prikazuje rezultate zrnivosti materialov na analiziranih vlakah. Vsaka krivulja je seštevek treh vzorcev, izkopanih marca in septembra 2009 ter maja 2014. Zrnivosti vlak na karbonatni podlagi se manj razlikujejo od tistih na mešani podlagi. Z vidika nosilnih plasti je zrnavost večine vzorcev neustrezna, izjema je zrnavost vlake št. 3 na mešani podlagi. Preveč je frakcij 1/22, kar velja tudi, če materiale obravnavamo z vidika obrabnih plasti.

Večina drobnih frakcij pri tem predstavlja organsko-mineralne strukturne zmesi zrn, ki sicer dobro zapirajo vozno površino pred vdorom vode, a se ta zaradi drugih geometrijskih elementov in opreme vlake koncentrira na vozni površini in praviloma povzroča erozijo.



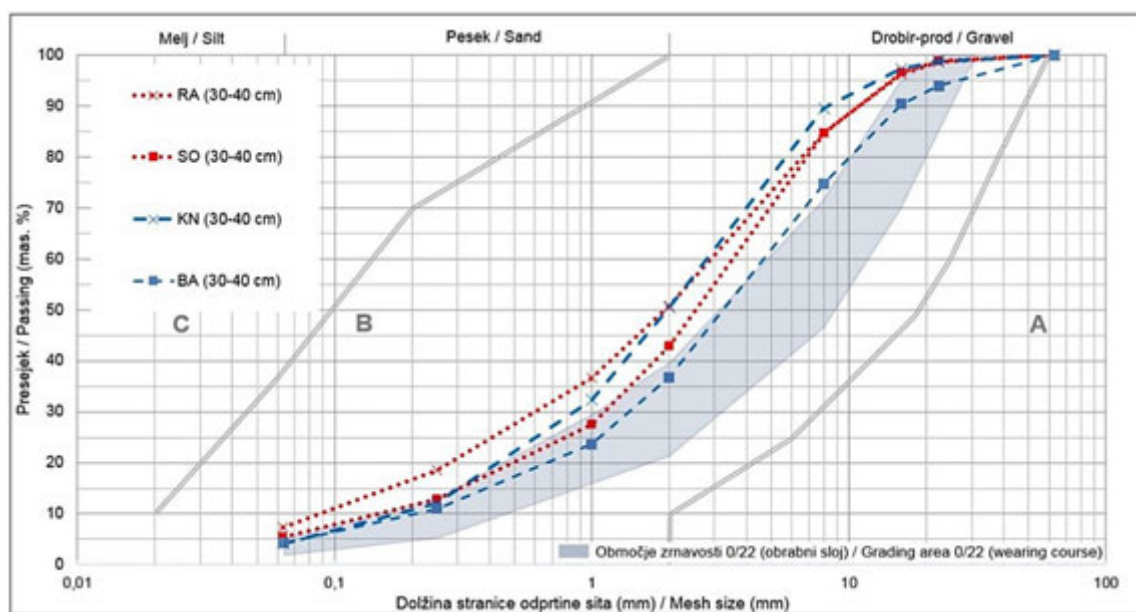
Slika 73: Zrnavost površinskega nivoja vozišča (0–10 cm) na analiziranih vlakah

Figure 73: Gradation of the carriageway surface course (0–10 cm) on the analysed skid trails

6.5.1.5 Zrnavost obrabnih plasti vozišč gozdnih cest

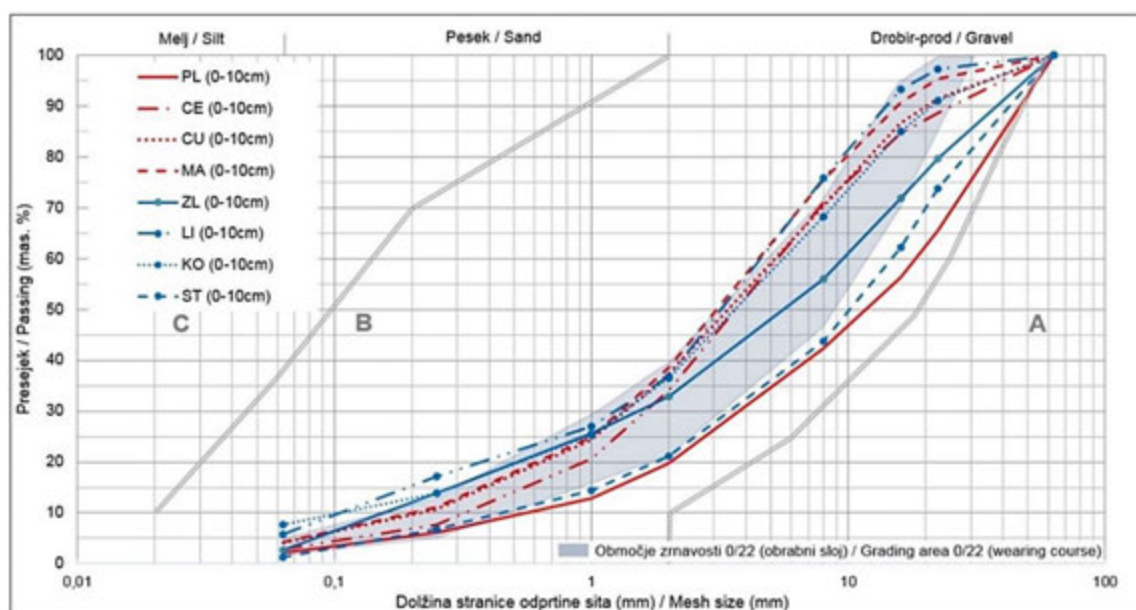
Grading of the carriageway wearing course on the forest roads

Povprečna zrnavost obrabnih plasti analiziranih glavnih cest kaže (slika 74), da v grobem ustrezajo zahtevam za materiale obrabnih plasti. Analizirane ceste se nahajajo na različnih koncih Slovenije. Zrnavosti obrabnih plasti so podobne in blizu predpisanega območja.



Slika 74: Primerjava povprečne zrnivosti obrabnih plasti za analizirane glavne gozdne ceste

Figure 74: Comparison of the average gradation of wearing courses for the analysed primary forest roads



Slika 75: Primerjava povprečne zrnivosti obrabnih plasti za analizirane stranske gozdne ceste

Figure 75: Comparison of the average gradation of wearing courses for the analysed secondary forest roads

Zrnavosti stranskih cest (slika 75) so z vidika poteka in širine zrnavosti ter skladnosti z zahtevami ustreznih tehničnih specifikacij za gradnjo javnih cest v splošnem primerne. Vozišči cest »Planinca« in »Zlaka« imata primanjkljaj finih frakcij za zaklinjanje.

6.5.2 Klasifikacija materialov v analiziranih gozdnih prometnicah

Classification of pavement materials in the analysed forest thoroughfares

6.5.2.1 Klasifikacija materialov v nosilnih plasteh gozdnih cest in vlak

Classification of the materials in bearing courses of the forest roads and skid trails

Materiale nosilnih plasti cest in obrabnih plasti vlak lahko obravnavamo kot zemljin. S pomočjo presejnih krivulj smo izračunali količnik neenakomernosti, količnik zakrivljenosti presejne krivulje ter delež finih delcev. Izračunane vrednosti smo uporabili za inženirsko klasifikacijo zemljin. Za nosilne plasti gramoznih vozišč so primerni enakomerno zrnati drobljenci ali prodc. Pri tem imajo vselej prednost drobljenci, ki se bolje zaklinijo. Tudi plasti spodnjega ustroja gozdne ceste (posteljica), zlasti tiste na nasipnem delu mešanega profila, naj bi bile po zrnavosti čim bolj podobne zrnavosti materialov nosilne plasti.

Preglednica 21 prikazuje podatke za klasifikacijo zemljin analiziranih izkopov cest na dveh nivojih (10–30 cm in 30–40 cm). Ugotovljeni delež finih delcev je na obeh nivojih pri večini cest v okviru dovoljenega. Sklepamo, da so vgrajeni materiali zmrzlinško obstojni (ni pričakovati zmrzlinškega dviga). Izjema je cesta »Lipovec«, ki ima z vidika zrnavosti neustrezno nosilno plast. Delež grobih zrn (nad 0,063 mm) je na splošno visok. Pričakovano visok je na karbonatnih podlagah, visoke vrednosti smo ugotovili tudi na mešanih podlagah. Prikazana klasifikacija zemljin, vgrajenih v nosilne plasti analiziranih gozdnih cest, kaže, da prevladujejo dobro graduirani prodi (GW), nekaj je tudi slabo graduiranih prodiv (GP). Nekoliko manj so primerni zaglinjeni prodi (GP-GC), vendar bi za dokončno sodbo o njihovi ustreznosti morali določiti Atterbergove konsistenčne meje in indeks konsistence.

Za nosilne plasti cest smo določili velikosti zmesi zrn tudi po SIST-standardu za značilnosti materialov pri gradnji cest (preglednica 21). Če obravnavamo material kot zmesi zrn, bi morale ceste imeti vgrajene v nosilne plasti material z oznako 0/45. Z vidika velikosti zmesi zrn imata združena nivoja 10–40 cm ustrezno sestavo na cestah »Zlaka«, »Macesnova«, »Čutarovka« in »Planinca«, delno ustrezno na cestah »Ravnik«, »Strešni« in »Čemerje« ter neustrezno sestavo na cestah »Soteska«, »Knipajz«, »Bajs«, »Lipovec« in »Kovkovo«. Pri zemljinah na vozni površini vlak (preglednica 22) gre za grobozrnate zemljine, a prevladujejo peski. Presenetljivo malo je finih delcev. Po klasifikaciji zmesi zrn je material zelo heterogen, za vlake P3, R2 in R3 je to material nosilnih plasti na vozni površini.

Preglednica 21: AC klasifikacija zemljin nosilnih plasti na analiziranih odsekih gozdnih cest

Table 21: AC soil classification of bearing courses on the analysed forest roads

Cesta + nivo	Kategorija	Podlaga*	Velikost zmesi zrn	% finih delcev	% drobirja v grobih zrnih	Cu	Cc	Material
Road + level	Road class	Base*	Aggregate size	% fines	% gravel in coarse aggregate	Cu	Cc	Material
RA: 10-30 cm	G2	K	0/22	3,4	70,0	30	1,4	GW
RA: 30-40 cm	G2	K	0/45	1,4	81,2	31	1,0	GW
SO: 10-30 cm	G2	K	0/11	3,6	64,6	16	2,1	GW
SO: 30-40 cm	G2	K	0/32	3,1	74,1	23	1,7	GW
KN: 10-30 cm	G2	M	0/16	2,7	67,7	18	1,6	GW
KN: 30-40 cm	G2	M	0/32	1,7	84,8	16	1,5	GW
BA: 10-30 cm	G2	M	0/22	2,9	71,2	20	2,0	GW
BA: 30-40 cm	G2	M	0/22	4,4	68,2	31	2,5	GW
PL: 10-30 cm	G3	K	0/45	1,9	83,0	28	1,6	GW
PL: 30-40 cm	G3	K	0/45	3,5	78,1	41	1,6	GW
CE: 10-30 cm	G3	K	0/32	1,4	85,5	8	1,0	GW
CE: 30-40 cm	G3	K	0/45	4,5	79,1	32	1,6	GW
CU: 10-30 cm	G3	K	0/45	1,2	82,0	23	1,1	GW
CU: 30-40 cm	G3	K	0/56	0,9	86,8	54	2,2	GW
MA: 10-30 cm	G3	K	0/45	1,9	81,4	76	2,3	GW
MA: 30-40 cm	G3	K	0/56	1,4	91,1	51	6,7	GP
ZL: 10-30 cm	G3	M	0/45	2,9	64,3	109	37,1	GP
ZL: 30-40 cm	G3	M	0/45	3,1	63,4	159	20,6	GP
LI: 10-30 cm	G3	M	0/8	5,9	55,8	43	0,6	GP-GC
LI: 30-40 cm	G3	M	0/22	5,1	58,3	47	0,6	GP-GC
KO: 10-30 cm	G3	M	0/22	3,9	81,5	33	1,7	GW
KO: 30-40 cm	G3	M	0/22	3,7	81,3	28	2,0	GW
ST: 10-30 cm	G3	M	0/32	2,1	79,1	33	1,7	GW
ST: 30-40 cm	G3	M	0/22	2,6	74,5	18	2,4	GW

* K-karbonat / lime, M-mešana / mixed

Preglednica 22: AC-klasifikacija zemljin v krovni plasti (0–10 cm) na analiziranih grajenih vlakih

Table 22: AC AC classification of surfacing layer (0–10 cm) on the analysed constructed skid trails

Cesta + nivo	Kategorija vlake	Podlaga*	Velikost zmesi zrn	% finih delcev	% drobirja v grobih zrnih	Cu	Cc	Material
Road + level	Skid trail class	Base*	Aggregate size	% fines	% gravel in coarse aggregate	Cu	Cc	Material
P1: 0-10 cm	V1	K	0/11	5,9	59,5	17	3,3	GP-GC
P2: 0-10 cm	V1	K	0/16	3,6	64,6	15	1,8	GW
P3: 0-10 cm	V1	K	0/45	3,1	74,1	23	1,6	GW
R1: 0-10 cm	V1	M	0/8	4,7	45,8	15	1,3	SW
R2: 0-10 cm	V1	M	0/32	2,7	67,7	18	3,8	SP
R3: 0-10 cm	V1	M	0/45	1,7	84,8	14	1,4	SW

6.5.2.2 Klasifikacija zmesi zrn obrabnih plasti gozdnih cest

Classification of the wearing course aggregates on forest roads

Ključ za klasifikacijo zmesi zrn obrabnih plasti cest sta velikost zmesi zrn in delež finih zrn (preglednica 23). Upoštevali smo kriterij 10 % nadmernih zrn. Velikost zmesi zrn je ustrezna na večini cest. Prevelika je na cestah »Planinca«, »Zlaka« in »Strešni«. Velikost zmesi zrn je premajhna na cesti »Knipajz«. Delež finih zrn z izjemo ceste »Kovkovo« ustreza kategoriji f_8 v vgrajeni plasti. Neoptimalen C_u je v preglednici 23 označen krepko.

Preglednica 23: AC klasifikacija zmesi zrn obrabne plasti na analiziranih odsekih gozdnih cest

Table 23: AC classification of wearing course aggregate on the analysed sections of forest roads

Odsek Section	Kategorija Road class	Podlaga Base	Vzorcev Samples	% finih delcev % fines	% drobirja v grobih zrnih % gravel in coarse aggr.	C_u	C_c	Velikost zmesi zrn Aggregate size
RA21	G2	K	4	7,4	56,0	37	1,5	0/11
RA31	G2	K	4	7,2	50,2	29	1,2	0/11
SO21	G2	K	4	5,7	67,8	29	3,4	0/11
SO31	G2	K	3	5,3	53,1	20	2,1	0/5
KN12	G2	M	3	3,3	58,3	18	1,3	0/8
KN21	G2	M	3	4,5	48,2	17	1,4	0/5
KN32	G2	M	3	4,7	48,6	17	1,4	0/5
BA12	G2	M	4	4,9	63,2	27	2,3	0/11
BA22	G2	M	4	4,4	70,8	20	2,2	0/16
BA33	G2	M	4	3,6	64,3	17	1,6	0/11
PL11	G3	K	4	1,5	85,1	2	8,0	0/45
PL21	G3	K	3	1,9	82,7	20	2,7	0/32
PL31	G3	K	4	3,1	78,3	60	3,8	0/45
CE22	G3	K	3	2,6	67,4	17	1,6	0/22
CE31	G3	K	3	3,1	68,4	16	1,9	0/16
CU11	G3	K	3	4,4	65,0	26	1,9	0/16
CU21	G3	K	5	3,9	64,1	25	1,8	0/16
CU31	G3	K	3	4,3	67,6	29	2,1	0/16
MA22	G3	K	3	4,0	66,3	21	1,9	0/11
MA31	G3	K	3	4,7	62,3	25	2,0	0/11
ZL11	G3	M	3	2,8	69,8	59	3,5	0/31
ZL21	G3	M	3	2,4	72,2	44	1,5	0/31
ZL31	G3	M	3	2,9	64,8	68	0,8	0/22
LI22	G3	M	3	5,7	68,4	29	3,4	0/11
LI31	G3	M	3	5,6	65,4	52	2,9	0/11
KO23	G3	M	3	5,6	67,5	38	2,0	0/22
KO31	G3	M	3	9,5	70,1	88	5,7	0/16
ST11	G3	M	4	1,2	84,7	21	2,0	0/45
ST21	G3	M	4	1,1	81,4	38	2,1	0/45
ST31	G3	M	4	1,7	72,1	32	2,8	0/22

6.5.3 Zgradba voziščnih konstrukcij v vzorčnih izkopih gozdnih cest

Pavement structure in sample pits of forest roads

Vzorčne izkope smo izvedli na nasipnem delu vozišča v mešanem profilu do globine 40 cm. Meritve nosilnosti so bile izvedene na nivoju vozišča (globina 0 cm), na globini 20 cm in na globini 40 cm. Vzorci v posameznem izkopu za določitev vlažnosti predstavljajo povprečne razmere na globini 5 cm, 20 cm in 35 cm. Po končanem izkopu ter meritvah nosilnosti smo na vsakem izkopu opravili prepoznavanje plasti, izmero debeline plasti in dokumentiranje izkopa (priloga Q, priloga R in priloga S). Razlikovali smo tri plasti: obrabno plast, nosilno plast in spodnji ustroj. Kadar ni bilo mogoče ločiti obrabne plasti od nosilne, smo vso debelino do spodnjega ustroja pripisali nosilni plasti. Kadar se nosilna plast oziroma spodnji ustroj ni končal na globini 40 cm, smo to označili z znakom +.

Preglednica 24 kaže primerjave nosilnosti, debelin plasti in vlažnosti v tednu izvedbe izkopov. Nosilnost z globino pada, vlažnost pa narašča. Najvišjo vrednost nosilnosti smo ugotovili na glavni gozdni cesti »Ravnik«, najmanjšo pa na stranski gozdni cesti na mešani podlagi – »Lipovec«. Najvišji padec nosilnosti z globino smo ugotovili na gozdni cesti »Ravnik«, najmanjši padec pa na cesti »Soteska«. Razmerje v nosilnost na globini 40 cm je med analiziranimi cestami v razmerju 10 : 1.

Ugotovljene povprečne debeline obrabnih plasti so med 5 in 14 cm. Debeline obrabnih plasti na starih glavnih cestah so za 20 % manjše od tistih na novih glavnih cestah. Debeline obrabnih plasti stranskih cest na različnih podlagah so podobne in ne bistveno različne od tistih na glavnih cestah.

Debeline nosilnih plasti (preglednica 24) se gibljejo od 12 do preko 30 cm. Na glavnih cestah so med 14 in 22 cm, na stranskih cestah pa od 12 do 33 cm. Med starimi in novimi glavnimi cestami ni večjih razlik v debelini nosilne plasti. To velja tudi za različne geološke podlage, vendar ti podatki temeljijo samo na osmih izkopih štirih cest. Povprečna debelina nosilnih plasti stranskih cest na karbonatni podlagi je 19,1 cm, na mešani podlagi pa 22,3 cm. Povprečna debelina nosilnih plasti starih stranskih cest je 20,0 cm, novih stranskih cest pa 21,1 cm. Razlike v debelini nosilnih plasti stranskih cest na posameznih izkopih so velike.

Zanimiv je tudi gradient vlažnosti (preglednica 24), ki kaže, da imajo obrabne plasti vozišč različnih kategorij gozdnih cest pozno poleti podobno vsebnost vlage, medtem ko so vlažnosti v notranjosti voziščnih konstrukcij v tistem času zelo različne. Večje vsebnosti vlage smo ugotovili v spodnjih ustrojih cest na mešani podlagi, med njimi pa največje vrednosti vsebnosti vlage na stranskih cestah.

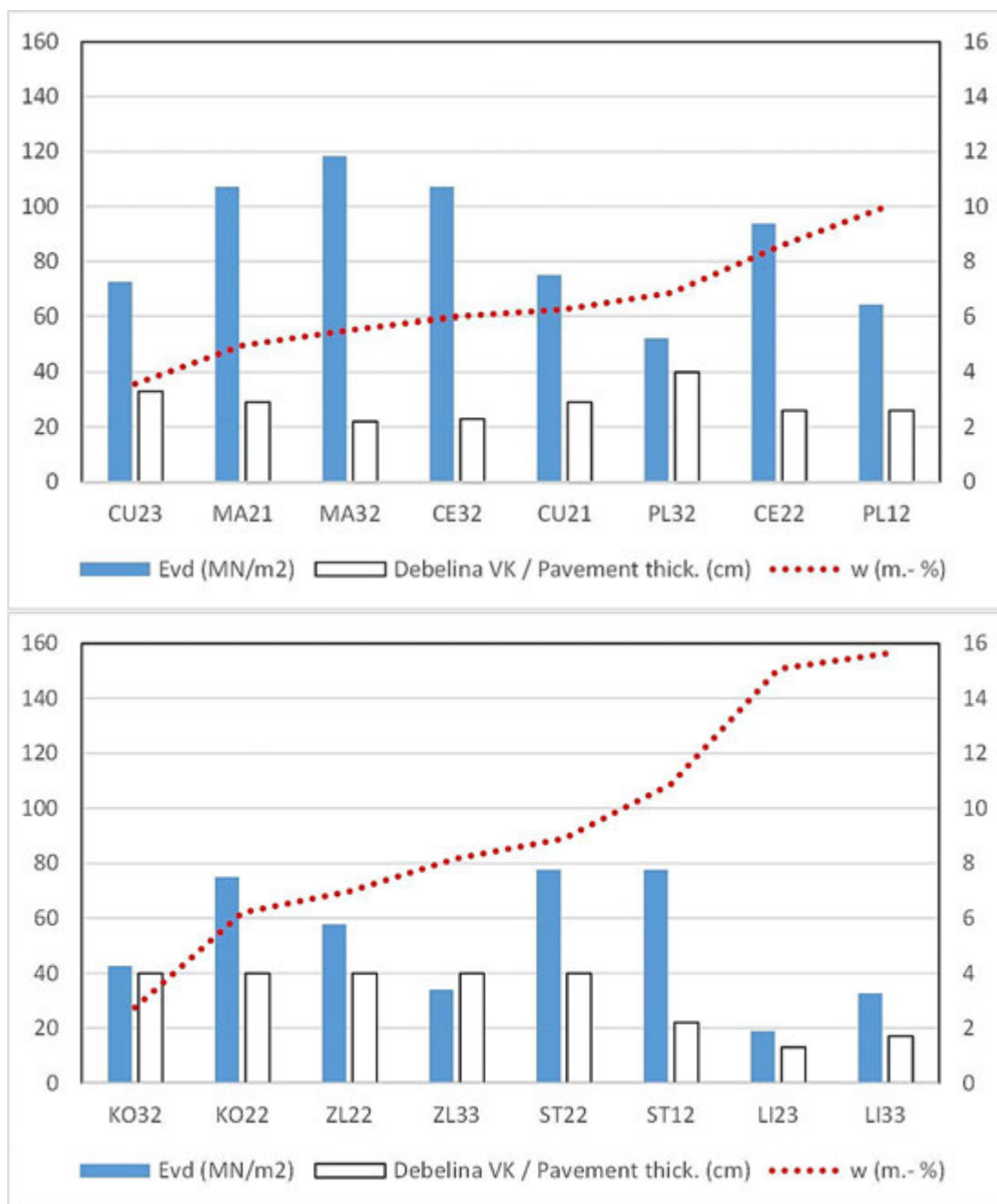
Preglednica 24: Nosilnost, debelina in vsebnost vode v vzorčnih izkopih na analiziranih cestah

Table 24: Bearing capacity, thickness and moisture content in sample pits on the analysed roads

Profil	Obrabna plast / Wearing course			Nosilna plast / Bearing course			Spodnji ustroj / Formation		
Profile	Nosilnost	Debelina	Vlažnost	Nosilnost	Debelina	Vlažnost	Nosilnost	Debelina	Vlažnost
	Bearing c.	Thickness	Moistue	Bearing c.	Thickness	Moistue	Bearing c.	Thickness	Moistue
	(Mn/m ²)	(cm)	(%)	(Mn/m ²)	(cm)	(%)	(Mn/m ²)	(cm)	(%)
RA23	160,7	8	2,3	93,8	14	2,5	27,8	18+	7,3
RA32	107,1	6	3,8	112,5	22	2,3	107,1	12+	2,6
SO22	107,1	10	3,7	90,0	21	2,7	91,1	9+	3,8
SO32	150,0	12	8,4	102,3	20	3,5	107,1	8+	7,6
KN22	107,1	7	1,8	64,3	17	2,4	60,8	14+	3,4
KN32	43,3	---	3,1	33,6	28	3,0	25,9	12+	8,0
BA12	132,4	8	5,6	90,0	30	4,1	38,1	2+	25,1
BA41	83,3	7	2,7	83,3	12	4,0	53,6	19	15,1
PL12	64,3	10	4,0	30,0	16	8,6	14,0	14+	18,8
PL32	52,3	9	3,9	30,0	31	7,8	28,8	---	7,9
CE22	93,8	9	3,6	62,5	17	8,6	32,6	14+	13,4
CE32	107,1	9	4,9	93,8	14	5,3	20,3	17+	8,5
CU21	75,0	8	3,6	44,1	21	4,8	18,6	11+	11,8
CU23	72,6	9	4,7	60,8	24	2,4	40,2	7+	4,8
MA21	107,1	11	3,3	62,5	18	6,8	59,2	11+	3,0
MA32	118,4	10	3,3	60,8	12	4,8	26,5	18+	9,2
ZL22	57,7	16	3,7	47,9	24+	8,4	53,6	---	7,4
ZL33	34,1	7	3,8	31,3	33+	9,6	28,1	---	9,7
LI23	18,9	---	3,4	18,3	13	18,3	11,4	27+	20,3
LI33	32,6	5	7,9	23,4	12	21,4	22,7	---	11,8
KO22	75,0	13	5,2	38,1	27+	5,7	24,2	---	8,2
KO32	42,5	11	2,1	37,5	29+	2,7	40,2	---	3,5
ST12	77,6	10	5,6	35,7	12	9,5	19,1	18+	18,9
ST22	77,6	14	5,7	83,3	26+	8,4	54,9	---	13,1

Zanimalo nas je, kateri od vplivnih dejavnikov bolj prispeva k nosilnosti vozišča cest: vlažnost ali debelina voziščne konstrukcije. Uporabili smo podatke iz vzorčnih izkopov (preglednica 24). Za vlago smo vzeli ponderirano povprečje vlažnosti na nivojih 1–10 cm, 11–30 cm 31–40 cm ter upoštevali ustrezne uteži (0,25, 0,50, 0,25). Debelina voziščne konstrukcije je bila vsota debelin obrabne in nosilne plasti. Če se nosilna plast ni končala pri globini 40 cm (znak + v preglednici 24), smo šteli, da je skupna debelina voziščne konstrukcije 40 cm. Izvedena multipla regresija je kot neznačilni faktor opredelila in izločila debelino voziščne konstrukcije, faktor vlaga je pojasnil 29 % variabilnosti. Za obravnavani

skupini stranskih cest (slika 76) ter ločeno za glavne ceste (priloga T) smo razporedili vzorčne izkope po naraščajoči vlažnosti in prikazali tudi podatke za debelino VK in nosilnost. Vidna je rahla obratno sorazmerna zveza med vlažnostjo in nosilnostjo, medtem ko je zveza med debelino voziščne konstrukcije in nosilnostjo bolj zabrisana.



Slika 76: Porazdelitev vzorčnih izkopov glede na povprečno vlažnost, nosilnost in debelino voziščne konstrukcije za stranske ceste na karbonatni (zgoraj) in nekarbonatni podlagi (spodaj)

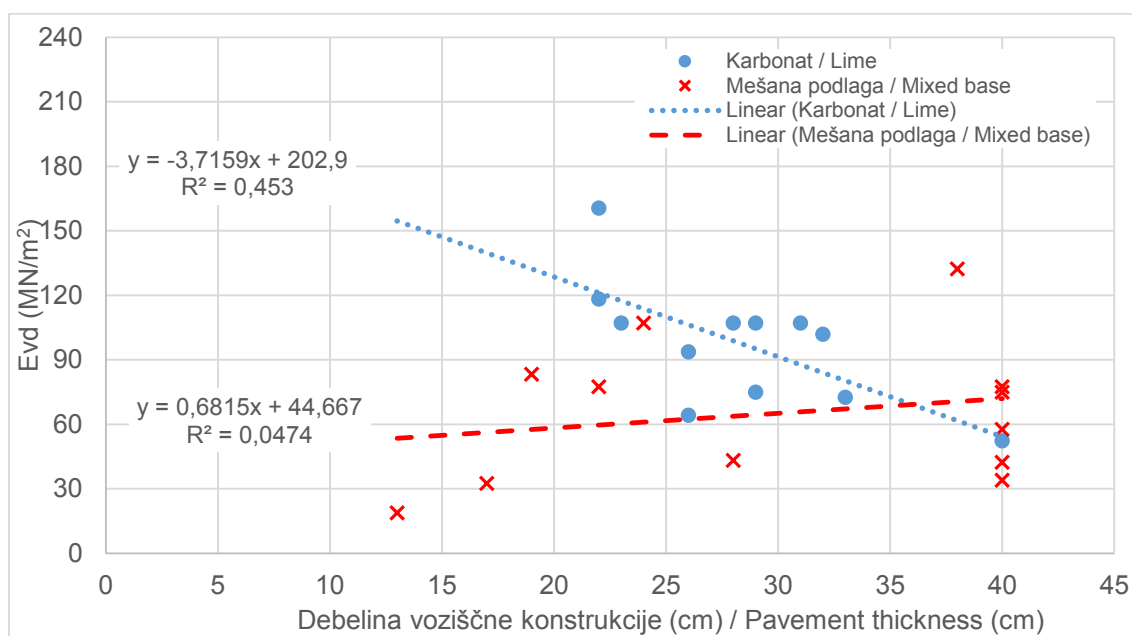
Figure 76: Arrangement of sample pits according to the average moisture content, bearing capacity and pavement thickness for the secondary roads on lime (above) and mixed base (below)

6.5.4 Vpliv debeline nosilne plasti in vrste podlage na nosilnost

Effects of bearing course thickness and subgrade type on bearing capacity

Nosilnost vozišča je rezultat vrste materialov in debeline spodnjih plasti ter nosilnosti temeljnih tal v vlažnostnih razmerah v trenutku merjenja dinamičnega deformacijskega modula. Slika 77 prikazuje odvisnosti med nosilnostjo na vozni površini in razmerami v notranjosti voziščne konstrukcije. Zveze so slabe, saj sočasno vpliva veliko število dejavnikov in njihovih interakcij. Na mešanih podlagah ni korelacije med debelino voziščne konstrukcije in nosilnostjo. Ta zveza je na karbonatnih podlagah rahlo značilna in obratno sorazmerna. Z večanjem debeline voziščne konstrukcije nosilnost vozišča pada. Nasprotje je nelogično samo na videz. Če upoštevamo, da se nosilna plast gradi za doseg zadovoljive nosilnosti vozišča, potem na dobrih podlagah (spodnjem ustroju) ni potrebna velika debelina nosilne plasti. V skupno debelino voziščne konstrukcije smo šteli tudi obrabno plast, za katero smo v prejšnjih podpoglavjih ugotovili, da je zrnavostno večinoma ustrezna in zato prispeva k raznosu prometnih obremenitev.

Za poglobljeno analizo medsebojnih odvisnosti med obravnavanimi faktorji bi potrebovali mnogo več podatkov in v ta namen usmerjeno raziskavo. Prikazane rezultate je zato treba obravnavati previdno, bolj kot opozorilo, da merjenje debeline nosilne plasti ni način za ocenjevanje kakovosti voziščne konstrukcije.



Slika 77: Zveze med nosilnostjo vozišča, debelino voziščne konstrukcije in geološko podlago na vzorčnih izkopih

Figure 77: Relations between carriageway bearing capacity, pavement thickness and geologic base on test pits

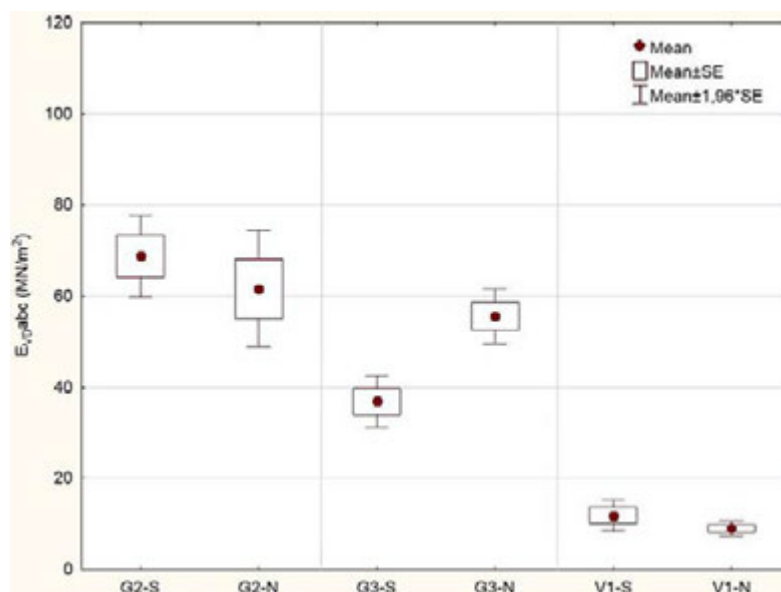
6.6 VPLIV RABE PROMETNIC NA NOSILNOST VOZIŠČNIH KONSTRUKCIJ IMPACTS OF THOROUGHFARE USE ON PAVEMENT BEARING CAPACITY

6.6.1 Ocena vpliva prometa na nosilnost gozdnih prometnic

Assessing the influence of traffic on forest thoroughfare bearing capacity

Oceno vpliva prometne obremenitve na spomladansko nosilnost vozišč smo izvedli tako, da smo združili vse podatke po obravnavanih treh skupinah gozdnih prometnic ter za vsako oblikovali dve podskupini: stare in nove prometnice. Domnevali smo, da je pretekli promet na starih prometnicah pospešil konsolidacijo vozišča in povečal nosilnost. Domnevali smo tudi večjo prometno obremenitev glavnih gozdnih cest. Število meritev v vsaki podskupini G3 je enkrat večje kot pri ostalih podskupinah.

Slika 78 prikazuje aritmetične sredine in intervalne vrednosti v populaciji dveh kategorij cest in ene kategorije grajenih vlak. Za odvisno spremenljivko smo uporabili povprečno vrednost nosilnosti na merilnih mestih »a«, »b« in »c«. Zaradi nehomogenosti varianc smo značilnost razlik testirali s Kruskal-Wallis testom. Razlike med vlakami in cestami so statistično značilne. Pri cestah je statistično značilna razlika v povprečni nosilnosti starih cest in to predvsem zaradi slabe nosilnosti izbranih odsekov na mešani podlagi. Razlike v povprečni nosilnosti med novimi glavnimi in stranskimi cestami niso bile statistično značilne in so znašale v spomladanskem času med 55 in 61 MN/m². Ker se glavne in stranske ceste gradijo na enak način ocenjujemo, da večja prometna obremenitev na analiziranih novih glavnih cest po pol leta uporabe ni imela značilnega vpliva na nosilnost.



Slika 78: Povprečna nosilnosti vozišč gozdnih prometnic spomladi 2009 (S – stare, N – nove)

Figure 78: Average carriageway bearing capacity of forest thoroughfares in spring 2009 (S – old, N – new)

6.6.2 Primernost traktorskih vlak za kamionski prevoz

Suitability of skid trails for truck transport

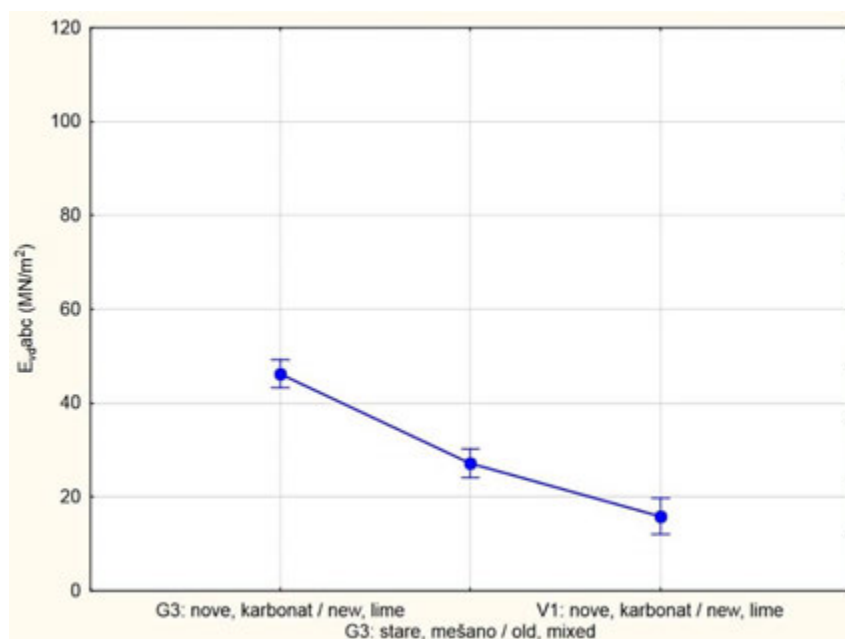
Ocena primernosti vlak za kamionski prevoz temelji na primerjavi nosilnosti vlak in stranskih gozdnih cest. Za vlake smo izbrali podatke o nosilnosti vozišča za poletni termin, za stranske ceste za spomladanski čas, ko naj bi bile ceste najmanj nosilne. Odvisna spremenljivka je bila povprečna nosilnost merilnih mest »a«, »b« in »c« na profilu. Po posameznem merjenju smo imeli različno število ponovitev: za vlake devet in za vsako skupino cest po petnajst.

Oblikovali smo enofaktorski poskus. Fiksni faktor »KATEGORIJA« je imel tri nivoje: nove stranske ceste na karbonatu spomladi, stare stranske ceste na mešani podlagi spomladi ter nove vlake na karbonatu poleti. Rezultati enostavne analize variance so prikazani v preglednici 25. Analizirane skupine se značilno ločijo v povprečni nosilnosti (slika 79). Test mnogoterih primerjav je potrdil značilno različnost med vsemi tremi skupinami.

Preglednica 25: Razlike v povprečni nosilnosti vlak v poletnem času in stranskih cest spomladi

Table 25: Differences in average bearing capacity of skid trails in summer and secondary roads in spring

Vplivni dejavnik / Factor	d.f.	SS	MS	F	p
KAT (Kat. prometnice / Thoroughfare class)	2	5708,43	2854,21	21,3397	0,000***
Ostanek / Residual	36	4815,06	133,75		



Slika 79: Razlike v srednjih vrednostih nosilnosti med vlakami poleti in stranskimi cestami spomladi

Figure 79: Differences in average bearing capacity among skid trails in summer and secondary roads in spring

6.6.3 Prečna ravnost vozišča kot ocena nosilnosti gozdnih cest

Carriageway transverse evenness as forest road bearing capacity estimation

Na terenu smo spomladi leta 2014 popisali zunanjo morfologijo 45 karakterističnih prečnih profilov novih cest, zajetih v raziskavo. Tretjina profilov se je nahajala na glavnih cestah, tretjina na stranskih cestah na karbonatu in tretjina na stranskih cestah na mešani podlagi. Enake podatke smo poiskali tudi v projektni dokumentaciji za te profile.

Primerjava izvedenih gabaritov cestišča s projektiranimi kaže (preglednica 26), da so dejanske širine vozišč glavnih gozdnih cest večje od širin vozišč stranskih cest in da so izvedene širine vozišč, planumov in raščenih tal večje od projektiranih. Skupni prečni naklon smo določili tako, da smo sešteli absolutne vrednosti prečnega naklona levega in desnega dela vozišča. Primerjava izvedenih prečnih naklonov s projektiranimi kaže, da so imele analizirane ceste v povprečju manj izrazit strehasti naklon od predvidenega. Razlika je največja pri glavnih gozdnih cestah.

V preglednici 26 prikazujemo tudi povprečno prečno neravnost analiziranih novih cest šest let po končani gradnji. Ceste so levo in desno od grebena strehastega prečnega profila dobile uleknine oziroma kolesnice. V tem času na analiziranih cestah ni bilo investicijskega vzdrževanja ali grediranja profilov, zato smo domnevali, da so nastale zaradi prometnih obremenitev. Izmerjene globine kolesnic so bile v intervalu 5–65 mm.

Z enostavno analizo variance smo preverili ničelno domnevo, ali so povprečne globine kolesnic med skupinami enake. Na osnovi zbranih podatkov z analizo variance nismo ovrgli ničelne domneve. Prav tako nismo potrdili značilnih razlik v povprečni globini kolesnic na odkopni strani vozišča od tiste na nasipni strani.

Zbrane podatke o globini kolesnic po petih letih uporabe novih cest smo uporabili za analizo odvisnosti med globino kolesnice in nosilnostjo ceste. Pri tem smo za nosilnost uporabili podatke o nosilnosti iz poletnega termina, saj je bil takrat ulov različne vlažnosti voziščne konstrukcije najmanjši.

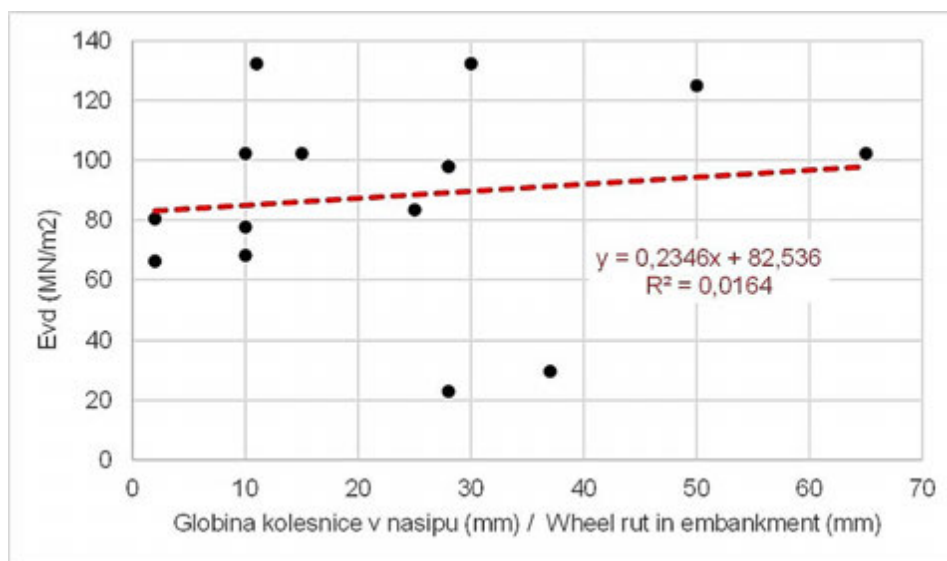
Slika 80 kaže, da pri novih glavnih cestah te korelacije praktično ni. Podobne rezultate smo dobili tudi za odvisnosti med globino kolesnice v nasipu in nosilnostjo vozišča za nove stranske ceste na karbonatu ter nove stranske ceste na mešani podlagi (priloga U).

Preglednica 26: Povprečne vrednosti parametrov zunanje morfologije cestišč na analiziranih novih cestah

Table 26: Average values of parameters of exterior roadway morphology for the analysed new roads

Odsek Section	Širina vozišča Carriageway width		Širina planuma Formation width		Širina raščenih tal Subbase width		Skupni prečni naklon Total cross slope		Povprečna prečna neravnost (mm) Average transverse unevenness (mm)	
	(dm)		(dm)		(dm)		(%)		odkop	nasip
	P**	I**	P**	I**	P**	I**	P**	I**	excavation	embankment
Soteska 2	30,0	32,3	48,0	57,7	13,3	40,3	8,0	5,3	16,7	10,3
Soteska 3	33,3	36,3	58,0	69,0	11,3	19,3	8,0	4,0	27,3	36,7
Bajs 1	35,0	34,0	50,7	66,7	28,0	37,7	8,0	6,3	25,7	30,0
Bajs 2	35,0	42,0	47,0	59,7	26,0	45,3	8,0	2,7	24,3	13,3
Bajs 3	35,0	36,7	47,0	92,3	29,0	36,7	8,0	3,0	35,0	26,7
Povprečno G2 / Average G2	33,7	36,3	50,1	69,1	21,5	35,9	8,0	4,3	25,8	23,4
Čutarovka 1	30,0	36,3	43,0	48,0	14,7	23,0	6,0	4,0	32,7	25,3
Čutarovka 2	30,0	35,0	43,3	51,3	29,3	24,7	6,0	7,7	27,7	23,7
Čutarovka 3	30,0	32,7	40,0	62,7	14,0	25,7	6,0	3,7	48,3	30,0
Macesnova 2	30,0	30,3	50,7	62,0	12,0	23,0	6,0	4,0	18,7	16,7
Macesnova 3	30,0	29,0	41,3	48,7	23,7	25,0	6,0	3,3	21,7	16,7
Povp. G3K* / Average G3K*	30,0	32,7	43,7	54,5	18,7	24,3	6,0	4,5	29,8	22,5
Kovk 2	30,0	30,0	38,0	50,3	38,0	27,3	6,3	5,7	16,7	26,7
Kovk 3	30,0	29,7	41,7	46,0	16,0	36,0	6,0	4,3	25,0	16,7
Strešni 1	30,0	33,0	53,7	58,3	16,0	38,3	6,0	4,0	24,3	41,7
Strešni 2	30,0	35,7	55,7	61,3	32,7	35,3	6,0	6,0	31,0	40,0
Strešni 3	30,0	38,3	49,3	50,3	17,3	20,7	6,0	5,3	16,7	30,0
Povp. G3M* / Average G3M*	30,0	33,3	47,7	53,2	24,0	31,5	6,1	5,1	22,7	31,0

* K: karbonat / Lime; M: mešano / M-mixed ** P: projektirano / designed; I: izmerjeno / measured



Slika 80: Odvisnost med globino kolesnice v nasipu in nosilnostjo vozišča za nove glavne gozdne ceste

Figure 80: Dependence between wheel rut on embankment and bearing capacity for new primary forest roads

7 RAZPRAVA DISCUSSION

7.1 UPORABNOST DINAMIČNE OBREMENILNE PLOŠČE USABILITY OF THE DYNAMIC LOADING PLATE

Dinamična obremenilna plošča je ena od naprav za točkovno ugotavljanje nosilnosti vgrajenih nevezanih zmesi zrn. S kratkotrajno obremenitvijo naležne plošče vgrajeni merilnik pospeškov zabeleži elastičen posedek površine pod ploščo, pripadajoča elektronika pa z upoštevanjem Boussinesqujeve zveze med napetostjo in deformacijo v homogenem elastičnem polprostoru podlage izračuna napetost v trenutku obremenitve. Napetost, izražena z dinamičnim deformacijskim modulom (E_{vd}), je posredna mera nosilnosti. V cestogradbeni praksi pomeni mehansko odpornost (togost) planuma vgrajenega materiala na kratkotrajne obremenitve. Čeprav govorimo o nosilnosti na površini, gre za skupno nosilnost vseh plasti pod obremenilno ploščo. Meritve nosilnosti nevezanih zmesi zrn z dinamično obremenilno ploščo so v gradbeni praksi nadomestile starejše postopke določanja deformacijskih modulov in se uporabljajo pri kontroli izvedenih zemeljskih del na gradbišču.

Raziskali smo možnost uporabe dinamične obremenilne plošče za operativno merjenje nosilnosti gozdnih cest in grajenih traktorskih vlak. Uporabili smo dinamično obremenilno ploščo ZFG 02 nemškega proizvajalca Zorn GmbH. V obdobju julij 2008–april 2014 smo izvedli preko 2.000, obdelali pa 1.936 meritev nosilnosti grajenih gozdnih prometnic na dvanajstih gozdnih cestah in šestih grajenih vlakah na različnih območjih v slovenskih gozdovih. Analizirane ceste in vlake so bile ob začetku naših meritev povsem nove ali pa stare 3–7 let. Najnižjo nosilnost smo izmerili spomladi na novozgrajeni vlaki na karbonatni podlagi in je znašala $3,6 \text{ MN/m}^2$. Najvišja izmerjena nosilnost je bila pozimi na glavni gozdni cesti ($2.250,0 \text{ MN/m}^2$). To je bilo daleč nad merilnim območjem dinamične obremenilne plošče, ki znaša 125 MN/m^2 . Povprečne vrednosti nosilnosti kolesnice v nasipu na glavnih gozdnih cestah so spomladi leta 2009 znašale $72,1 \text{ MN/m}^2$, na stranskih gozdnih cestah $47,5 \text{ MN/m}^2$ in na grajenih vlakah $10,7 \text{ MN/m}^2$. Kobayashi in sodelavci (1975) so na glavni gozdni cesti izmerili povprečno nosilnost 68 MN/m^2 (preračunano iz CBR s pomočjo priloge D) in na stranski gozdni cesti vrednosti 48 MN/m^2 . Bohm in Stampfer (2014) sta na odseku gozdne ceste v polletnem obdobju izmerila povprečno nosilnost 51 MN/m^2 . Z dinamično obremenilno ploščo smo določili nosilnost planuma spodnjega ustroja gozdne ceste v gradnji, nosilnost nosilne plasti pred zgoščevanjem in po njem ter nosilnost obrabne plasti zgrajene ceste (preglednica 18). Zaznali smo padec nosilnosti vozišča zaradi sprememb v vlažnosti voziščne konstrukcije po poletni nevihti (preglednica 20). Z dinamično obremenilno ploščo smo izmerili nosilnost plasti do globine 40 cm na 24 vzorčnih izkopih gozdnih cest (preglednica 24).

Na osnovi izvedenih obsežnih meritev nosilnosti vozišč na grajenih gozdnih prometnicah ugotavljamo, da z uporabljeno dinamično obremenilno ploščo lahko izmerimo praktično vsa bistvena stanja nosilnosti planumov zgrajenih gozdnih prometnic oziroma njihovih plasti tekom gradnje. S tem smo potrdili potencialno uporabnost dinamične obremenilne plošče tudi za potrebe gozdnega gradbeništva in potrdili raziskovalno hipotezo številka 1. Za praktično implementacijo dinamične obremenilne plošče je treba upoštevati tudi naslednje podrobnosti:

- Žmavc (1994) izrecno poudarja uporabnost dinamične obremenilne plošče za drobljenje in prodce ter opozarja na slabo korelacijo med dinamičnim in statičnim deformacijskim modulom na flišnih podlagah. Opravljene meritve in izvedene analize materialov, ki so bili vgrajeni na analiziranih cestah, se precej razlikujejo od nevezanih zmesi zrn, za katere je bila dinamična plošča narejena. To posebej drži za nosilne plasti gozdnih cest in planume grajenih vlak.
- Naše meritve so pokazale, da daje dinamična obremenilna plošča nekonsistentne rezultate nosilnosti zmrznjenih tal, zato njeno uporabo v takih pogojih odsvetujemo.
- Če meritve nosilnosti izvajamo vsaj 24 ur po koncu padavin na merilnem mestu, je naležna površina dovolj suha za izvedbo normalne meritve.
- V stiku z obremenilno ploščo se pogosto znajde organska snov (veje, iglice, listje, humus), največji problem pa predstavljajo groba zrna (slika 82). Ta so vzrok slabega naleganja plošče na podlago, pri izvedbi meritve pa povzročijo zdrs/premik plošče (še posebej če je pod zrnem trdna skala). Po navodilih proizvajalca (Zorn, 1996) sme največje zrno pod ploščo znašati do 63 mm. Temu pogoju relativno lahko zadostimo na obrabnih plasteh gozdnih cest, težko na nosilnih plasteh gozdnih cest in skoraj nemogoče na planumih grajenih vlak na karbonatni podlagi.

Velika prednost dinamične obremenilne plošče pred drugimi metodami določanja nosilnosti vozišč grajenih gozdnih prometnic je njena enostavna uporaba, slabost pa visoka nabavna cena in visoki stroški za njeno kalibracijo.

Vse meritve v raziskavi so bile usmerjene v zaznavanje nosilnosti in ne v validacijo meritev. To je delo, ki nas še čaka, saj materiali, vgrajeni v voziščne konstrukcije, lahko znatno odstopajo od nevezanih zmesi zrn za nosilne in obrabne plasti asfaltnih vozišč. Pri tem se bo treba v največji meri nasloniti na razpoložljive tuje vire, doma pa izvesti meritve s statično ploščo tam, kjer pričakujemo največja odstopanja v materialih.

V tujini se problematiki nosilnosti gozdnih cest spet posveča več pozornosti, saj se omrežje zgrajenih prometnic povsod stara in bo treba poiskati cenene metode za povečanje nosilnosti vozišč (Bohrn in Stampfer, 2014). V pogojih zamiranja gozdnega gradbeništva pri nas

vidimo uporabnost dinamične obremenilne plošče bolj kot raziskovalno opremo. Če se bodo razmere v gozdnem gradbeništvu izboljšale, ima dinamična obremenilna plošča velik potencial za uporabo pri gradnji zahtevnejših objektov. Do njene redne uporabe pri kontroli vgrajenih plasti skoraj zagotovo ne bo prišlo brez bistvenih sprememb pri minimalnih tehničnih zahtevah za voziščne konstrukcije.

7.2 USTREZNOST VGRAJENIH MATERIALOV SUITABILITY OF INSTALLED MATERIALS

Izbor materialov za utrditev vozne površine je ena izmed ključnih odločitev pri gradnji ceste. Ima daljnosežne posledice na delovanje inženirskega objekta, saj ga brez znatnega posega in velikih stroškov ne moremo spremeniti. Pri graditvi javnih cest je skrbno načrtovan in usmerjan s standardi in tehničnimi specifikacijami.

Vrsta materialov za nosilne plasti sodobnih cest, njihova količina in način vgradnje predstavljajo osrednje strokovne vsebine projektiranja utrditve, ki mora ustrezati predvideni prometni obremenitvi in hidrološko-klimatskim pogojem na mestu vgradnje. Za nevezane nosilne ali obrabne plasti so predpisane zmesi drobljenih zrn, ki morajo ustrezati različnim geometrijskim, fizikalnim, kemijskim in drugim zahtevam (SIST EN 13242:2003+A1, 2008). Za kamnito posteljico pod nosilnimi plastmi veljavne tehnične specifikacije za javne ceste (TSC 06.100 : 2003, 2003) dopuščajo tako naravne kot tudi mešane zmesi zrn, vendar morajo materiali zadoščati štirim fizikalnim in kemijskim zahtevam.

Razkorak med zahtevano kakovostjo materialov nosilne plasti gramozne ceste po gradbenih oziroma gozdarskih merilih je velik. Če je predvideno namensko vozilo kamion, Osnutek novih smernic za graditev, rabo in vzdrževanje gozdnih prometnic (2001) predvideva gramozno vozišče z dvoslojno voziščno konstrukcijo. Material obrabne plasti je zmes drobljenih zrn granulacije 0/45 in uvaljan v plasti debeline do 10 cm. Za nosilno plast debeline do 15 cm ustreza lokalni kamniti material, pri tem pa velikost maksimalnega zrna ne sme preseči ene tretjine debeline plasti.

V hipotezi številka 2 smo domnevali, da granulometrijska sestava vgrajenih materialov v nosilne plasti gozdnih cest ni ustrezna. Hipotezo smo preverili na dvanajstih gozdnih cestah različnih kategorij, zgrajenih v Sloveniji v zadnjem desetletju, z vzorci materiala, pridobljenimi na vzorčnih izkopih v povprečni globini 25 cm in 35 cm. Glavni rezultati za nosilne plasti se nanašajo na globino 25 cm, kjer smo v večini izkopov prepoznali nosilno

plast, na globini 35 cm pa večkrat ni bilo mogoče ugotoviti, ali gre za nosilno plast zgornjega ustroja ali pa že za spodnji ustroj.

Odgovor na postavljeno hipotezo je odvisen od tega, koliko zahtev upoštevamo in kako opredelimo materiale nosilne plasti. V svoji raziskavi smo upoštevali le granulometrijske zahteve, materiale pa obravnavali s treh zornih kotov.

Najprej smo obravnavali materiale nosilne plasti gozdnih cest kot zmesi zrn za nosilne plasti javnih cest. Na štirih cestah je material ustrezal zahtevam za nevezane zmesi zrn, na treh je delno ustrezal, na petih pa ni ustrezal. Od petih cest z neustrezno nosilno plastjo sta bili dve glavni cesti na mešanih podlagah in tri stranske ceste na mešanih podlagah. Materialom nosilnih plasti največkrat primanjkuje grobega drobirja (velikost delcev 10–45 mm). Ugotovljeni odstotek finih delcev v analiziranih nosilnih plasteh ustreza kategoriji f_8 (SIST EN 13242:2003+A1, 2008), ki nakazuje zmrzlinško obstojnost materiala. Zmrzlinške obstojnosti analiziranih plasti ne moremo potrditi, ker nismo izvedli analize kakovosti finih delcev. Za to bi bila najprimernejša metoda »metilen modro« (Bohar, 2008) oziroma bi potrebovali vsaj »ekvivalent peska« (SIST EN 933-8:2012, 2012), a za nobeno metodo nismo imeli potrebne opreme. Presoja zrnivosti nosilnih plasti cest v vzorčnih izkopih je pokazala, da pretežno ne ustrezajo standardom za granulometrijske lastnosti nevezanih nosilnih plasti cest, s čimer smo potrdili svojo hipotezo.

Na večini vzorčnih izkopov stranskih cest smo ocenili, da material nosilnih plasti izvira neposredno iz odkopa na profilu oziroma je bil odvzet na drugi stacionaži dotične gradnje in je lokalnega izvora. Tak material je možno presojati tudi po merilih za zemljine, namenjene za gradnjo. Pri tem nam je primerno merilo za presojo ustreznosti tehnična specifikacija za povozne platoje in kamnite posteljice (TSC 06.100 : 2003). V tem primeru se zahteva dobro stopnjevana zrnavost (količnik neenakomernosti med 8 in 50) ter manj kot 8 % delež finih delcev v vgrajenem materialu. Takim zahtevam je v naši analizi ustrezalo 83 % vzorcev na globini 25 cm in 75 % vzorcev na globini 35 cm. Uporabljena modificirana AC-klasifikacija zemljin za potrebe v geotehniki to potrjuje, saj prevladujejo dobro graduirani drobirji. Če materiale nosilnih plasti na gozdnih cestah vrednotimo kot kamnito posteljico, je naša hipoteza v skoraj 80 % zavrnjena in materiali po granulometrijski sestavi ustrezajo.

Gozdarski kriterij za ustreznost materialov zahteva, da v nosilne plasti vgrajujemo zrna do nazivne velikosti 50 mm oziroma maksimalne velikosti 63 mm. Temu kriteriju so v analizi ustrezali vsi vzorci, v praksi pa je bilo nekaj primerov (npr. ST12, MA32, PL12; glej priloge Q, R in S), kjer so bila v vzorčnem izkopu neustrezna zrna, a smo jih zaradi metodoloških omejitev (glej podpoglavje 7.7.4) obravnavali kot tujke in jih izločili.

Pri gradnji glavnih cest smo ugotovili, da se tudi v nosilne plasti vgrajuje zmesi drobljencev, pridobljenih v lokalnih in divjih kamnolomih. Čeprav gre za nosilnostno in zmrzlinso bolj kakovosten material, so v njem praviloma prisotna nadmerna zrna. Prevelika zrna v nosilni plasti niso zaželeni. Pri izvedbi del se morajo izločiti, a v praksi ni vedno tako (slika 81).

Kakovost vseh analiziranih materialov nosilnih plasti bi bilo mogoče izboljšati tako z mehanično, pogosto pa tudi s kemično stabilizacijo. Na tem področju so velike možnosti racionalizacije gradnje nosilnih plasti, vendar bo pred tem v Sloveniji treba razrešiti okoljevarstvene vidike uporabe kemične stabilizacije v gozdnem prostoru (Bohrn in Stampfer, 2014; Gucinski in sod., 2001).

Analizirali smo tudi zrnnavost obrabnih plasti, pri tem pa uporabili vzorce materiala, ki smo jih izkopali za potrebe določanja gravimetrične vsebnosti vlage v obrabni plasti. Analiza zrnnavosti za 103 vzorce obrabnih plasti je pokazala, da so vanj praviloma vgrajene zmesi drobljenih zrn. Velikost zmesi zrn ni homogena vzdolž celotne ceste. Ceste z bolj grobo zmesjo zrn imajo več odsekov z grobo zrnato obrabno plastjo. Ugotovljeni delež finih delcev večinoma ustreza gradbenim zahtevam za kategorijo f_8 .



Slika 81: Odstranjevanje neustreznih zrn (levo) in njihova vgradnja v nosilne plasti ceste (desno)

Figure 81: Removal of inadequate grains (left) and their placement into bearing courses of road (right)

Poskusno smo analizirali tudi zrnnavost obrabnih plasti traktorskih vlak. Tam je bilo grobega skeleta še več (slika 83). Zaradi skladnosti z vzorci obrabnih plasti cest smo zrna premera nad 63 mm izločili. To ni bilo pravilno, saj smo dobili popačene presejne krivulje za vlake, ki ne ustrezajo realnim razmeram na terenu.

Vzorčni izkopi so pokazali, da je debelina nosilnih plasti analiziranih cest v projektiranih okvirih. Podobno velja za obrabne plasti. Ugotovljena skupna debelina zgornjega ustroja analiziranih glavnih cest je povprečno 27,8 cm in stranskih cest 30,1 cm. To nas je presenetilo, saj smo pričakovali manjše debeline.

Spremljali smo gradnjo glavne gozdne ceste »Bajs« in pri tem uporabili lastni postopek za merjenje povprečne debeline slojev voziščne konstrukcije. Na devetih opazovalnih profilih smo izmerili, da so vgradili nosilno plast s povprečno nasuto debelino 125 mm. Ob koncu gradnje smo na opazovalnih profilih ugotovili povprečno uvaljano debelino voziščne konstrukcije 96 mm. Obe vrednosti sta precej manjši, ko je predvidna debelina voziščne konstrukcije gozdne ceste.

7.3 VPLIVI VLAŽNOSTI IN DEBELINE VOZIŠČNE KONSTRUKCIJE NA NOSILNOST VOZIŠČA

EFFECTS OF MOISTURE CONTENT AND PAVEMENT THICKNESS ON CARRIAGEWAY BEARING CAPACITY

Spremljanje nosilnosti vozišč izbranih skupin grajenih gozdnih prometnic tekom leta je bil eden od glavnih ciljev naše raziskave, saj so s tem tradicionalno povezane omejitve pri uporabi gozdnih cest. Z mesečnimi meritvami nosilnosti na šestih profilih nove glavne gozdne ceste »Soteska« in na prav toliko profilih glavne stare gozdne ceste »Ravnik« smo ugotovili znatna nihanja v povprečni nosilnosti cest. Če ne upoštevamo vrednosti nosilnosti v času zmrznjene voziščne konstrukcije, je znašala razlika med najvišjo in najnižjo nosilnostjo na cesti »Ravnik« 98 %, na cesti »Soteska« pa kar 118 % (slika 51). Velikost variiranja nosilnosti nas je presenetila, saj smo tako velike variacije pričakovali na stranskih in ne na glavnih gozdnih cestah. Še višje vrednosti nosilnosti smo zabeležili v času zmrznjenega vozišča. Ker so ugotovljene nosilnosti večkratno presegale deklarirano merilno območje dinamične obremenilne plošče, smo jih izločili iz nadaljnjih obdelav in prikazov.

Na nosilnost vozišč gozdnih cest poleg kategorije, starosti in podlage vplivajo tudi drugi dejavniki. Eden od zelo pomembnih vplivov je vsebnost vode v cestni zgradbi. Ta se med letom zelo spreminja, po svoje ga odseva kar letni čas. S skrbnim načrtovanjem vzorčnih poskusov in z izvedbo sezonskih meritev nosilnosti vozišč v primerljivih pogojih vlažnosti smo ugotovili statistično značilne razlike v povprečni nosilnosti glavnih gozdnih cest med pomladjo in poletjem. Nosilnost poleti je bila v povprečju za 46 % večja od tiste v spomladanskem času po odjugu. Vrednosti v jesenskem času so bile odvisne od tega, ali smo analizirali nove ali stare glavne gozdne ceste. Starim glavnim gozdnim cestam je v

jesenskem času nosilnost padla. K temu je največ prispevala cesta »Bajs« z neustreznim materialom nosilne plasti. Zanesljivost naših zaključkov za glavne gozdne ceste je majhna, ker smo obravnavali le štiri ceste. Vsaka od njih je bila zgodba zase, zato gre rezultate vzeti bolj kot študije primerov.

Bolj smele so naše ugotovitve za sezonske spremembe na stranskih gozdnih cestah. Ugotovili smo značilno nižje povprečne nosilnosti starih stranskih cest na mešani podlagi v primerjavi z drugimi skupinami stranskih gozdnih cest za vse analizirane letne čase. Tudi vse stranske ceste na karbonatni podlagi so imele v poletnem času za dobrih 40 % višjo nosilnost kot spomladi. Razlike v povprečnih nosilnostih med poletjem in jesenjo so bile za vse analizirane skupine stranskih gozdnih cest zaznavne, a statistično neznačilne. Ugotavljamo, da je jesenski čas najprimernejši za oceno povprečne nosilnosti gozdne ceste. V spomladanskem času se nam hitro zgodi, da je posamezen del ceste še zmrznjen, pa še vsebnost vlage je nadpovprečna. Nasprotno pa imajo jeseni gozdne prometnice zmerno vlažnost, vplivi zmrzlinkega dviga pa so izzveneli (slika 82).



Slika 82: Sezonska nihanja nosilnosti vozišča stranske gozdne ceste na mešani podlagi

Figure 82: Seasonal variations in carriageway bearing capacity of secondary forest road on mixed base

Primerjava povprečnih nosilnosti med glavnimi (slika 47) in stranskimi gozdnimi cestami (slika 50) v spomladanskem času kaže, da imajo različno stare ceste na karbonatni podlagi manjše razlike v povprečni nosilnosti. Glavne gozdne ceste na karbonatnih podlagah so v spomladanskem času praktično enkrat bolj nosilne od stranskih cest na karbonatni podlagi. Pri cestah na mešanih podlagah je situacija drugačna. Nove glavne in stranske gozdne ceste imajo podobno nosilnost. Ugotovljena povprečna nosilnost starih stranskih cest na mešanih podlagah je nižja od novih, povprečna nosilnost starih glavnih cest pa višja od novih na primerljivih podlagah.

Vsebnost vlage v voziščni konstrukciji smo ob meritvah nosilnosti ugotavljali s porušnimi vzorci materiala obrabnega sloja. Ta ocena se ni izkazala kot značilen faktor. Površje ceste se zaradi zrnivosti obrabne plasti in stika z ozračjem najhitreje osuši in ne odseva vlažnostnih razmer v notranjosti ceste.

S hipotezo številka 3 smo domnevali, da so spremembe v nosilnosti vozišč utrjenih gozdnih prometnic tekom leta bolj kot od klimatsko-hidroloških pogojev odvisne od vrste in debeline nosilne plasti prometnice. Preverjanje te hipoteze smo opravili na vzorčnih izkopih, kjer smo imeli podatek o debelini voziščne konstrukcije, nosilnosti in vsebnosti vlage (preglednica 24). Z naraščanjem vlage nosilnost rahlo pada, korelacijski koeficient je neznačilen. Na vzorčnih izkopih se je tudi zveza med nosilnostjo in debelino voziščne konstrukcije izkazala za statistično neznačilno. Ločena analiza za obravnavani skupini geoloških podlag je odkrila za karbonatne podlage rahlo negativno korelacijo med debelino voziščne konstrukcije in nosilnostjo (slika 77). Na videz nenavadna ugotovitev ima razlago v praktičnem inženirstvu. Tam, kjer je nosilnost podlage (spodnjega ustroja) zadovoljiva, se v praksi ne trudijo z izdelavo debele nosilne plasti za dosego zadovoljive nosilnosti. Tam, kjer nosilnost podlage ni ustrezna, mora biti debelina nosilnega sloja večja za zagotovitev zadovoljive nosilnosti vozišča. Opravljene analize niso potrdile dominantnega vpliva debeline voziščne konstrukcije nad vplivom vlage na nosilnost vozišč, zato smo hipotezo številka 3 zavrnili.

Svojevrstna ilustracija vpliva vlažnosti na nosilnost so bile meritve nosilnosti vozišča dveh gozdnih cest na karbonatni podlagi v času poletne nevihte. Opazovani dogodek potrjuje veliko odvisnost dinamičnega deformacijskega modula na gramoznih voziščih od vsebnosti vlage v voziščni konstrukciji. Vplivi so večji na manj nosilnih prometnicah. Bolj kot kategorija prometnice sta pomembni vrsta vgrajenega materiala in učinkovitost dreniranja voziščne konstrukcije.

7.4 SEZONSKA PRIMERNOST VLAK ZA KAMIONSKI PREVOZ SEASONAL SUITABILITY OF SKID TRAILS FOR TRUCK TRANSPORT

Grajene traktorske vlake so gozdne prometnice brez zgornjega ustroja. Vozno površino predstavlja planum, ki je največkrat delno v nasipu in delno v odkopu. Nosilnost takega planuma naj bi bila zelo različna. To smo v raziskavi preverili z meritvami na vzorcu šestih vlak, od katerih so bile tri nove vlake na karbonatni podlagi in tri stare vlake na mešani podlagi. Preproste primerjave povprečne nosilnosti kolesnice v nasipu za analizirane vlake v spomladanskem času leta 2009 so pokazale višjo povprečno nosilnost starih vlak na mešani

podlagi. Podrobnejša analiza virov variabilnosti je pokazala velik vpliv individualnih dejavnikov. Ker sta se skupini poleg podlage razlikovali tudi po starosti (in posledično po zvoženosti), na osnovi opravljenih meritev ni mogoče dati zanesljivega odgovora o vplivu podlage na nosilnost vlak.

Osnovni namen vključitve vlak v raziskavo je bil preveriti domneve, ali je nosilnost vlak na trdi podlagi v sušni dobi manjša od nosilnosti stranskih gozdnih cest v spomladanskem času. Preden smo opravili to primerjavo, nas je zanimalo, kako se nosilnost vlake spremeni po petih letih. Zaradi visoke variabilnosti individualnih meritev smo namesto dinamičnega deformacijskega modula morali uporabiti za odvisno spremenljivko kar elastični posedek (v mm) in povprečno vrednost posedka za tri merilna mesta na posameznem profilu vlake. Izkazalo se je, da se nosilnost vlak sčasoma poveča, tistih na karbonatni podlagi celo nekoliko bolj kot vlak na mešani podlagi.

Ugotovljeni povprečni posedek vlak v spomladanskem času po petih letih je okoli 1,5 mm, kar odgovarja vrednosti dinamičnega deformacijskega modula okoli 15 MN/m^2 , razlike med nosilnostjo starih in novih vlak so bile statistično neznčilne. Manjša nosilnost vlak novih vlak na karbonatni podlagi nas je presenetila, saj smo pričakovali, da bodo vlake na trdi podlagi nosilnejše. Ocenjujemo, da je nižja nosilnost vlak na trdi podlagi prej posledica motečih vplivov grobih zrn pod ploščo (slika 83).

Primerjava nosilnosti novih vlak na karbonatni podlagi v sušnem obdobju s povprečno nosilnostjo stranskih cest v pomladnem času je pokazala, da so tudi v tem primeru traktorske vlake značilno manj nosilne od stranskih cest na mešani podlagi, še bolj pa od stranskih cest na karbonatni podlagi. Hipotezo številka 4 smo tako potrdili tudi v pogojih, ko smo med stranskimi cestami na mešani podlagi imeli dva odseka s povsem neustrezno voziščno konstrukcijo (cesta »Lipovec«).

7.5 ENOVITOST NOSILNOSTI VOZIŠČA PAVEMENT BEARING CAPACITY UNIFORMITY

Raziskava temelji na izhodišču, da večina grajenih gozdnih prometnic v Sloveniji poteka po pobočjih in imajo zato mešan prečni profil (slika 18). Ta je z vidika nosilnosti nehomogen. Domnevamo, da je nosilnost vozišč cest v mešanem profilu na kolesnici v nasipu manjša od tiste na kolesnici v odkopu oziroma na raščenih tleh. Prav tako domnevamo, da je pojav izrazitejši na tistih prometnicah, kjer je voziščna konstrukcija slabša. To je pri novih prometnicah in stranskih cestah. Ne gre spregledati niti vpliva podlage.

Sočasno upoštevanje vseh vplivnih dejavnikov je narekovalo kompleksno analizo. Zaradi boljše preglednosti rezultatov smo obdelali podatke nosilnosti glavnih cest ločeno od stranskih. Upoštevali smo že opravljene analize, v katerih smo ugotovili najnižjo nosilnost v spomladanskem času.

Ločena dvofaktorska vzorčna poskusa za nove in stare glavne ceste (preglednica 8 in preglednica 9) nista potrdila značilnih razlik v povprečni nosilnosti kolesnice v nasipu glede na nosilnost kolesnice v odkopu v spomladanskem terminu. S tem smo hipotezo zavrnila za to skupino prometnic. To je dobra novica za nove glavne ceste, kjer bi v mešanem profilu še pričakovali nekonsolidirane plasti na nasipu. Pri tem ni nujno, da gre za nosilni sloj, lahko je slabo utrjen tudi spodnji ustroj. Slaba novica je, da smo v analizah obeh faktorskih vzorčnih poskusov našli visoko značilen vpliv faktorja odsek. To kaže, da na analiziranih cestah kakovost izdelave voziščne konstrukcije vzdolž ceste variira ali pa da je prisoten dodaten vplivni dejavnik, recimo debelina voziščne konstrukcije, vsebnost vlage ali nosilnost podlage. Žal smo imeli pri novih glavnih cestah na voljo zelo malo objektov. Glede na minimalen obseg novogradenj glavnih cest bi kazalo meritve nosilnosti v prihodnje izvajati na vseh novogradnjah in tako sčasoma podati zanesljivejše zaključke za to domnevo.

Enake vzorčne poskuse smo izvedli tudi na novih in stranskih cestah. Ker smo imeli v tem primeru na voljo več cest, smo z vključitvijo primerno oblikovanega faktorja odsek zajeli tudi vpliv geološke podlage. Vzorčna faktorska poskusa za nove in stare stranske ceste sta pokazala, da je vpliv merilnega mesta statistično značilen le za nove stranske ceste ter se nanaša na razlike med merilnima mestoma »a« in »c«. Vizualizacija aritmetičnih sredin nosilnosti za posamezna merilna mesta po odsekih novih in starih stranskih cest (slika 48 in slika 49) kaže velik raztros srednjih vrednosti (od 18 do 80 MN/m²) in široke intervale srednjih vrednosti (od 5 do 35 MN/m²), zato moramo biti pri posploševanju rezultatov faktorskih poskusov previdni. Podobno kot pri glavnih cestah ugotavljamo veliko individualnost odsekov tako znotraj posamezne ceste kot tudi znotraj oblikovanih skupin geoloških podlag. Hipotezo številka 5 smo potrdili za nove stranske ceste in zavrnila za stare stranske gozdne ceste.

Opravljene analize izpostavljajo dva problema. Prvi se nanaša na enovitost nosilnosti voziščnih konstrukcij gozdnih cest. Te do sedaj nismo preverjali. Kjer se je cesta posedla, smo jo lokalno sanirali do naslednjega obdobja sanacije. O stroških na posameznih objektih nismo veliko govorili, upravljavci omrežja gozdnih cest pa opozarjajo na kronično pomanjkanje skupne vsote sredstev za vzdrževanje cest (ZGS 2012). Izkušnje graditeljev javnih cest opozarjajo, da sta pomembnejši od idealne nosilnosti enovitost in enakomernost

kakovosti voziščne konstrukcije (Žmavc 2007: 11). Rezultati meritev nosilnosti cest za obravnavane skupine prometnic nakazujejo, da se tega vodila pri gradnji gozdnih cest v zadnjem času pri nas ne držimo.

Drugi problem se nanaša na raziskovanje nosilnosti. Ugotovljena velika heterogenost nosilnosti na primerljivih prometnicah kaže, da smo v pilotni fazi raziskave podcenili variabilnost nosilnosti in v splošnem izbrali premajhno število ponovitev po posameznih obravnavanjih.

7.6 VPLIV PROMETNE OBREMENITVE NA NOSILNOST VOZIŠČA IMPACT OF TRAFFIC LOADING ON PAVEMENT BEARING CAPACITY

Racionalen in trajnosten transport lesa je cilj in smisel grajenih gozdnih prometnic. Cilju prilagajamo vrste prometnic, njim pa geometrijske in konstrukcijske elemente. Osnova za dimenzioniranje konstrukcijskih elementov grajenih gozdnih prometnic je prometna obremenitev, ki jo pri uporabi posamezne prometnice pričakujemo v njeni življenjski dobi. Povedano predstavlja logična in jasna razmišljanja, ki se jih v praksi vse manj držimo, saj ne vemo niti, koliko je prometna obremenitev gozdnih prometnic, kakšno nosilnost bi za realizirano prometno obremenitev potrebovali, predvsem pa se ne moremo dogovoriti, kakšna je pričakovana življenjska doba naših voziščnih konstrukcij.

V raziskavi smo uporabili uveljavljene postopke za določanje prometne obremenitve na osnovi analize števila in strukture prometa. Podatke smo zbrali z neprekinjenim spremljanjem prometa s pomočjo radarskih detektorjev. Na primeru glavne gozdne ceste z zaledjem 1.113 ha gospodarskih gozdov smo v 309 dneh v letu 2009 zabeležili 18.707 vozil. Za 365 dni smo ugotovili 22.383 vozil. Od tega smo jih med osebna vozila uvrstili 72,9 %, preostanek pa med kamione. Med kamioni je bilo 28,7 % uvrščenih med težje od 7 t. Z zbranimi podatki izračunan povprečni letni dnevni promet (PLDP) je za leto 2009 znašal 61,1 vozilo. Pri tem smo upoštevali obe smeri vožnje, ki prispevata k obrabi in utrujanju voziščne konstrukcije. Na podlagi ugotovljenega PLDP smo za merodajni profil »Ravnik« izračunali povprečno letno dnevno ekvivalentno prometno obremenitev 17,6 x 100 kN. To je skoraj petnajstkrat več, kot je ugotovil Dobre (1993) in 4,5-krat več, kot sta ugotovila Potočnik in Hribernik (2006) za primerljive razmere. Ob upoštevanju 20-letne življenjske dobe voziščne konstrukcije znaša prometna obremenitev profila »Ravnik« 179.872 x 100 kN, kar ga še vedno uvršča med lahke merodajne prometne obremenitve.

Prometne obremenitve stranskih gozdnih cest so še manjše. Prometne obremenitve grajenih vlak so bistveno drugačne, saj gre za druga vozila z drugačnimi osnovnimi obremenitvami. Prometnih obremenitev teh prometnic v raziskavi nismo preverjali, ampak smo s skrbno izbiro prometnic poskušali oblikovati skupine z značilno različno prometno obremenitvijo.

Vpliv prometne obremenitve na nosilnost grajenih gozdnih prometnic lahko izrazimo z dvema tujkama: »konstruktiven« in »destruktiven«. Na novih cestah transportna sredstva z vožnjo po relativno ozkem vozišču utrdijo voziščno konstrukcijo na mestih kolesnic. To prispeva k pospešeni konsolidaciji, še posebej če valjanje plasti pri izgradnji ni bilo ustrezno (dovolj temeljito ali ob primerni vlažnosti). Z uporabo ceste v kolesnicah pride do drobljenja zrn in trajnih deformacij, kar se na gozdnih cestah kaže kot dva blago usločena predela vozišča – kolesnici, ki sta element prečne neravnosti.

Vidik prečne neravnosti smo obdelali z dodatnim popisom kolesnic na analiziranih cestah, ki so bile leta 2008 zgrajene na novo. Prečno neravnost smo opredelili kot povprečje treh največjih globin kolesnice na treh profilih v odseku. Ločeno smo obdelali globino kolesnic v nasipu in v odkopu. Pri tem smo domnevali, da so imele nove ceste ob koncu gradnje prečno neravnost enako nič. Z zbranimi podatki nismo potrdili značilnih razlik v povprečni globini kolesnic niti med kategorijami prometnic niti med kolesnicami v odkopu ter nasipu (preglednica 26), to pa se sklada z raziskavo Trzcinskega in Kaczmarzyka (2006), ki sta izmerila podobne nosilnosti na gozdnih cestah različnih kategorij.

Pet let stare ceste so imele v povprečju okoli 3 cm globoke kolesnice. To nedvomno potrjuje vpliv rabe teh prometnic najmanj na obliko vozišča, morda pa tudi na nosilnost. Slednje smo preverili tako, da smo za analizirane skupine prometnic ločeno poiskali korelacije med globino kolesnice in spomladansko nosilnostjo leta 2009.

Hipotezo številka 6 smo preverili na dva različna načina. Z vidika nosilnosti smo primerjali povprečne nosilnosti starih in novih prometnic posameznih kategorij gozdnih prometnic spomladi 2009. Razlike med starimi in novimi glavnimi gozdnimi cestami so bile neznailne (slika 78). Med stranskimi cestami so bile nove ceste bolj nosilne od starih, zlasti zaradi slabe nosilnosti odsekov na mešani podlagi. Hipotezo smo za nove glavne ceste potrdili, za stranske pa zavrnili. Z vidika prečne neravnosti smo za kratkoročno obdobje šteli petletno dobo in zanjo ugotovili globine kolesnic 2,7 cm. Meril za dopustno globino kolesnic na gramoznih voziščih ni, v tujini je prag dopustne kolesnice dve coli (Earth and aggregate surfacing design guide for low-volume roads, 1996: s. 25). Po tem merilu lahko rečemo, da izmerjene vrednosti ne presegajo dopustnega praga globine kolesnice.

7.7 RAZVOJ METOD VZORČENJA IN MERJENJA

DEVELOPMENT OF SAMPLING AND MEASUREMENT METHODS

7.7.1 Vzorčenje za značilne meritve nosilnosti

Sampling for representative bearing capacity measurements

Osnovne meritve nosilnosti smo izvedli na več merilnih mestih, ki so bila postavljena na profilu pravokotno na os prometnice. Merilno mesto »a« je bilo na odkopni kolesnici, merilni mesti »b« in »c« pa na nasipni kolesnici. Dodatni merilni mesti sta bili še med kolesnicama (»d«) in na bankini (»e«). Če sta bili merilni mesti »a« in »b« vsebinsko pogojeni, smo dodatno merilno mesto izbrali zato, ker so pilotske meritve pokazale večjo variabilnost dinamičnega deformacijskega modula na kolesnici v nasipu. Tekom obdobja strnjenih meritev tega pojava nismo več opazili, prav tako pa nismo mogli šteti merilnega mesta »c« kot dodatno ponovitev znotraj obravnavanja. Meritve merilnega mesta »c« smo tako uporabili le v primeru, da smo za profil oblikovali v danem terminu povprečno vrednost dveh ali treh meritev, kar pa smo storili le izjemoma. Iz tega zornega kota so bile meritve na mestu »c« izguba časa in jih v prihodnje ne bi ponavljali.

Veliko časa smo posvetili naključnemu izboru profilov po predvidenih obravnavanjih. Pri tem smo morali zagotoviti primerljive prečne profile in naključen izbor profilov po obravnavanjih ter vse skupaj izvesti prostorsko racionalno. Ker smo za večino analiziranih prometnic razpolagali s projektno dokumentacijo, smo sistem izbora zgradili na logiki značilnih odsekov. Ti so bili trije zaporedni prečni profili iz projektne dokumentacije, če so jih sestavljali prečni profili, ki jih največkrat najdemo na grajenih gozdnih prometnicah. To so bili mešani prečni profili v premah. Z različnimi metodami analize variabilnosti dinamičnega deformacijskega modula znotraj odsekov in med odseki iste prometnice se je potrdilo, da imajo trije profili znotraj odseka manjšo variabilnost nosilnosti, kot pa znašajo razlike med povprečno nosilnostjo odsekov, vključenih v posamezno obravnavanje, ali celo med povprečno nosilnostjo izbranih odsekov na isti prometnici. Prepričani smo, da smo s postavljeno tehniko izbora odsekov zagotovili slučajen izbor karakterističnih prečnih profilov. Odseki so bili tudi primeren organizacijsko-logističen okvir za izvedbo meritev. Profili so bili v odseku med seboj oddaljeni 10–25 m. Pri oblikovanju homogenih odsekov (vsi trije profili so morali biti primerljivi v bistvenih elementi geometrije prečnega profila) je bilo veliko izpada – številni odseki so izpadli in na posamezni cesti je ostalo le malo odsekov za žrebanje značilnih odsekov. Za lociranje značilnih odsekov na terenu smo porabili zelo veliko časa. Na prometnicah brez dokumentacije smo uspešno simulirali odseke s tremi zaporednimi prečnimi profili, med seboj oddaljenimi 20 metrov. Tudi v tem primeru je bilo treba vse profile popisati in označiti na terenu pred žrebom značilnih odsekov.

Za prihodnje meritve nosilnosti na karakterističnih prečnih profilih priporočamo naključni izbor začetne stacionaže, korak 20 metrov, popis bistvenih elementov profila in individualno obravnavo profilov na posamezni cesti, torej brez odsekov. Priporočamo meritve v mešanem profilu, najmanj na kolesnici v nasipu. Če je le mogoče, je treba v načrt pravega ali vzorčnega poskusa vključiti čim več različnih objektov (v okviru opredeljujočih pogojev poskusa). Variabilnost dinamičnega deformacijskega modula na zgrajenih gozdnih cestah narekuje najmanj devet ponovitev po obravnavanju.

Za tekočo kontrolo nosilnosti vgrajenih zmesi zrn tehnične specifikacije za javne ceste (TSC 06.200 : 2003) navajajo minimalno pogostost meritve dinamičnega deformacijskega modula na vsakih 400 m³ vgrajenega materiala. To v primeru gozdne ceste s 25 cm debeline nosilnega sloja in širine vozišča 3,5 m zahteva meritve nosilnosti vsakih 450 m trase. To je glede na povprečno dolžino gozdnih cest premalo, zato bo treba ustrezne normative šele postaviti.

V raziskavi izvedene multitemporalne meritve nosilnosti na istih mestih so se izkazale kot zelo učinkovit način členjenja virov variance. Pri tem smo predpostavili, da smo se vselej vrnili točno na isto merilno mesto. To je bilo res v veliki večini primerov na gozdnih cestah, na vlakah pa ne. Za kakovostno izvajanje meritev nosilnosti s ponovitvami na istih enotah (merilnih mestih) je treba s situacijsko natančnostjo 5–10 cm merilna mesta označiti ali zagotoviti vračanje na točno isto merilno mesto. Usmeritev velja, dokler merilno mesto v različnih terminih ni bistveno spremenjeno (kolesnica, erozijski jarek, vzdrževanje ipd.). Na vlakah meritve s ponovitvami na istih enotah niso realno izvedljive.

7.7.2 Merjenje dinamičnega deformacijskega modula

Dynamic deforming module measurement

Izvedba meritve dinamičnega deformacijskega modula po predpisanem postopku (TSC 06.720 : 2003, 2003) ima v primeru meritev nosilnosti na grajenih gozdnih prometnicah nekaj posebnosti, ki jih je treba upoštevati.

Prvo in glavno vodilo za kakovostno izvedbo meritev z dinamično obremenilno ploščo je ustrezna priprava merilnega mesta. Bistveni sestavni del priprave merilnega mesta je izbira mikrolokacije. Izbrano merilno mesto ne sme imeti na površini grobih kamnitih zrn velikosti nad 63 mm (slika 83). Tudi zrna velikosti nad 31 mm so problematična, če imajo štrleče robove oziroma če se posamezno zrno nahaja na robu plošče. Lokacijo spremenimo, če pa to ni mogoče, poskušamo zrno odstraniti, prazno mesto pa zapolniti z mivko za izravnavo.



Slika 83: Skeletno vozišče vlake lahko onemogoči meritve dinamičnega deformacijskega modula

Figure 83: Coarse grains on carriageway can disable dynamic deforming module measurements

Naslednji korak je izravnava neravnin na mestu, kamor bomo položili ploščo. Največkrat merimo nosilnost v kolesnici, zato je treba stranske (dvignjene) robove posneti in jih izravnati. Ko imamo naležno površino ravno, je treba pred nasutjem izravnalne mivke naležno ploskev očistiti organskih primesi (veje, iglice). Sledi dosipanje mivke v depresije. Pred tem je priporočljivo s ploščo (brez droga) podrgniti na predvidenem merilnem mestu in tako še dodatno zagotoviti ravnost pod ploščo. Pri uporabi izravnalno-zapolnilne mivke moramo biti zelo previdni, da ne ustvarimo sicer lepo izravnane sloj, ki kot celota tvori tampon med ploščo in podlago ter pači meritve. Sledi polaganje plošče na merilno mesto in natikanje vodilnega droga s padajočo utežjo. Pri tem je treba paziti, da je utež vedno v spodnjem položaju, ker sicer prihaja do bočnih obremenitev plošče, ki kvarijo naleganje.

Predobremenitev plošče je predpisana s tremi zaporednimi udarci. Pri tem je treba ob vsakem odboju utež ujeti, predvsem pa zagotoviti, da se plošča ne premika. To je na ravnem terenu zlahka možno doseči, na nagnjeni prometnici pa ne. Gozdne ceste, še precej bolj pa grajene vlake, imajo niveleto praviloma nagnjeno. Če je naklon nivelete prometnice na mestu meritve z dinamično ploščo do 10 %, potem toleranca naleganja vodilnega droga na akcelerometer ne predstavlja problema. V primeru višjih naklonov pa lahko meritev izvedemo le tako, da vodilni drog nagnemo v nasprotno smer naklona ceste do točke, ko še ne naleže na okvir obremenilne plošče. V tem primeru se lahko zgodi, da utež ne pada več

prosto, ampak se »pelje« po vodilnem drogu. Takim meritvam se moramo izogibati, saj so meritve sistematično popačene s premajhno obremenilno energijo.

Standardna meritev zajema izvedbo treh udarcev, amplituda posedanja mora biti izmerjena z natančnostjo najmanj $\pm 0,02$ mm v območju posedka 0,2–1,0 mm ter najmanj ± 2 % v območju posedka 1,0–2,0 mm. Pri tem je treba skrbno paziti, da je kalibrirana višina prostega padca uteži vedno zagotovljena in da je utež po odboju vedno ulovljena. Tolerance meritev je ob dobri pripravi merilnega mesta na obrabnih slojih večine gozdnih cest mogoče doseči, na vlakah pa le stežka. Presežene tolerance meritev so po navadi znak slabe priprave merilnega mesta.

Uporaba dinamične plošče je tako enostavna, da zlahka pozabiš na dobro pripravo merilnega mesta in korektno izvedbo meritve. Rezultat so slabi podatki. V našem primeru smo se po začetnih poskusih uskladitve med merilci odločili, da vse meritve izvede en merilec.

Dinamična plošča mora biti pred začetkom uradnih meritev kalibrirana. Kalibracijo je treba opraviti enkrat letno oziroma na vsakih 1000 meritev. Ob življenjski dobi plošče 7 let, upošteva je letne stroške kalibracije, se naložba v ploščo povrne, če se letno izvede vsaj 60 meritev, sicer je boljše meritve najeti. Trenutna cena ene meritve z dinamično obremenilno ploščo je 45 EUR brez DDV in brez stroškov transporta do mesta izvedbe meritev.

Za meritve dinamičnega deformacijskega modula na materialih spodnjega ustroja gozdnih cest oziroma vlak in nosilnih plasteh ni znanih korelacij med E_{vd} in E_{v2} . Potrebne so meritve na dva načina. Čeprav take meritve niso poceni, izvedbo take preiskave priporočamo.

7.7.3 Določanje vlažnosti v plasti voziščne konstrukcije

Determination of moisture content in pavement layer

Naše vedenje o vlažnostnih razmerah v voziščnih konstrukcijah gozdnih cest je bilo pred izvedbo raziskave zelo skromno. Ker smo se zavedali, da ima vsebnost vlage v voziščni konstrukciji lahko velik vpliv na nosilnost vozišča, smo izmerili vsebnost vlage v terminih meritev nosilnosti na profilu s porušnim gravimetrijskim vzorcem materiala obrabne plasti in delno tudi s porušnimi vzorci materiala nosilne plasti. Za kalibracijo tovrstnih meritev vlažnosti smo za ista merilna mesta pridobili meritve povprečne vsebnosti vlage z izotopskim merilnikom. Ugotovljene korelacije med njima so zmerne in premo sorazmerne, če so se nanašale na povprečne razmere do globine 40 cm, in slabe, če smo primerjali izotopsko vsebnost vlage z gravimetrično za globino 0–10 cm.

Vsebnost vlage obrabnih slojev 24 ur po padavinah znaša na večini cest med 4 m.- % in 12 m.- %. Značilnih vplivov vsebnosti vlage obrabnega sloja na nosilnost nismo potrdili ne glede na to, ali smo uporabili gravimetrično ali pa izotopsko metodo določanja vsebnosti vlage.

Porušnim vzorcem smo gravimetrično vlažnost določili s sušenjem v laboratoriju, pri tem pa predpostavili, da groba zrna (nad 22,4 mm), ki smo jih na terenu stekali v stanju trenutne vlage, nimajo bistvenega vpliva na vsebnost vlage po izvedenem sušenju preostanka vzorca.

Pri bodočih raziskavah nosilnosti vozišča ne priporočamo določanja vsebnosti vlage obrabne plasti. Za poglobljene analize medsebojnih vplivov je treba vsebnost vlage ugotoviti z izotopskim merilnikom, lizimetri (Dawson, 2008a) ali s TDR-sondami, vgrajenimi v cestno telo (COURAGE - Construction with unbound road aggregates in Europe - final project report, 1999). Naši začetni poskusi s TDR-sondami niso dali spodbudnih rezultatov.

Pomen vsebnosti vlage v voziščni konstrukciji narašča, ko kakovost prometnice in vgrajenih materialov pada. Večji je pri vlakih kot pri cestah, večji je pri stranskih kot pri glavnih cestah. V primeru, da na terenu jemljemo porušni vzorec za sejalne analize, je treba odvzetemu vzorcu določiti vsebnost vlage.

7.7.4 Sejalna analiza in kakovost finih delcev

Particle size analysis and quality of fines

Za določanje zrnivosti smo uporabili metodo sejanja, pri kateri je zahtevana velikost vzorca odvisna od največjega zrna. Pri gradnji nosilnih plasti gozdnih cest in pri gradnji vlak telo prometnice večinoma oblikujemo iz lokalnega kamnitega materiala, nastalega pri odkopu za oblikovanje planuma spodnjega ustroja. Zlahka se zgodi, da so v plasti, za katero delamo sejalne analize, prisotna zrna nazivnega premera 100 mm in več. Za neoporečno sejnalno analizo takega materiala (SIST EN ISO 933-1:2002) potrebujemo 90 kg reprezentativnega vzorca. Pridobimo ga po četrтинjenju 400 kg izkopanega materiala. Če naj bo sejalna analiza verodostojna, je treba za posamezno cesto oziroma blok proučevanja zagotoviti ustrezno število ponovitev (vsaj 3). Povedane zahteve narekujejo prekope cest, ki so znatno večji od tistih, ki smo jih izvedli mi, in jih ni mogoče opraviti brez gradbene mehanizacije.

Tudi če se izkop opravi z mini bagrom, se problem velikega vzorca prenese v laboratorij. Mi smo uporabili sita premera 20 cm in največje odprtine 22,4 mm. Tako sito smemo obremeniti z največ 700 g materiala. To pomeni, da bi za eno sejnalno analizo morali 90 kg vzorec razdeliti na 128 podvorcev. To ni realno izvedljivo, zato predlagamo, da se v dogovoru z

geotehniki za kamnite posteljice poišče kompromisna velikost vzorca. Mi smo problem premajhnih mas vzorcev reševali z združevanjem vzorcev, a s tem ne rešimo problema izpadlih velikih zrn. Pri tem gre posnemati naš princip, saj smo grobo sejanje opravili ročno na terenu in v laboratorij dostavile le (drobnozrnat) del vzorca. Slabost tega postopka je, da fini delci ostanejo na velikih zrnih, velika zrna pa po tehtanju na terenu zavržemo. Problem velikih zrn je prisoten tudi pri analizah obrabnih plasti, še posebej na vlakah in močno poškodovanih cestah z izpranim/erodiranim voziščem.

Uporabljena metoda suhega sejanja daje sistematično premajhne vrednosti deleža finih delcev, poleg tega pa poškoduje določene vrste materialov (npr. peščenjaki). Oprema za mokro sejanje ni bistveno dražja, zahteva pa mnogo več časa za posamezen vzorec. To v povezavi s problematiko velikosti (pod)vzorcev še potencira časovno zamudnost sejalne analize za potrebe gradnje gozdnih cest.

Nobena od metod sejanja ne daje odgovora o kakovosti finih delcev. 5 m.- % finih delcev (velikosti pod 0,063 mm) je indikator zmrzlinško obstojnega materiala samo, če imajo ti delci značaj peska in ne gline. V zadnjih letih se je za značaj finih delcev uveljavila metoda »metilen modro«, ki se priporoča tako za zmesi zrn kot tudi za zemljine (Bohar, 2008).

7.7.5 Ugotavljanje prometne obremenitve **Traffic loading detection**

Prvič smo v gozdarstvo uvedli spremljanje prometne obremenitve s pomočjo radarskih števecv prometa. Omogoča določanje števila in strukture vozil glede na njihovo dolžino ter določanje časa prečkanja merodajnega profila. Njegova glavna prednost je avtonomnost delovanja, glavni problem pa zagotavljanje kontinuiranega napajanja.

Na terenu smo imeli namontirana dva merilnika. Eden je bil priključen prek inverterja na stalni vir električne energije v bližnji hiši (»Soteska«), drugemu (»Ravnik«) smo hodili menjavat baterije enkrat tedensko. Za prvega se je po pol leta obratovanja izkazalo, da mu tako napajanje povzroča težave in smo morali meritve na tem merilnem mestu prekiniti. Pri drugem merilniku se je pokazala velika odvisnost porabe energije od temperature. Nova polna baterija 6V/12 Ah je v hladnem obdobju zdržala le 3 dni, poleti pa 10 dni. To je povzročilo, da merilnik ni deloval 23 dni v letu 2009. Na specifičnih lokacijah bi bilo za polnjenje baterij možno postaviti solarne celice, a to ni izvedljivo v vseh primerih.

Za pravilno delovanje radarskega merilnika prometa je potrebna skrbna nastavitve smeri merilnika, od katere je odvisna zabeležena dolžina vozila, od te pa kategorija vozila.

Nastavitev smeri mora biti zelo trdna, saj smo imeli primer premika merilnika in s tem izgube podatka o kategoriji zaznanega vozila.

Poleg nastavitve smeri merilnika je potrebna tudi umeritev z znanimi vozili. Pri tem je zelo pomembno, kako daleč od merilnika se vozilo pelje. Večje kot so oddaljenosti, krajše je vozilo. To narekuje postavitve merilnika na lokacije, kjer je cesta relativno ozka oziroma vozilo ne more veliko variirati v oddaljenosti od detektorja.

7.7.6 Ostale uporabljene metode terenskega dela

Other used field methods

Nastajanje in oblikovanje voziščne konstrukcije pri gradnji gozdne ceste »Bajs« smo spremljali z rotirajočim laserskim nivelirjem. Pri tem smo uporabili metodo, ki smo jo za take namene razvili pred to raziskavo (Robek in sod., 1999). Predpogoj za ustrezno izvedbo metode sta postavitve referenčne točke izven cestišča na vsakem profilu in izmera začetnega stanja profila pred posegom. Metoda se je pokazala kot primerna, žal pa so v letih po končani gradnji ceste neznanci odstranili referenčne količke in tako preprečili ponovitve meritev. Referenčne višine morajo biti trajno označene. Zelo primerna za to so drevesa na nasipnih brežinah in skriti markerji. Višinska natančnost pri posnetku reliefa vozišča je znašala 5 mm. Meritve relativnih višin smo po vzoru iz literature (Brito in Dawson, 2008) opravljali na stalnih točkah v prečnem profilu (na vsakih 50 cm). To je bilo za naš namen ustrezno. Nekateri drugi avtorji priporočajo spremenljive točke pri meritvah prečnih profilov (Mihelič, 2013).

Za vzorčne izkope smo se odločili sredi leta 2009, v katerem smo izvajali sezonske meritve nosilnosti. Zanje smo se odločili po opravljenih meritvah oblike prečnega profila na opazovalnem polju ceste v gradnji, kjer smo ugotovili znatno odstopanje od izvedene projektirane debeline voziščne konstrukcije. Načrtovana velikost vzorčnega odkopa se je pokazala kot zadostna za prepoznavanje plasti voziščne konstrukcije in debeline plasti. Za izvedbo izkopa sta bila nujna agregat in udarno kladivo. Neto poraba časa za izvedbo posameznega izkopa in sanacijo jame je znašala manj kot eno uro. Z izvedbo izkopov smo pridobili dragocen vpogled v stanje voziščne konstrukcije na mestih celoletnih meritev nosilnosti, zato jih priporočamo pri tovrstnih bodočih raziskavah.

Meritve prečne ravnosti in prečnega naklona smo izvedli na analiziranih cestah, ki so bile leta 2008 zgrajene na novo. Pri tem smo domnevali, da je bilo ob končani gradnji vozišče dvostransko strehasto in brez kolesnic. Uporabili smo preprosto merilno orodje, pri tem pa izhajali iz domneve, da so gozdne prometnice dvosmerne in enopasovne. Izhodišče za

meritve je bila sredina vozišča. Za prečno neravnost smo uporabili merilno lato dolžine 150 cm, kar je polovico projektirane širine standardnega vozišča gozdne ceste v premi. Metoda je dala primerljive rezultate med proučevanimi objekti, za širšo primerljivost rezultatov prečne neravnosti pa bo potrebna bolj poglobljena raziskava.

8 ZAKLJUČKI IN PRIPOROČILA

CONCLUSIONS AND RECOMENDATIONS

Gozdne prometnice gradimo v vse bolj zahtevnih terenskih, zakonskih in finančnih pogojih. Zgornji ustroj cest ali voziščna konstrukcija je tisti del gradbenega objekta, kjer večino naporov ali nedela prikrijemo z bolj ali manj vsečno zaključno plastjo. Predstavlja blažilec ali rezervo za pokrivanje nepredvidenih stroškov, saj kakovosti voziščne konstrukcije gozdnih cest v Sloveniji ne preverjamo, zahteve za njeno izgradnjo pa so zelo ohlapne.

Nosilnost vozišč, izražena z dinamičnim deformacijskim modulom, je kazalnik kakovosti voziščne konstrukcije, s tem pa neposredno tudi eden izmed ključnih kazalnikov funkcionalnosti celotne prometnice. V gradbeništvu je preverjanje nosilnosti tekom gradnje sestavni del kontrole kakovosti izvedenih del, dinamični deformacijski modul pa ena od osnov za dimenzioniranje vozišče konstrukcije glede na predvideno prometno obremenitev, namensko rabo in lokalne klimatske pogoje.

Cilj naše raziskave je bil presoja uporabnosti dinamične obremenilne plošče za ugotavljanje nosilnosti grajenih gozdnih prometnic ter spoznavanje zvez med nosilnostjo vozišč in bistvenimi vplivnimi dejavniki. Glavne ugotovitve raziskave so:

1. Uporabili smo dinamično obremenilno ploščo ZGF 02 za določitev nosilnosti zgrajenih gozdnih cest in vlak v različnih letnih časih na karbonatnih in mešanih geoloških podlagah, za izmero nosilnosti posameznih plasti voziščne konstrukcije na vzorčnih izkopih cest ter za meritve nosilnosti tekom gradnje glavne gozdne ceste. Najnižjo nosilnost smo izmerili spomladi na novo zgrajeni vlaki na karbonatni podlagi in je znašala $3,6 \text{ MN/m}^2$. Najvišja izmerjena nosilnost je bila pozimi na glavni gozdni cesti ($2.250,0 \text{ MN/m}^2$). To je bilo daleč nad merilnim območjem dinamične obremenilne plošče, ki znaša 125 MN/m^2 . Povprečne vrednosti nosilnosti na nasipnih kolesnicah na glavnih gozdnih cestah so spomladi leta 2009 znašale $72,1 \text{ MN/m}^2$, na stranskih gozdnih cestah $47,5 \text{ MN/m}^2$ in na grajenih vlakih $10,7 \text{ MN/m}^2$. Poleti smo ugotovili povprečno 46% višjo nosilnost na glavnih cestah in 40 % višjo nosilnost na stranskih cestah glede na spomladanske meritve. Z dinamično ploščo lahko zaznamo vsa stanja nosilnosti vozniških površin vseh grajenih gozdnih prometnic, v vseh fazah gradnje in rabe, z izjemo meritev v pogojih zmrznjenih tal.
2. Analiza materialov, vgrajenih v voziščne konstrukcije dvanajstih gozdnih cest v obdobju od leta 2000 do 2008 je pokazala, da je granulometrijska sestava obrabnih plasti po gradbenih merilih večinoma ustrezna. Na istih objektih je granulometrijska sestava materialov, vgrajenih v nosilne sloje, po gradbenih merilih neustrezna; če jih obravnavamo kot materiale za kamnite posteljice in povozne platoje, je večinoma

- ustrezna. Analiziranim vzorcem materialov nosilnih plasti največkrat primanjkuje grobega drobirja. V analiziranih nosilnih plasteh je preveč zrn nad 63 mm. Ugotovljena količina finih delcev z metodo suhega sejanja je v predpisanih mejah, kakovosti finih delcev nismo preverjali.
3. Debelina voziščne konstrukcije na analiziranih vzorčnih izkopih na splošno ni bila v statistično značilni korelacijski zvezi z ugotovljeno nosilnostjo vozišča. Za ceste na karbonatnih podlagah je bila ta zveza rahlo obratno sorazmerna. To razlagamo s tem, da na dobro nosilnih spodnjih ustrojih v praksi gradijo tanjše nosilne plasti. Nekoliko bolj značilen vpliv na nosilnost ima povprečna vsebnost vlage voziščne konstrukcije. Večja vsebnost vlage znižuje nosilnost, vendar so zveze šibke in veljajo le za območje vsebnosti vlage do 20 masnih odstotkov vode v suhi snovi. Vlažnost obrabne plasti ni merodajna ocena za povprečno vlažnost voziščne konstrukcije.
 4. Vlake so v vseh pogojih primerljivega merjenja nosilnosti značilno manj nosilne od stranskih in glavnih gozdnih cest. Povprečna nosilnost grajenih novih vlak na trdih (karbonatnih) podlagah v sušnem obdobju je značilno nižja od povprečne spomladanske nosilnosti starih in novi stranskih gozdnih cest na primerljivi geološki podlagi. Z uporabo nosilnost vlak narašča in znaša po petih letih v sušni dobi povprečno 15 MN/m^2 , kar je okvirno trikrat manj od povprečne nosilnosti stranskih cest in petkrat manj od povprečne nosilnosti glavnih cest v primerljivih razmerah.
 5. Nosilnost vozišča, ugotovljena z dinamično obremenilno ploščo, je točkovna vrednost, ki se v prostoru zelo spreminja. Pričakovali smo značilne razlike nosilnosti vozišča v kolesnici na nasipu glede na nosilnost kolesnice v raščenih tleh. Statistično značilne razlike med tema mestoma smo ugotovili na novih stranskih cestah, na glavnih cestah in vlakah pa ne. Naši rezultati v manjši meri potrjujejo tuje ugotovitve o zmanjšani nosilnosti kolesnic v nasipu (Potočnik in sod., 2005b). Ocenjujemo, da vozila sčasoma utrdijo nasipni del vozišča v mešanem profilu. Ugotovili smo veliko heterogenost v povprečni nosilnosti vozišč med odseki iste prometnice in tudi med odseki iste kategorije grajenih gozdnih prometnic.
 6. Z uporabo radarskih števec prometa in uporabo uveljavljenih gradbeniških postopkov smo na osnovi celoletnih meritev prometa na dveh glavnih gozdnih cestah ugotovili ekvivalentno dnevno prometno obremenitev $17,6 \times 100 \text{ kN}$. Ob upoštevanju 20-letne življenjske dobe voziščne konstrukcije znaša merodajna prometna obremenitev profila »Ravnik« $179.872 \times 100 \text{ kN}$, kar jo uvršča med zelo lahke merodajne prometne obremenitve.

7. Z vidika kratkotrajnih vplivov prometa so bile absolutne vrednosti povprečnih nosilnosti leto po začetku uporabe cest primerljive z vrednostmi za stare glavne ceste. Statistično značilna razlika v povprečni nosilnosti je med stranskimi cestami, kjer je bila spomladanska nosilnost novih, višja od starih cest zaradi nenosilnih odsekov stranskih cest na mešani podlagi. Pet let po začetku uporabe novih cest smo na njih ugotovili povprečno globino kolesnic 2,7 cm, razlike med stranskimi in glavnimi cestami, ter stranskimi cestami na obravnavanih geoloških podlagah niso bile značilno različne. Domačih meril za dopustno globino kolesnic na gramoznih voziščih ni, v tujini je prag dopustne kolesnice 5 cm. Po tem merilu lahko rečemo, da izmerjene vrednosti ne presegajo dopustnega praga globine kolesnice, vpliv prometa pa je zaznaven.

Opravljen raziskava na področju nosilnosti grajenih gozdnih prometnic je prva po desetletjih zanemarjanja te problematike v gozdarstvu. Spodbujena je bila z izzivi, ki so povezani z nosilnostjo gozdnih prometnic, zlasti s problematiko zniževanja stroškov gradnje cest in pomisleki pri gradnji neutrjenih cest. Verodostojnih odgovorov na ta vprašanja ne more biti, dokler nimamo ustreznih postopkov za vrednotenje nosilnosti.

Z raziskavo smo pridobili temeljna znanja na tem področju, kar omogoča uporabo dinamične obremenilne plošče v praksi in v raziskovanju nosilnosti pri graditvi gozdnih prometnic. Naša priporočila na področju problematike nosilnosti vozišč so naslednja:

1. Priporočamo uporabo dinamične obremenilne plošče za sprotno kontrolo kakovosti vgrajenih materialov v voziščne konstrukcije gozdnih cest in planumov nasipov za vlake. Zlasti v geološko in hidrološko spremenljivih pogojih lahko z meritvami nosilnosti diferenciramo debeline voziščne konstrukcije in vrste uporabljenih materialov ter na tak način ustvarimo prihranke brez izgube kakovosti.
2. Dinamično obremenilno ploščo je treba uporabljati v okviru predpisanega merilnega območja in namenske rabe, pri tem pa zagotoviti, da na merilnem mestu plošča ni v stiku s zrni, večjimi od 63 mm. Meritve je treba izvajati vsaj 24 ur po padavinah in z najmanj devetimi ponovitvami za območje presoje. Priporočamo meritve na kolesnici v nasipu.
3. Glavne gozdne ceste gradimo redko. Ko pa jih gradimo, mora kakovost materialov in nosilnost vozišča ustrezati gradbeniškim standardom za nevezane nosilne in obrabne plasti. Priporočamo, da se ob spremembi kategorizacije zanje predpiše minimalne standarde kakovosti voziščne konstrukcije in predvidi njihova preverba ob gradbenotehničnem prevzemu novega objekta.

4. Pri gradnji stranskih gozdnih cest spodbujamo uporabo lokalnih materialov za nosilne plasti, pri tem pa je treba izločati groba zrna (zlasti nad 125 mm). Pri gradnji bolj obremenjenih glavnih gozdnih cest se je treba izogibati izdelavi nosilnih plasti iz sortirane materiala izkopa oziroma je v tem primeru treba zemljino stabilizirati.
5. Kamioni, zlasti težki, ne sodijo na traktorske vlake. To pa ne ovira oblikovanja nove kategorije neutrjene grajene gozdne prometnice za občasno vožnjo s traktorskimi prikolicami in z zgibnimi prikoličarji. Do oblikovanja meril za take prometnice priporočamo, da dolžina take prometnice ne presega 500 m, promet na njej pa mora nujno biti reguliran z zapornico s ključem.
6. Priporočamo nadaljevanje raziskovanja nosilnosti v gozdnem gradbeništvu, zlasti na področjih uporabe alternativnih materialov za voziščne konstrukcije, omejevanje uporabe cest v spomladanskem času ter uporabo tehnik stabilizacije zemljin na traktorskih cestah.

9 POVZETEK

Nosilnost vozišč je element kakovosti grajenih gozdnih prometnic. V Sloveniji imamo danes zelo ohlapne zahteve glede kakovosti vozišč gozdnih cest in vlak. Njihovo nosilnost ugotavljamo zelo redko. Nosilnost obstoječih prometnic ocenjujemo na osnovi globine kolesnic, pri novih prometnicah se odločamo po občutku. Spremembe na tem področju so nujne.

Osrednji cilji raziskave so bili: usvojiti temeljna znanja za sodobno terensko določanje nosilnosti v cestogradnji, spoznati zveze med bistvenimi dejavniki, ki vplivajo na nosilnost vozišč gozdnih cest in vlak, ter oblikovati usmeritve za bistvene naloge na tem področju slovenskega gozdarstva v prihodnosti.

Problematico nosilnosti grajenih gozdnih prometnic v Sloveniji smo obravnavali na primeru štirih glavnih in osmih stranskih gozdnih cest ter šestih grajenih vlak, ki so bile večinoma zgrajene v obdobju od leta 2002 do 2008 po uveljavljenih strokovnih merilih. Analizirane prometnice se nahajajo na karbonatni ali mešani podlagi na različnih gozdnogospodarskih območjih. Polovica jih je bilo zgrajenih v letu 2008, ostale so bile konec leta 2008 stare vsaj tri leta. Za vse ceste, zgrajene v analiziranem obdobju, je bila izdelana in pridobljena predpisana projektna dokumentacija. Na izbranih prometnicah smo naključno izbrali 36 odsekov v povprečni dolžini 50 m. Na vsakem odseku so bili izločeni trije karakteristični prečni profili. Skupno smo izločili 99 karakterističnih prečnih profilov na gozdnih cestah in 9 na grajenih vlakah. V letu 2009 smo opravili 1.936 meritev dinamičnega deformacijskega modula E_{vd} z dinamično obremenilno ploščo ZFG02. E_{vd} je mera nosilnosti za temeljna tla ter nevezane nosilne in obrabne plasti, ki je uveljavljena pri graditvi javnih cest in na grobozrnatih zmesih zrn dobro korelira z drugimi uveljavljenimi kazalniki nosilnosti. Leta 2014 smo na istih mestih ponovili meritve nosilnosti na vlakah. Leta 2009 smo v posameznem terminu izmerili nosilnost vozišča na kolesnici v odkopu in na nasipu.

V času meritev nosilnosti smo izkopali 471 vzorcev obrabnega sloja in jim v laboratoriju določili gravimetrično vsebnost vlage. Na štirih cestah smo 7. aprila 2009 z izotopskim merilnikom določili tudi povprečno vlažnost voziščne konstrukcije. V prvem tednu septembra 2009 smo iz karakterističnih prečnih profilov izbrali po dva profila na vsaki cesti in na vzorčni kolesnici v nasipu izkopali voziščno konstrukcijo do globine 40 cm. Na globinah 0 cm, 20 cm in 40 cm smo izmerili nosilnost ter vzeli vzorce materiala obrabnih in nosilnih plasti za določitev gravimetrične vlažnosti in zrnivosti. V laboratoriju Gozdarskega inštituta Slovenije smo 199 vzorcem materialov voziščnih konstrukcij cest in 18 vzorcem površinskih slojev grajenih vlak s tehniko suhega sejanja določili zrnivost ter izračunali količnik neenakomernosti in količnik zakrivljenosti presejne krivulje. Za zbrane podatke

smo s tehnikami statističnega izvedenja faktorskih vzorčnih poskusov in analize varianc preizkusili značilnost razlik v povprečni nosilnosti glede na vplivne dejavnike. Ti so merilno mesto, kategorija prometnice, geološka podlaga, starost, vsebnost vlage in debelina voziščne konstrukcije. Na dveh profilih na glavnih gozdnih cestah smo na robu transportno zaokrožene površine z metodo radarske detekcije eno leto izvajali štetje prometa.

Najnižjo nosilnost smo izmerili spomladi na novozgrajeni vlaki na karbonatni podlagi. Znašala je $3,6 \text{ MN/m}^2$. Najvišja izmerjena nosilnost je bila pozimi na glavni gozdni cesti ($2.250,0 \text{ MN/m}^2$). Povprečne vrednosti izmerjene nosilnosti kolesnice v nasipu na glavnih gozdnih cestah so spomladi leta 2009 znašale $72,1 \text{ MN/m}^2$, na stranskih gozdnih cestah $47,5 \text{ MN/m}^2$ in na grajenih vlakih $10,7 \text{ MN/m}^2$. Z dinamično obremenilno ploščo lahko zaznamo vsa stanja nosilnosti vozniških površin vseh grajenih gozdnih prometnic v vseh fazah gradnje in rabe, z izjemo meritev v pogojih zmrznjenih tal.

Analiza materialov, vgrajenih v voziščne konstrukcije dvanajstih gozdnih cest v času od leta 2002 do 2008, je pokazala, da je granulometrijska sestava obrabnih plasti po gradbenih merilih večinoma ustrezna. Na istih objektih je granulometrijska sestava materialov, vgrajenih v nosilne sloje, po gradbenih merilih neustrezna, če jih obravnavamo kot materiale za kamnite posteljice in povozne platoje pa je večinoma ustrezna. Debelina voziščne konstrukcije na splošno ni bila v statistično značilni korelacijski zvezi z ugotovljeno nosilnostjo vozišča. Za ceste na karbonatnih podlagah je bila ta zveza rahlo obratno sorazmerna. Večja vsebnost vlage znižuje nosilnost, vendar so zveze šibke in veljajo le za območje vsebnosti vlage do 20 masnih odstotkov vode v suhi snovi. Vlažnost obrabne plasti ni merodajna ocena za povprečno vlažnost voziščne konstrukcije.

Vlake so v vseh pogojih primerljivega merjenja nosilnosti značilno manj nosilne od stranskih in glavnih gozdnih cest. Povprečna nosilnost grajenih novih vlak na trdih (karbonatnih) podlagah v sušnem obdobju je značilno nižja od povprečne spomladanske nosilnosti starih in novih stranskih gozdnih cest na primerljivi geološki podlagi. Z uporabo nosilnost vlak narašča in po petih letih v sušni dobi znaša povprečno 15 MN/m^2 , kar je trikrat manj od povprečne nosilnosti stranskih cest in petkrat manj od povprečne nosilnosti glavnih cest.

Nosilnost vozišča, ugotovljena z dinamično obremenilno ploščo, je točkovna vrednost, ki se v prostoru zelo spreminja. Pričakovali smo značilne razlike nosilnosti vozišča v kolesnici na nasipu glede na nosilnost kolesnice v raščenih tleh. Statistično značilne razlike med tema mestoma smo ugotovili na novih stranskih cestah, na glavnih cestah in vlakih pa ne. Z vidika kratkotrajnih vplivov prometa so bile absolutne vrednosti povprečnih nosilnosti eno leto po začetku uporabe cest primerljive s starimi glavnimi cestami na karbonatni podlagi in z

novimi glavnimi cestami na mešani podlagi. Pet let po začetku uporabe novih cest smo na njih ugotovili povprečno globino kolesnic 2,7 cm, razlike med obravnavanimi skupinami prometnic niso bile značilno različne. Izmerjene vrednosti globine kolesnic ne presegajo v tujini uveljavljenega dopustnega praga globine kolesnice.

Na osnovi celoletnih meritev prometa na dveh glavnih gozdnih cestah smo ugotovili ekvivalentno dnevno prometno obremenitev 17,6 x 100 kN. Ob upoštevanju 20-letne življenjske dobe voziščne konstrukcije in 3 % letne stopnje rasti prometa, znaša merodajna prometna obremenitev profila »Ravnik« 179.872 x 100 kN, kar jo uvršča med zelo lahke merodajne prometne obremenitve.

Priporočamo uporabo dinamične obremenilne plošče za sprotno kontrolo kakovosti vgrajenih materialov v voziščne konstrukcije gozdnih cest in planumov nasipov za vlake. Zlasti v geološko in hidrološko spremenljivih pogojih lahko z meritvami nosilnosti diferenciramo debeline voziščne konstrukcije in vrste uporabljenih materialov ter na tak način ustvarimo prihranke brez izgube kakovosti. Dinamično obremenilno ploščo je treba uporabljati v okviru predpisanega merilnega območja in namenske rabe, pri tem pa zagotoviti, da na merilnem mestu plošča ni v stiku z zrni, večjimi od 63 mm. Meritve je treba izvajati vsaj 24 ur po padavinah in z najmanj devetimi ponovitvami za območje presoje. Priporočamo meritve v kolesnici na nasipu.

Priporočamo nadaljevanje raziskovanja nosilnosti v gozdnem gradbeništvu, zlasti na področjih uporabe alternativnih materialov za voziščne konstrukcije, omejevanje uporabe cest v spomladanskem času ter uporabo tehnik stabilizacije zemljin na traktorskih cestah.

SUMMARY

Pavement bearing capacity is a quality element of constructed forest thoroughfares. In Slovenia we nowadays have very loose requirements for quality of forest road and skid trail carriageways. Their bearing capacity is being estimated very rarely. We assess the bearing capacity of the existing thoroughfares on the basis of rut depth, in new thoroughfares we are guided upon our feelings. Changes in this field are necessary.

The main objectives of the research were: to acquire basic knowledge of contemporary road construction bearing capacity determining, to discover the relationship among the essential factors that affect the bearing capacity of forest road and skid trail pavements, and to develop guidelines for essential tasks in this field of Slovenian forestry in the future.

Problems of constructed forest thoroughfares bearing capacity in Slovenia were dealt in the case of four primary and eight secondary forest roads and six skid trails that were built in the period from 2002 to 2008, according to established professional standards. The analyzed roads are located on lime or mixed basis in different forest management areas. Half of them were built in 2008 and the rest were at the end of 2008 at least three years old. For all roads built during the analysis period, the prescribed project documentation was designed and obtained. On the selected roads were randomly chosen 36 sections in the average length of 50 m. In each section three typical cross-sections were eliminated. Altogether, we set 99 typical cross-sections on the forest roads and 9 on the skid trails. In 2009, we carried out 1936 measurement of dynamic modulus of deformation E_{vd} with a dynamic load plate ZFG02. E_{vd} is a measure of bearing capacity on the underlying soils and unbound bearing and wearing courses, which is implemented in the construction of public roads and on coarse grained mixtures correlates well with other established indicators of bearing capacity. In 2014, we repeated measurements of the bearing capacity on the skid trails at the same places. In 2009, we measured in individual terms pavement rut bearing capacity on cut and on fill.

During the bearing capacity measurement we excavated 471 samples of wearing course and in a laboratory set their gravimetric moisture content. On 7th April 2009 we also determined the average moisture of the pavement construction on four roads using an isotope gauge. In the first week of September 2009, we selected from typical cross-sections two profiles on each road and on a sample rut on fill dug the pavement construction to a depth of 40cm. In the depths of 0cm, 20cm and 40cm we measured the bearing capacity and took the material samples of wearing and bearing courses to determine the gravimetric moisture and grainy texture. In the Slovenian Forestry Institute laboratory we determined the texture for 199 sample materials of road pavement constructions and 18 samples of surface layers of built skid trails and calculated the ratio of heterogeneity and the ratio of curvature of the grading curve with the technique of dry sieving. By using the techniques

of the statistical evaluation of factorial sampling experiments and analysis of variance we tested the gathered data for the significance of differences in the average bearing capacity depending on influencing factors. These factors are measurement location, thoroughfare category, geological base, age, moisture content and thickness of the pavement. On two cross-sections on the primary forest roads entering the closed transport gravity unit we did one year traffic count with a radar detection method.

The lowest bearing capacity was measured in spring at the newly built skid trail on lime base. It was 3.6 MN/m^2 . Maximum bearing capacity was measured in winter on a primary forest road (2250.0 MN/m^2). The average bearing capacity values on primary forest roads in the spring of 2009 amounted to 72.1 MN/m^2 , on secondary forest roads 47.5 MN/m^2 and on constructed skid trails 10.7 MN/m^2 . With the dynamic loading plate we can detect all the bearing capacity conditions of the driving surfaces of all constructed forest roads during all phases of construction and use, with the exception of measurements in frozen ground conditions.

The analysis of materials embedded in the pavement of twelve forest roads in the period from 2002 to 2008 showed that the granulometric composition of the wearing course is mostly appropriate regarding the construction criteria. On the same objects the granulometric composition of materials embedded in the base layers is inadequate regarding the construction criteria, but if we consider them as materials for stone capping layers and construction plateaus it is mostly appropriate. The thickness of the pavement in general was not in a statistically significant correlation with the stated carriageway bearing capacity. For the roads on lime base this correlation was slightly inversely proportional. Increased moisture content reduces the bearing capacity, but the correlations are weak and apply only to the area of the moisture content up to 20 percent by weight of water in the dry matter. Moisture of the wearing course is not a relevant estimate for the average moisture of the pavement.

Skid trails are in all conditions of comparable bearing capacity measurement significantly less load-bearing than secondary and primary forest roads. The average bearing capacity of constructed new skid trails on hard (lime) bases during a dry season is typically lower than the average spring bearing capacity of old and new secondary forest roads on a comparable geological base. With the use the bearing capacity of skid trails increases and after five years of drought gets an average of 15 MN/m^2 , which is three times less than the average bearing capacity of secondary roads and five times less than the average bearing capacity of primary roads.

Bearing capacity of a carriageway, as detected by the dynamic loading plate, is the point value, which varies in the area greatly. We were expecting significant differences in the carriageway bearing capacity in the rut on fill according to the bearing capacity in the rut

on cut. We found statistically significant differences between these two places on new secondary roads, but not on primary roads and skid trails. In terms of short-term impacts of transport the absolute values of the average bearing capacities one year after the road use were comparable to the old primary roads on a lime base and the new primary roads on a mixed base. Five years after the entry of new roads into service, we found that their average rut depth was 2.7 cm; the differences among the studied groups of thoroughfares were not significantly different. The measured values of the rut depth do not exceed the abroad established tolerable threshold rut depth.

Based on yearly measurements of traffic on two primary forest roads was found equivalent daily traffic load of $17.6 \times 100 \text{ kN}$. Taking into consideration the 20-year lifetime of a pavement and 3% of annual increase of traffic the design traffic loading of the cross-section »Ravnik« is $179872 \times 100 \text{ kN}$, which ranks it among the very light design traffic loading.

We recommend using the dynamic loading plate for simultaneous quality control of materials installed in the pavements of forest roads and the embankment formations of skid trails. Especially in geologically and hydrologically changing conditions we can create savings without any loss of quality by using measurements of bearing capacity to differentiate thickness of the pavement and type of the used materials. The dynamic load plate has to be used within the specified measuring range and deliberate use; while ensuring that at the measuring point the plate is not in contact with grains larger than 63 mm. Measurements have to be taken at least 24 hours after rainfall and with at least nine repetitions for the area of assessment. We recommend measurements in the rut on fill.

We recommend continued research of bearing capacity in the forest construction, particularly in the areas of alternative materials for pavements, restrictive use of roads in spring and the use of soils stabilization techniques on tractor roads.

10 VIRI

REFERENCES

- Al-Almudi O. S. B., Asi I. M., Wahhab A., Khan Z. A. 2002. Clegg hammer - California bearing ratio correlations. *Journal of materials in civil engineering*, 14, 6: 512-523
- Annon. 1964. Privremeno uputstvo za projektovanje i izgradnju puteva u poljoprivredi mehaničkom i hemijskom stabilizacijom tla. Tipkopis: 43 str.
- ASTM D 3282 - 83. Standard practice for classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes. 1988: 5 str.
- Ašič B. 2006. Načela in kriteriji za projektiranje maloprometnih cest: diplomsko delo. (Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo). Maribor, samozal.: 65 str.
- Beaudry M. T. 1992. Minnesota's design guide for low volume aggregate surfaced roads. Minnesota, , Minnesota Department for Transportation: 17 str.
- Bebar M., Trotošek S. 2010. Vpliv vode na trajnost ceste. V: 10. slovenski kongres o cestah in prometu. Portorož, 20.-22. oktober 2010. Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije: 791-799
- Beguš J. 2006. Informacijski sistem o gozdnih cestah. V: Monitoring gospodarjenja z gozdom in gozdnato krajino. ((*Studia forestalia Slovenica: strokovna in znanstvena dela*, 127). Hladnik D. (ur.). Ljubljana. Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdartvo in obnovljive gozdne vire: 331-345
- Beguš J. 2014. Določitev strokovnih podlag za predlog uredbe o prihodkih za vzdrževanje gozdnih cest. Ljubljana, ZGS-CE Oddelek za gozdno tehniko: 13 str.
- Beneš J. 1969. Šumski stabilizacioni putevi. Beograd, Štamparija Kozmos: 33 str.
- Berčič A. 2002. Prispevek za oblikovanje tehničnega predpisa o načrtovanju, gradnji in vzdrževanju manj prometnih cest. V: Načrtovanje, gradnja in vzdrževanje manj prometnih cest: zbornik referatov. Strokovni posvet, Gornja Radgona, 10. aprila 2002. Vilhar M. (ur.). Ljubljana, DRC, Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije: 93-107
- Bitenc B., Potočnik I. 1989. Odvisnost širine cestnega telesa od naklona terena in vrste kamnine. *Gozdarski vestnik*, 10: 439-441
- Black B. P., Hardenberg J. M., (ed.). 1991. Historical perspectives in frost heave research- the early works of S. Taber and G. Beskow. (Special report, 91-23). U.S. Army Corps of Engineers, Cold Regions Research & Engineering Laboratory, Hanover New Hampshire: 167 str.
- Bohar F. 2008. Določitev metilen modro na značilnih kamenih agregatih - kaj pa zemljine? V: Razprave 5. posvetovanja slovenskih geoteknikov, Nova Gorica, 12-14 junij 2008. Logar J., Petkovšek A., Klopčič J. (ur.). Ljubljana, Slovensko geotehniško društvo: 105-114
- Bohrn G., Stampfer K. 2014. Untreated wood ash as a structural stabilizing material in forest roads. *Croatian journal of forest engineering*, 35, 1: 81-89
- Boston K., Robek R., Rathom J. 2009. The potential use of light drop-weight deflectometer to control subgrade compaction on forest roads. *Western Journal of Applied Forestry*, 24, 2: 83-87

- Brito A. T. L., Dawson A. 2008. Roads under timber traffic - monitoring study. Nottingham, School of civil engineering - University of Nottingham: 83 str.
- Brown S. F. 1990. Introduction to pavement design. V: Residential course on bituminous pavements: materials, design and evaluation. Nottingham, The department of civil engineering - University of Nottingham: A1-D14
- Brunning R. 2014. Neolithic and bronze-age Somerset: a wetland perspective. http://www1.somerset.gov.uk/archives/hes/downloads/HES_150_Years_Chapter_11.pdf (4. 11. 2014)
- Cezar J. 2002. Načrtovanje - dimenzioniranje voziščnih konstrukcij. V: Načrtovanje, gradnja in vzdrževanje manj prometnih cest: zbornik referatov. Strokovni posvet, Gornja Radgona, 10. aprila 2002. Vilhar M. (ur.). Ljubljana, DRC, Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije: 65-76
- Cezar J. 2007. Nova spoznanja pri dimenzioniranju voziščnih konstrukcij in načrtovanju sanacijskih ukrepov na obstoječih cestah: magistrsko delo. (Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo). Ljubljana, samozal.: 153 str.
- Charlier R., Hornych P., Seršen M., Hermansson A., Bjarnason G., Erlingsson S., Pavšič P. 2009. Water Influence on Bearing Capacity and Pavement Performance: Field Observations. V: Water in Road Structures. Dawson A.R. (ed.). Dordrecht, Springer: 175-192
- Cheung L. W., Dawson A. 2002. Effects of particle and mix characteristics on the performance of some granular materials. Journal of transportation research board, 1787: 90-98
- Clough F. 1993. Maintenance of the unsurfaced roads. Low cost unsurfaced roads. Edinburgh, Heriot Watt University: 10 str.
- Cook J. R., Petts R. C., Rolt J. 2013. Low volume rural road surfacing and pavements - a guide to good practice. London, OTB Engineering UK LLP: 117 str.
- Cools N., De Vos B. 2010. Sampling and analysis of soil. Manual part X. V: Manual on methods and criteria for harmonised sampling assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Cools N., De Vos B (editors), Hamburg, UNECE ICP Forests: 208 str.
- Corduroy road. 2014. Wikipedia http://en.wikipedia.org/wiki/Corduroy_road (4. 11. 2014)
- Corlea Trackway. 2013. Wikipedia http://en.wikipedia.org/wiki/Corlea_Trackway (4. 11. 2014)
- COURAGE - Construction with unbound road aggregates in Europe - final project report. 1999. Nottingham, University of Nottingham: 78 str.
- Curtis A. 2008. Materials Evaluation report CR 68 - Testing after Construction. Scaramento California, CHEC Management Systems: 14 str.
- Cvek D. 2013. Rekonstrukcija ceste z uporabo hladne reciklaže z elektrofiltrskim pepelom: diplomsko delo. (Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Prometnotehniški oddelek). Ljubljana, samozal.: 83 str.
- Ćirić M. 1984. Pedologija. Sarajevo, SOUR Svjetlost: 312 str.

- Dawson A. 1997. Rutting in unsurfaced roads - materials and structure interaction effects. V: Thin pavements, surface treatments, unbund roads: low cost, low volume... high tech! New Brunswick. Geotrans - UNB Natural Resources Geotechnique: 101-108
- Dawson A. 2003. Cumulative damage and its applicability to low volume road pavements. V: Internationales Kolloquium Prüfung, Bewertung und Bemessung von Strassenbefestigungen. Dresden, Technische Universität: 1-13
- Dawson A., Berntsen G., Kolisoja P., Johansson S., Saarenketo T., Munro R. 2006. Developing appropriate engineering responses to seasonal effects for pavements serving remote communities. V: Cold region engineering 2006: Current practices in cold regions engineering. Davies M., Zufelt J.E. (eds.). Maine, American Society of Civil Engineers: 1-9
- Dawson A., Kolisoja P., Vuorimies N., Saarenko T. 2007. Design of low-volume pavements against rutting - a simplified approach. V: 9th Low volume roads conference. Austin, Texas. Transport research board: 1-14
- Dawson A. (ed.). 2008a. Water in road structures - movement, drainage and effects. Nottingham, Springer: 356 str.
- Dawson A. 2008b. Rut accumulation in low-volume pavements due to mixed traffic. Transportation Research record: Journal of the Transportation research board, 2068: 78-86
- Dawson A., Kolisoja P., Vuorimies N. 2008. Understanding low-volume pavement response to heavy traffic loading. Nottingham, ROADDEX III Project report: 42 str.
- Dawson A., Killer D. 2009. Roads under timber traffic - Summary final report. Nottingham-UK, School of civil engineering - University of Nottingham: 20 str.
- Diaci J., Golob A. 2009. Slovensko gozdarstvo pred izzivi 21. stoletja. Gozdarski vestnik, 67, 7-8: 307-315
- Dobre A. 1974. Izkop na trasi gozdne ceste v trdni hribini. Ljubljana, Inštitut za gozdno in lesno gospodarstvo pri Biotehniški fakulteti: 110 str.
- Dobre A. 1982. Uporabnost polsti pri gradnji cest. Sodobno kmetijstvo, 9: 367-369
- Dobre A. 1986. Naravne danosti za načrtovanje in gradnjo gozdnih cest v Sloveniji. Ljubljana, Inštitut za gozdno in lesno gospodarstvo: 58 str.
- Dobre A. 1993. Prometna obremenitev cest zaradi gospodarjenja z gozdom. Gozdarski vestnik, 51, 1: 27-41
- Dobre A. 1994. Gozdne prometnice - višješolski študij - skeletno študijsko gradivo. Ljubljana, -Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo: 71 str.
- Dobre A., Robek R. 1998. Po sledih Rimske ceste. Gozdarski vestnik, 56, 3: 185-188
- Douglas R. A. 1999. Forest roads, resource access roads : delivery. The transportation of raw natural resource products from roadside to mill. Fredericton, University of New Brunswick: 177 str.
- Dretnik D. 1984. Sodobna gradnja in vzdrževanje gozdnih cest - 1.del (uvodna študija). Slovenj Gradec. Lesna Slovenj Gradec - Gozdarski sektor. (neobjavljeno)
- Dynatest 3031 LWD. 2006.
- <http://www.dynatest.com/equipment/structural/lwd.aspx> (12. 11. 2014)

- Earth and aggregate surfacing design guide for low-volume roads. 1996. Washington, USDA Forest service: 302 str.
- Eisbacher J. 1976. The application of soil testing methods in forest road construction. V: Technical report of FAO/Austria training course on Forest Roads and wood harvestong in mountainous forests, 1-29 June 1975. Ossiach Austria. FAO: 117-127
- Encyclopaedia Britannica. 2014.
<http://www.britannica.com/> (3. 11. 2014)
- Fannin R. J., Lorbach J. 2007. Road pavement. V: Guide to Forest Road Engineering in Mountainous Terrain. Rome, Food and Agriculture Organisation of the United Nations: 27-36
- Ficko G. (ed.). 2014. Ceste na slovenskem skozi čas. Ljubljana, DRC, Družba za raziskave v cestni in prometni stroki: 623 str.
- Field A. 2013. Discovering Statistics using IBM SPSS Statistics. SAGE Publications: 952 str.
- Forest road engineering guidebook. 2002. Victoria, British Columbia Ministry of Forests: 208 str.
- Forest road management guidebook: maintenance and repairs to protect fish habitat and water quality. 2000. Portland, Oregon department of forestry: 32 str.
- Ghaffarian M. R., Stampfer K. 2010. Optimal Road spacing of Cable Yarding Using a Tower Yarder in Southern Austia. European Journal of Forest Research, 129: 409-416
- Gozdna cesta 'Bajs - Goli Cirk'. Projekt za izvedbo del. 2006. Tolmin, SGG Tolmin: 89 str. (neobjavljeno)
- Gozdna cesta 'Čemerje - Lukežova bajta'. Projekt za izvedbo del. 2006. Tolmin, SGG Tolmin: 67 str. (neobjavljeno)
- Gozdna cesta 'Čutarovka'. Projekt za izvedbo del. 2005. Tolmin, SGG Tolmin: 67 str. (neobjavljeno)
- Gozdna cesta 'Jezero - Planinca'. Projekt za izvedbo del. 2004. Tolmin, SGG Tolmin: 121 str. (neobjavljeno)
- Gozdna cesta 'Knipajz - Krekovše 1'. Projekt za gradbeno dovoljenje in izvedbo del. 2002. Tolmin, SGG Tolmin 68 str. (neobjavljeno)
- Gozdna cesta 'Kovkovo'. Projekt za izvedbo del. 2007. Tolmin, SGG Tolmin: 55 str. (neobjavljeno)
- Gozdna cesta 'Lipovec - Sotla'. Projekt za izvedbo del. 2004. Tolmin, SGG Tolmin: 47 str. (neobjavljeno)
- Gozdna cesta 'Macesnova - Bolnica Jelendol'. Projekt za izvedbo del. 2006. Tolmin, SGG Tolmin: 67 str. (neobjavljeno)
- Gozdna cesta 'Osojna - Zlaka'. Projekt za izvedbo del. 2004. Tolmin, SGG Tolmin: 47 str. (neobjavljeno)
- Gozdna cesta 'Strešni vrh'. Projekt za izvedbo del. 2006. Tolmin, SGG Tolmin: 51 str. (neobjavljeno)
- Gozdnogospodarski načrt Gozdnogospodarske enote Ravnik 2001-2010. 2001. Ljubljana, Zavod za gozdove Slovenije, Območna enota Ljubljana: 130 str.

- Gozdnogospodarski načrt Gozdnogospodarske enote Soteska 2004-2013. 2004. Novo mesto, Zavod za gozdove Slovenije, Območna enota Novo mesto: 152 str.
- Gregorc C., Dolinar M. 2002. Sanacija makadamskih vozišč na državnih cestah. V: Zbornik referatov. Dnevi občinskih cest. Portorož, 30 in 31. maj 2002. Ljubljana, Slovenska cestna podjetja: 1-3
- Gucinski H., Furniss J. M., Ziemer R. R., Brookes H. M. (ed.). 2001. Forest roads: a synthesis of scientific information. Portland, Oregon, USDA Forest service, Pacific Northwest Research Station: 103 str.
- Guček M. 2006. Stanje in potrebna višina sredstev za vzdrževanje gozdnih cest na Bornovi posesti: diplomsko delo. (Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire). Ljubljana, samozal.: 48 str.
- Guidelines for geometric design of very low-volume local roads. 2001. Washington, American association of state highway and transport officials: 72 str.
- Hafner F. 1956. Forstlicher Strassen- und Wegebau. Wien, Verlag Georg Fromme & Co: 399 str.
- Henneveld R. 1995. In-situ measurements of the bearing capacity of granular base course. V: Unbound Aggregates in Roads. Dawson A., Jones R. (eds.). Nottingham, The Department of Civil Engineering The University of Nottingham University Park: 293 - 304
- Herrick J. E., Jones T. L. 2002. A Dynamic Cone Penetrometer for Measuring Soil Penetration Resistance. Soil Science Society of America Journal, 66: 1320-1324
- History of the road transport. 2014. Wikipedia
http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_road_transport (5. 11. 2014)
- Hobi K., Prezzi M., Salgado R. 2010. Use of dynamic cone penetration and clegg hammer tests for quality control of roadway compaction and construction. Final report-FHWA/IN/JTRP-2010/27. West Lafayette, Indot research: 274 str.
- Hodić I., Jurušić Z. 2011. Analiza primarne otvorenosti šuma kojima gospodare HŠ d.o.o. Zagreb kao podloga za kreiranje buduće politike izgradnje šumskih cesta. Šumarski list, 135, 9-10: 487-499
- Holtz R. D., Kovacs W. 1981. An introduction to geotechnical engineering. New Jersey, Prentice Hall: 779 str.
- Horvat D. 1993. Prilog proučavanju prohodnosti vozila na šumskom tlu. Zagreb, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta: 234 str.
- Horvat D. 1996. Procjena stabilnosti šumskog tla penetrometrom s konusom - stanje i budući razvoj na šumarskome fakultetu u Zagrebu. V: Izzivi gozdne tehnike: zbornik posvetovanja. Mednarodni posvet, 8. maj 1996. Ljubljana, Gozdarski institut Slovenije: 83-93
- Hribar D. 2008. Vplivi trajnih deformacij v nevezani nosilni plasti. V: 9. Slovenski kongres o cestah in prometu. Portorož, 22 -24 oktober. Vilhar M. (ur.). Ljubljana, DRC, Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije: 1-7
- Hribernik B. 2013. Model zgoščevanja omrežja gozdnih cest v večnamenskem gozdu: doktorska disertacija. (Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta). Ljubljana, samozal.: 168 str.

- Huntington G., Ksaibati K. 2007. Gravel Roads Surface Performance Modeling. Transportation Research Record: Journal Of Transportation Research Board, 2016: 55-64
- Instruktion Nr. 5. 2013. Verwendung von Recyclingbaustoffen im Waldstrassenbau. 2014. <http://www.lawa.lu.ch/index/download.htm> (18. 11. 2014)
- Intihar M. 2014. Poškodbe tal po sečnji in spravilu s kombiniranim strojem HSM 805F: magistrsko delo. (Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta). Ljubljana, samozal.: 139 str.
- Jurjavčič P., Cotič Z. 2008. Uporaba valjarja z vgrajenim sistemom za kontinuirano kontrolo zgoščenja. V: 9. Slovenski kongres o cestah in prometu. Portorož, 22 -24 oktober. Vilhar M. (ur.). Ljubljana, DRC - Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije: 12
- Juvanc A. 2005. Temeljni pogoji za določanje cestnih elementov. Univerza v Ljubljani - Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. Ljubljana, Prometnotehniški inštitut: 52 str.
- Kalin J., Kokot D., Leben B., Žnidaršič A. 2006. Vpliv ravnosti vozišča na poškodovanost cestne konstrukcije in voznega parka. V: 8. Slovenski kongres o cestah in prometu. Portorož, 25 -27 oktober. Vilhar M. (ur.). Ljubljana, DRC, Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije: 1-8
- Keller G., Sherar J. 2003. Low - volume roads engineering, best management practices field guide. Virginia, US Agency for International Development, USDA Forest Service, Virginia Polytechnic Institute and State University: 115 str.
- Keller M. 1989. Ponašanje i održavanje neasfaltiranih cesta. Ceste i mostovi, 35, 4: 131-139
- Kestler A. M. 2009. Stabilisation selection Guide for Aggregate and Native-Surfaced Low-Volume Roads. San Dimas, USDA Forest Service: 42 str.
- Killer D. 1993. Design (Geometrics/structural). V: Low cost unsurfaced roads. Heriot Watt university. Edinburgh, The institution of Agricultural Engineers - Forestry Engineering Specialist Group: 1-15
- Klemenčič I. 1969. Stabilizacija gozdnih cest. Gozdarski vestnik: 161-168
- Kobayashi H., Fukuda M. 1975. Some factors influencing bearing capacity of forest road surfaces. Journal of Japanese forestry society, 75: 135-143
- Konrad J. M., Thivierge F., Roy M. 1997. The use of low-cost insulation to mitigate severe frost action in low volume roads. V: Thin Pavements, Surface Treatments, Unbund Roads: low cost, low volume... high tech!: proceedings of the international symposium held at the Wu Conference Centre, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, June 24-25, 1997 Fredericton, New Brunswick, Canada. geotrans - UNB Natural Resources Geotechnique: 237-244
- Kosztka M. 1998. Maintenance management system of forest roads. V: Proceedings of the seminar on environmentally sound forest roads and wood transport, 17-22 June 1996. Sinaia. FAO: 232 - 239
- Košir B. 2008. Tehnološki vidik izvedbe možnega poseka in povezave z gozdnogospodarskim načrtovanjem. Gozdarski vestnik, 66, 3: 147-159
- Košir B. 2010. Gozdna tla kot usmerjevalec tehnologij pridobivanja lesa. Ljubljana, Biotehniška fakulteta pri Univerzi v Ljubljani, , Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 80 str.

- Kotar M. 2011. Raziskovalne metode v upravljanju z gozdnimi ekosistemi. Ljubljana, Zveza gozdarskih društev Slovenije: 520 str.
- Krč J., Beguš J. 2013. Planning Forest Opening with Forest Roads. Croatian journal of forest engineering, 34, 2: 217-228
- Kristan P. 2008. Primerjava kategorizacije gozdnih cest na Češkem in v Sloveniji ter izdelava projekta gozdne ceste s programom Roadpac: diplomsko delo. (Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire). Ljubljana, samozal.: 81 str.
- Kuonen V. 1983. Wald- und Güterstrassen, Planung-Projektierung-Bau. Visp, Eigenverlag des Verfassers: 384 str.
- Larcombe G. 1999. Forest roading manual. Rotorua, New Zeland, Liro forestry solutions: 402 str.
- Legere G., Mercier S. 2004. Materials and performance specifications for wearing-course aggregates used in forest roads. V: Pavements Unbound. Dawson A.R. (ed.). Balkema, Rotterdam: 345-354
- Lindhqvist A., Bengtsson A. 2010. Development Concept for Timber Truck. Lund University, Maskinkonstruktion, Institutionen för designvetenskaper LTH. Sweden: 196 str.
- Lovrič M. (ed.). 1989. Tehnički uvjeti za gospodarske ceste. Zagreb, Znanstveni savjet za promet JAZU: 75 str.
- Lovrič N. 1971. Dimenzioniranje kolničkih konstrukcija šumskih puteva. Šumarski simpozij prigodom 300 godišnjice Sveučilišta te 50 godišnjice šumarske fakultetske nastave u Zagrebu. Zagreb, Šumarski fakultet: 68-74
- Lovrič N. 1983. Ocjena kvalitete kolničke vozne površine šumskih kamionskih cestovnih prometnica. V: Mehanizacija šumarstva u teoriji i praksi: zbornik radova. 1. savetovanje šumara Hrvatske, Opatija, 16. do 18. veljače 1983. Zagreb, Šumarski fakultet, Zavod za istraživanja u šumarstvu: strani??
- Lumsden K. 2004. Truck Masses and Dimensions - Impact on Transport Efficiency. Gothenburg, , Department of Logistics and Transportation, Chalmers University of Technology: 28 str.
- Majes B. 2014. Mehanika tal - laboratorijske vaje - lastnosti zemljin (2. vaja klasifikacija zemljin). Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tal z laboratorijem.
http://www.fgg.uni-lj.si/kmtal-gradiva/VKI-UNI/MT/Vaje%20in%20priloge/2%20lab_vaja.pdf (12. 10. 2014)
- Mali B., Košir B. 2007. Poškodbe tal po strojni sečnji in spravi lesa z zgibnim polprikoličarjem. Gozdarski vestnik, 65, 3: 131-142
- Malick R. B., El-Korchi T. 2009. Pavement engineering: principles and practice. Boca Raton, London, New York, CRC Press, Taylor & Francis: 512 str.
- Malovrh A. 2009. Prometne obremenitve voziščne konstrukcije: diplomsko delo. (Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo). Ljubljana, samozal.: 78 str.
- Manual for the planning, design and construction of forest roads in steep terrain. 1998. Rome, FAO: 188 str.

- Matičič M. 2002. Proizvodnja lesa v zasebnem in državnem gozdu ter vzdrževanje gozdnih cest: diplomsko delo. (Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire). Ljubljana, samozal.: 41 str.
- Matthies D. 1997. Latest developments in soil physical analysis - the dynamic computer tomography and radon gas diffusion. Zbornik gozdarstva in lesarstva, 54: 71-86
- Maxwell M. D. 1942. Cost control in the logging industry. New York, London, McGraw-Hill Book Company: 374 str.
- Merkblatt Nr. 201. Unterbau: Begriffe. 1965: V: Merkblätter über den Bau und Unterhalt von Wald- und Güterstrassen. Zürich, Schweizerische Arbeitsgemeinschaft für Forstlichen Strassenbau: 2 str.
- Merkblatt Nr. 312. Deflektionsmessungen mit dem Benkelman-Balken. 1985: V: Merkblätter über den Bau und Unterhalt von Wald- und Güterstrassen. Zürich, Schweizerische Arbeitsgemeinschaft für Forstlichen Strassenbau: 2 str.
- Mihelič M. 2013. Gospodarnost in okoljski vidiki tehnologij pridobivanja lesnih sekancev za energetske rabo: doktorska disertacija. (Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta). Ljubljana, samozal.: 274 str.
- Minansy B. 2012. Contrasting soil penetration resistance values acquired from dynamic and motor-operated penetrometers. Geoderma, 177-178: 57-62
- Monlux S., Mitchell R. M. 2006. Surface-Aggregate Stabilization with Chloride Materials. San Dimas, U.S. Department of Agriculture - Forest Service: 23 str.
- Mork H. 2008. Light Weight Deflectometer, Principles and Versability. V: NVF/BRA Symposium. Oslo, February 13 and 14 2008., Oslo, Norwegian university of science and technology, Faculty of engineering science and technology: 29 str.
- O'Mahony M. J., Ueberschaer A., Owende P. M. O., Ward S. M. 2000. Bearing capacity of forest access roads built on peat soils. Journal of terramechanics, 37, 2: 127-138
- Oblak R. 2006. Načrtovanje, gradnja in spremljava zemeljskih del pri gradnji prometnic - nasipi in vkopi: magistrsko delo. (Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo). Ljubljana, samozal.: 260 str.
- Pavšič P., Said S., Ravnikar Turk M. 2008. Concrete building rubble for unbound layers - part of SPENS project. V: 9. Slovenski kongres o cestah in prometu. Portorož, 22 -24 oktober 2008. Vilhar M. (ur.). Ljubljana, DRC - Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije: 1-8
- Pellegrini M., Grigolato S., Cavalli R. 2013. Spatial multi-criteria decision process to define maintenance priorities of forest road network: an application in the Italian Alpine region. Croatian journal of forest engineering, 34, 1: 31-42
- Petkovšek A., Klinar A., Robek R. 2002. Smernica št. 401: zemeljska dela pri gradnji gozdnih cest - osnutek. V: Novelacija smernic za projektiranje gozdnih cest. Robek R. (ur.). Ljubljana, Gozdarski inštitut Slovenije: 1-6
- Petkovšek A., Bebar M., Ločniškar A. 2008. Stabiliziranje zemljin pri gradnji avtocest v Sloveniji - pretekle izkušnje in nove perspektive. V: 9. Slovenski kongres o cestah in prometu. Portorož, 22-24 oktober 2008. Vilhar M. (ur.). Ljubljana, DRC, Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije: 1-11

- Petkovšek A. 2013. Nevezane plasti cest in voda: večna a nevšečna sopotnika. V: Zbornik: Strokovni posvet Ceste in poplave. Maribor, 10. 10. 2013. Hanžič K., Cesnik S. (ur). Maribor, Fakulteta za gradbeništvo: 19-25
- Petkovšek M. 2010. Težnje razvoja kamionskega prevoza lesa: diplomsko delo. (Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire). Ljubljana, samozal.: 54 str.
- Pidwerbesky B. 1997. Evaluation of non-destructive in situ tests for unbound granular pavements. IPENZ Transactions, 24, 1/CE: 12-17
- Plaistow L., Dawson A. 1995. Non - linear aggregate behaviour in flexible pavements. V: Unbound Aggregates in Roads (Proc. UNBAR4). Dawson A., Jones R. (eds.). Nottingham, Dept. Civil Engineering University of Nottingham: 141-161
- Poje A. 1993. Gradnja in pomen gozdnih prometnic v GE Draga. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo. Ljubljana: 27 str.
- Poljanec A. (ed.). 2011. Gozdnogospodarski in lovskoupravljalški načrti območij za obdobje 2011–2020: povzetek za Slovenijo, Ljubljana, Zavod za gozdove Slovenije: 108 str.
- Poročilo Zavoda za gozdove Slovenije o gozdovih za leto 2007. 2008. Ljubljana, Zavod za gozdove Slovenije: 120 str.
- Poročilo Zavoda za gozdove Slovenije o gozdovih za leto 2012. 2013. Ljubljana, Zavod za gozdove Slovenije: 133 str.
- Poršinsky T., Horvat D. 2005. Indeks kotača kao parametar procjene okolišne prihvatljivosti vozila za privlačenje drva. Nova mehanizacija šumarstva, 26: 25-38
- Poršinsky T., Sraka M., Stankić I. 2006. Comparison of two approaches to soil strength classifications. Croatian journal of forest engineering, 27, 1: 17-26
- Posinek P. 2006. Primerjava postopkov dimenzioniranja voziščnih konstrukcij maloprometnih cest: diplomsko delo. (Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo). Maribor, samozal.: 61 str.
- Potočnik I., Šinko M., Winkler I. 1991. Ekonomska narava naložb v gozdne ceste. Zbornik gozdarstva in lesarstva, 38: 199-234
- Potočnik I. 1993. Poškodbe zgornjega ustroja gozdnih cest. Zbornik gozdarstva in lesarstva, 42: 217-235
- Potočnik I. 1996a. Prometna obremenitev gozdnih cest - primer Kamniške Bistrice. Zbornik gozdarstva in lesarstva, 48: 193-218
- Potočnik I. 1996b. Mnogonamenska raba gozdnih cest kot kriterij za njihovo kategorizacijo: doktorska disertacija. (Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta). Ljubljana, samozal.: 233 str.
- Potočnik I. 2001. Smernica št. 301: tehnični elementi za projektiranje gozdne ceste - osnutek. V: Novelacija smernic za projektiranje gozdnih cest. Ljubljana, Gozdarski inštitut Slovenije: 1-6
- Potočnik I., Pentek T., Pičman D. 2005a. Impacts of traffic characteristics on forest roads due to forest management. Croatian journal of forest engineering, 26, 1: 51-57
- Potočnik I., Yoshioka T., Igarashi H., Sakai H. 2005b. Maintenance of forest road network by natural forest management in Tokyo University Forest in Hokkaido. Croatian journal of forest engineering, 26, 2: 71-77

- Pravilnik o gozdnih prometnicah. 2009. Ur.l. RS, št. 4/2009
- Pravilnik o mehanski odpornosti in stabilnosti objektov. 2005. Ur.l. RS, št. 101/22005
- Pravilnik o merah in masah vozil v cestnem prometu. 2006. Ur.l. RS, št. 138/2006
- Pravilnik o metodologiji za določitev potrebnih ukrepov in delitev stroškov zaradi prekomerne prometne obremenitve javnih cest s tovornimi vozili. 2005. Ur.l. RS, št. 7/2012
- Pravilnik o projektiranju cest. 2005. Ur.l. RS, št. 91/2005
- Resolucija o nacionalnem gozdnem programu. 2007. Ur.l. RS, št. 111/2007
- Robek R. 1994. Vplivi transporta lesa na tla gozdnega predela Planina Vetrh: magistrsko delo. (Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta). Ljubljana, samozal.: 132 str.
- Robek R. 1996. Preverjanje kakovosti vzdrževanja gozdnih cest - možnosti in omejitve. Zbornik gozdarstva in lesarstva, 51: 101-111
- Robek R., Potočnik I., Krajčič D. 1999. Spremembe oblike cestišča pri različnih načinih investicijskega vzdrževanja gozdne ceste. Zbornik gozdarstva in lesarstva, 60: 153-175
- Robek R., Klun J., Vončina R. 2006. Dosežki in izzivi pri graditvi gozdnih prometnic. Gozdarski vestnik, 64, 10: 509-525
- Ročenovič M. 2002. Osnove in načela projektirana manj prometnih cest. V: Načrtovanje, gradnja in vzdrževanje manj prometnih cest: zbornik referatov. Strokovni posvet. Gornja Radgona. Vilhar M. (ur.). Ljubljana, DRC, Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije: 23-37
- Rogers C., Brown A., PR F. 1995. Elastic stiffness measurement of pavement foundation layers. V: Unbound Aggregates in Roads. Dawson A., Jones R. (eds.). Nottingham, The Department of Civil Engineering The University of Nottingham University Park: 331 - 338
- Saarilahti M. 2002. Soil interaction model. Evaluation of the WES - method on assesing the trafficability of terrain and the mobility of forest tractors, University of Helsinki, Department of forest resource management: 28 str.
- Sayers W. M., Thomas G. D., Paterson D. O. W. 1986. Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements. Washington, World Bank: 86 str.
- Schlaghamersky A. 1999. Simple reinforcement of forest roads using recycled construction material. V: Emerging harvesting issue and technology transition at the end of the century. Opatija, Croatia. Hrvatske šume: 107-111
- Semmelink C. 1995. Optimal compaction of untreated road building materiales in South Africa. V: Unbound Aggregates in Roads. Dawson A., Jones R. (eds.). Nottingham, The Department of Civil Engineering The University of Nottingham University Park: 35 - 45
- Siekmeier J., Pinta C., Merth S., Jensen J., Davich P., Camargo F., Beyer M. 2009. Using the Dynamic Cone Penetrometer and Light Weight Deflectometer for Cnstruction Quality Assurance. Report No.MN/RC 2009-12. Maplewood, Minnessota, USA: 244 str.
- SIST EN 933-1:2012. Preizkusi geometričnih lastnosti agregatov - 1. del: Ugotavljanje zrnivosti - Metoda sejanja. 2012: 18 str.

- SIST EN 933-8:2012. Preskusi geometričnih lastnosti agregatov - 8. del: Ugotavljanje finih delcev - Ekvivalent peska. 2012: 23 str.
- SIST EN 1997-2:2007. Evrokod 7: Geotehnično projektiranje - 2. del: Preiskovanje in preizkušanje tal. 2007: 196 str.
- SIST EN 13242:2003+A1. Agregati za nevezane in hidravlično vezane materiale za uporabo v inženirskih objektih in za gradnjo cest - Metoda sejanja. 2008: 39 str.
- SIST EN ISO 14688-1:2004. Geotehnično preiskovanje in preizkušanje - Prepoznavanje in razvrščanje zemljin - 1. del: Prepoznavanje in opisovanje (ISO 14688-1:2002). 2004: 21 str.
- SIST EN ISO 14688-2:2004. Geotehnično preiskovanje in preizkušanje - Prepoznavanje in razvrščanje zemljin - 2. del: Načela za razvrščanje (ISO 14688-2:2004). 2004: 21 str.
- SIST ISO 11277:2012. Kakovost tal - Ugotavljanje porazdelitve velikosti delcev v mineralnem delu tal - Metoda s sejanjem in usedanjem. 2012: 30 str.
- Slovar slovenskega knjižnega jezika. 2014. Ljubljana, Inštitut za slovenski jezik Frana Ramovša ZRC SAZU
<http://www.fran.si/130/sskj-slovar-slovenskega-knjiznega-jezika> (2. 11. 2014)
- Smernice za projektiranje gozdnih cest. 1982. Ljubljana, Splošno združenje gozdarstva Slovenije: 42 str.
- Sukič S. 2013. Sile in napetosti v zgornjem in spodnjem ustroju železniških prog. UL -FGG, Oddelek za gradbeništvo, Prometna smer. Ljubljana: 76 str.
- Surdahl R. W., Everett R., Woll J. H., Marquez R. 2005. Road Stabilizer Product Performance: Buenos Aires National Wildlife Refuge. Report No. FHWA-CFL/TD-05-011. Lakewood, U.S. Department of Transportation – Federal Highway Administration: 78 str.
- Svetličič S. 2002. Geološko geotehnične raziskave pri načrtovanju in vzdrževanju manj prometnih cest. V: Načrtovanje, gradnja in vzdrževanje manj prometnih cest: zbornik referatov. Strokovni posvet. Gornja Radgona, 10. aprila 2002. Vilhar M. (ur.). Ljubljana, DRC, Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije: 51-63
- Swift L. W., Burns R. G. 1999. The three R s of roads: redesign, reconstruction, and restoration. *Journal of Forestry*, 97, 8: 41-44
- Šuklje L. 1984. Mehanika tal. Ljubljana, Univerza v Ljubljani: 245 str.
- Šušnjar M., Horvat D., Šešelj J. 2006. Soil compaction in timber skidding in winter conditions. *Croatian journal of forest engineering*, 27, 1: 3-15
- Šušnjar M., Horvat D., Kristić A., Pandur Z. 2008. Morphological Analysis of Forest Tractor Assemblies. *Croatian journal of forest engineering*, 29, 1: 41-51
- Terzaghi K., Peck R. B., Mesri G. 1996. Soil mechanics in engineering practice. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, John Wiley & Sons: 529 str.
- Thom N. H., Fleming P. R. 2002. Experimental and Theoretical Comparison of Dynamic Plate Testing Methods. V: 6th International conference 'Bearing capacity of roads, railways and airfields'. Lisbon. London, Taylor & Francis group 731-740
- Tomazin G. 2008. Stanje gozdnih cest in potrebna višina sredstev za njigovo optimalno vzdrževanje v občini Logatec: diplomsko delo. (Univerza v Ljubljani, Biotehniška

- fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire). Ljubljana, samozal.: 48 str.
- Tompai Z. 2008. Laboratory evaluation of B & C small-plate light falling weight deflectometer. *Periodica polytechnica - Civil Engineering*, 52, 2: 103-107
- Transport modeling for RUTT project: final report. 2008. Castle, Douglas Commision Scotland: 27 str.
- Trzcinski G., Kaczmarzyk S. 2006. Estimation of carrying capacity of slag and gravel forest road pavements. *Croatian Jurnal of Forest Engineering*, 27: 27-36
- TSC 03.200 : predlog 2003. Temeljni pogoji za določanje cestnih elementov v odvisnosti od voznodinamičnih pogojev, ekonomike cest, prometne obremenitve in prometne varnosti ter preglednosti. 2003: 66 str.
- TSC 03.325 : osnutek 2003. Maloprometne ceste. 2003: 64 str.
- TSC 06.100 : 2003. Kamnita posteljica in povozni plato. 2003: 16 str.
- TSC 06.200 : 2003. Nevezane nosilne in obrabne plasti. 2003: 17 str.
- TSC 06.511 : 2009. Prometne obremenitve - določitev in razvrstitev. 2009: 10 str.
- TSC 06.512 : 2003. Projektiranje - Klimatski in hidrološki pogoji. 2003: 13 str.
- TSC 06.520 : 2003. Projektiranje. Dimenzioniranje novih asfaltnih voziščnih konstrukcij. 2003: 12 str.
- TSC 06.541 : 2003. Projektiranje. Dimenzioniranje ojačitev obstoječih asfaltnih voziščnih konstrukcij. 2003: 13 str.
- TSC 06.610 : 2003. Lastnosti vozni površin. Ravnost. 2003: 11 str.
- TSC 06.630 : 2002. Lastnosti vozni površin. Podajnost. 2002: 16 str.
- TSC 06.711 : 2001. Meritve gostote in vlage - Postopek z izotopskim merilnikom. 2001: 11 str.
- TSC 06.712 : 2002. Meritve gostote. Nadomestni postopki. 2002: 15 str.
- TSC 06.713 : 2005. Meritve gostote. Postopki kontinuiranih površinskih dinamičnih meritev. 2005: 18 str.
- TSC 06.720 : 2003. Meritve in preiskave - Deformacijski moduli vgrajenih materialov. 2003: 14 str.
- TSC 06.740 : 2003. Gradnja preskusnih polj. 2003: 18 str.
- TSC 06.800 : 2001. Ponovna uporaba materialov v cestogradnji. Recikliranje. 2001: 18 str.
- Urbančič M., Simončič P. 2005. Atlas gozdnih tal Slovenije. *Gozdarski vestnik*, 63, 2: 1-12
- Uredba o klasifikaciji vrst objektov in objektih državnega pomena. 2011. Ur.l. RS, št.109/11
- Ureditev priključka na gozdni cesti 'Soteska-Oražem' in dograditev gozdne ceste 'Podgozd-Soteska'. Projekt za izvedbo del. 2007. Tolmin, SGG Tolmin: 54 str. (neobjavljeno)
- Vanags C., Minasny B., McBratney A. B. 2004. The dynamic penetrometer for assessment of soil mechanical resistance. *SuperSoil 2004*, 3rd Australian New Zealand Soils Conference. University of Sydney, Australia, 5 - 9 December 2004. Sydney, The Regional Institute: 1-8
- Vierth I., Berell H., Haraldsson M., Hammarström U., Yahya M.-R., Lindberg G., Carlsson A., Ögren M., Björketun U. 2008. The effects of long and heavy trucks on the transport

- system - Report on a government assignment. Linköping, , Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI), Sweden: 92 str.
- Wästerlund I. 1992. Extent and causes of site damage due to forestry traffic. *Scandinavian journal of forest research*, 7: 135-142
- Wong J. Y. 2009. Terramechanics and off-road vehicle engineering. Terrain behaviour, off-road vehicle performance and design. ,Oxford, Amsterdam, Elsevier: 488 str.
- Zakon o gozdovih. 1993. UL RS, št. 30/1993, 13/1998 Odl.US: U-I-53/95, 24/1999 Skl.US: U-I-51/95, 56/1999-ZON (31/2000 popr.), 67/2002, 110/2002-ZGO-1, 112/2006 Odl.US: U-I-40/06-10, 115/2006, 110/2007, 61/2010 Odl.US: U-I-77/08-14
- Zakon o graditvi objektov (ZGO) - neuradno prečiščeno besedilo št.15. 2002. Ur.l. RS št. 102/04 - uradno prečiščeno besedilo, 14/05 - popr., 92/05 - ZJC-B, 93/05 - ZVMS, 111/05 - odl. US, 126/07, 108/09, 61/10 - ZRud-1, 20/11 - odl. US, 57/12, 101/13 - ZDavNepr in 110/13
- Zakon o javnih cestah ZJC-UPB1. 2002. Ur. l. RS, št. 33/06
- Zohrabi M., Scott P. L. 2003. The correlation between the CBR value and penetrability of pavement construction materials. Nottingham, Transport Research Laboratory: 18 str.
- Zorn G. 1996. Operating manual: light Drope-Weight Tester ZFG 05 for the dynamic CBR test and the dynamic plate loading test. Stendal, ZornB. G.: 15 str.
- Žlogar J. 2007. Primernost traktorskih vlak za vožnjo z zgibnim polprikoličarjem: diplomsko delo. (Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire). Ljubljana, samozal.: 57 str.
- Žmavc J. 1968. Poročilo o rezultatih preiskav materialov in njih uporabnosti za gradnjo cest na območju GG Bled. Ljubljana, Zavod za raziskavo materialov in konstrukcij: 28 str.
- Žmavc J. 1970. Navodila za stabiliziranje materialov. Ljubljana, Društvo za ceste SRS: 52 str.
- Žmavc J. 1994. Strokovno mnenje o kontroli nosilnosti po postopku s krožno obremenilno ploščo in padajočo lahko utežjo. Ljubljana. Cestni inženiring, Sektor za tehnologijo in razvoj: 14 str.
- Žmavc J. 2006. Asfalt. Ljubljana, Združenje asfalterjev Slovenije: 302 str.
- Žmavc J. 2007. Voziščne konstrukcije. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 274 str.
- Žmavc J. 2010. Vzdrževanje cest. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije: 286 str.

ZAHVALE

ACKNOWLEDGEMENTS

Pričujoča disertacija je nastajala dolgo, predolgo. Glavna in največja zahvala pri njenem nastajanju gre ženi Idi, ki me je pri njenem nastajanju ves čas spodbujala in podpirala ter dolga leta namesto mene doma postorila vse potrebno.

Iskrena hvala prof. dr. Igorju Potočniku za nasvete in pomoč v času prijave teme, pri izdelavi doktorske disertacije ter za vztrajno in taktno spodbujanje k dokončanju začetega dela.

Hvala tudi prof. dr. Janezu Žmavcu in prof. dr. Dubravku Horvatu za številne in dobronamerne pripombe ter nasvete pri oblikovanju in strukturiranju disertacije.

Posebno zahvalo sem dolžan kolegom iz prakse. Brez njih ne bi nabral praktičnih izkušenj na področju gozdarskega projektiranja in izvedbe del, ki sem jih s pridom uporabil pri usmerjanju naloge v realne probleme. Za dolgoletno podporo mojemu praktičnemu projektiranju voziščnih konstrukcij se zahvaljujem Rafaelu Vončini, direktorju Soškega gozdnega gospodarstva Tolmin. Za pomoč pri izvedbi meritev pri gradnji ceste Bajs–Goli Cirk ter za nesebično razdajanje dolgoletnih gradbeniških izkušenj se zahvaljujem Dominiku Pekošaku. Hvala tudi Jožetu Gobcu za pomoč pri izbiri vlak ter za podatke o njih.

Zahvaljujem se sodelavcem Gozdarskega inštituta Slovenije, ki so me pri nastajanju dela podpirali, posebna zahvala pri tem gre dr. Nike Krajnc, vodji oddelka za gozdno tehniko in ekonomiko. Hvala Iztoku Sinjurju in Zvonetu Kastelicu za pomoč pri terenskih in laboratorijskih delih ter Jaki Klunu za pomoč pri uporabi nemške literature.

Hvala tudi vodstvu Gozdarskega inštituta Slovenije, da sem lahko opravljal in dokončal doktorski študij v interesu delodajalca.

PRILOGE
APPENDIX

Priloga A: AC klasifikacija zemljin – skupina grobozrnatih zemljin

Appendix A: AC- soli classification - coarse grained group

Osnovna razdelitev	Značilnost	Simbol Oznaka	Geotehnični opis	Postopek terenske identifikacije	Kriterij laboratorijske in končne klasifikacije	Dvojne oznake pri klasifikaciji
Dobelo zrnate zemljine. Več kot 50 % vseh zrn je večjih od 0.063mm	Čist prod z malo veziva	GW	Dobro graduiran prod ali prodnato peščena mešanica, malo ali nič drobnih delcev	Širok razpon zrn vseh frakcij.	Cu = D60/D10 > 4 Cc = D30 ² /D60xD10 med 1-3 Manj kot 5 % zrn < 0.075mm	Če je delež zrn pod 0.063 mm 5 - 12 % Primer: GW - GM
		GP	Slabo graduiran prod ali prodnato peščena mešanica, malo ali nič drobnih delcev	Prevladuje ena vrsta frakcij, medtem ko druge manjkajo	Ne izpolnjuje kriterijev Cu in Cc za GW Manj kot 5 % zrn < 0.075mm	Če je delež zrn pod 0.063 mm 5 - 12 % Primer: GP - GC
	Prod s primesmi drobnih zrn, ki so lahko glinasta ali meljasta	GM ^d "	Meljast prod, prodno- peščeno-meljasta mešanica	Drobna zrna niso plastična	Indeks plastičnosti Ip < 4 % Več kot 12 % zrn < 0.075mm	Če je Ip: 4 - 7 % Primer: GM - GC
		GC	Glinast prod, prodno- peščeno-glinasta mešanica	Drobna zrna so plastična	Indeks plastičnosti Ip > 7 % Več kot 12 % zrn < 0.075mm	Če je Ip: 4 - 7 % Primer GW - GC
Pesek in peščene zemljine. Več kot 50 % debelih zrn je manjših od 2 mm	Čist pesek z malo veziva	SW	Dobro graduiran pesek ali prodnat pesek, malo ali nič drobnih delcev	Širok razpon zrn vseh frakcij.	Cu = D60/D10 > 7 Cc = D30/D60x D10 med 1-3 Manj kot 5 % zrn < 0.075	Če je delež zrn pod 0.075 mm 5 - 12 % Primer: SW - SM
		SP	Slabo graduiran pesek ali prodnat pesek, malo ali nič drobnih delcev	Prevladuje ena vrsta frakcij, medtem ko druge manjkajo	Ne izpolnjuje kriterijev Cu in Cc za SW Manj kot 5 % zrn < 0.075	Če je delež zrn pod 0.075 mm 5 - 12 % Primer: SP - SC
	Pesek s primesmi drobnih zrn, ki so lahko glinasta ali meljasta	SM ^d "	Meljast pesek, peščeno meljasta mešanica	Drobna zrna niso plastična	Indeks plastičnosti Ip < 4 % Več kot 12 % zrn < 0.075mm	Če je Ip: 4 - 7 % Primer: SM - SC
		SC	Glinast pesek, peščeno glinasta mešanica	Drobna zrna so plastična	Indeks plastičnosti Ip > 7 % Več kot 12 % zrn < 0.075mm	Če je Ip: 4 - 7 % Primer SW - SC

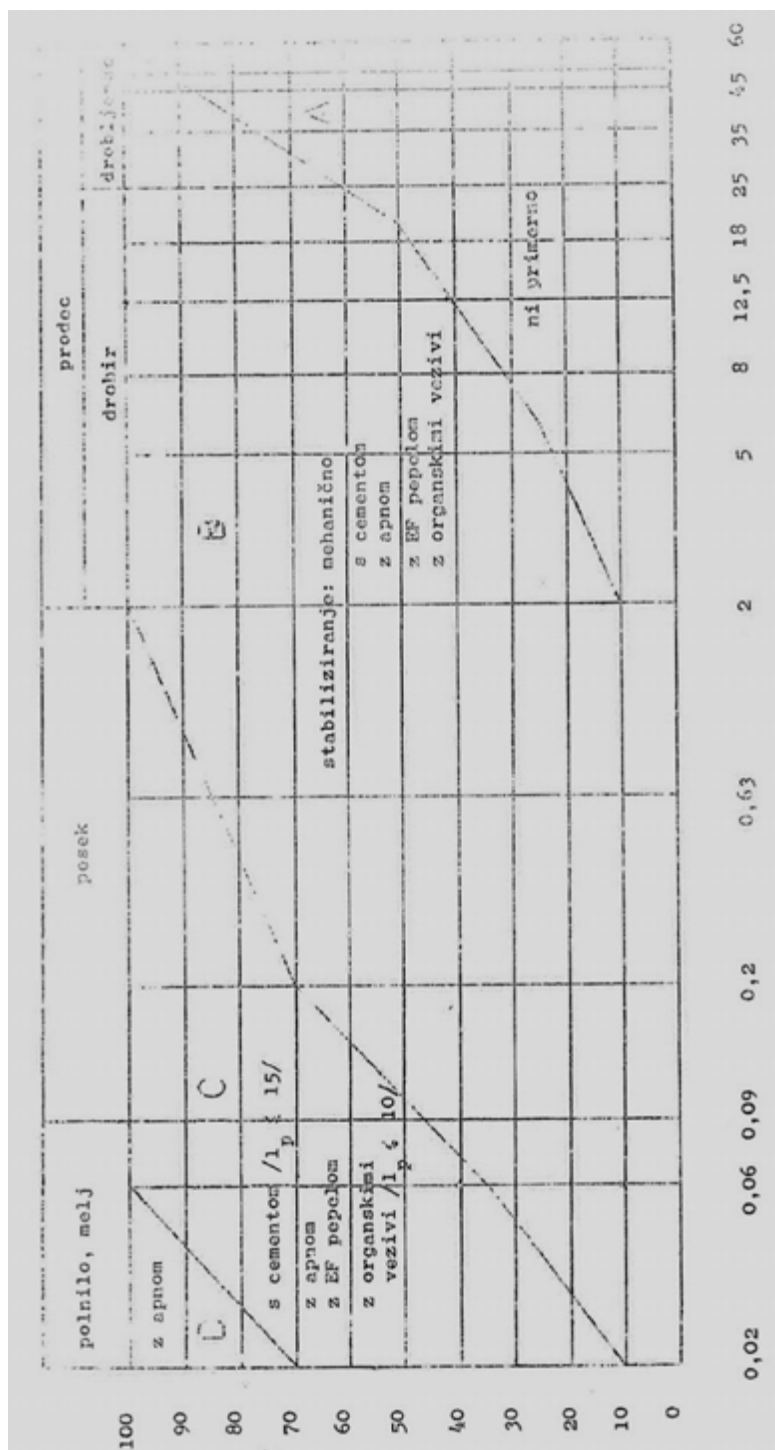
Priloga B: AC klasifikacija zemljin – skupina drobno zrnatih zemljin in šote

Appendix B: AC- soli classification – fine grained group and peat soil

Osnovna razdelitev	Značilnost	Simbol Oznaka	Geotehnični opis	Postopek terenske identifikacije	Kriterij laboratorijske in končne klasifikacije	Dvojne oznake pri klasifikaciji
Drobno zrnate zemljine	Meli in gline, meja zidkosti je manjša od 50 %	ML	Anorganski melj in droben pesek, meljast ali glinast droben pesek ali glinast melj z majhno plastičnostjo	Pri tresenju se razpusti, brez ali malo kohezije	Atterbergove meje plastičnosti	
			Anorganska glina z nizko do srednjo plastičnostjo; peščena, meljasta in pusta glina	Srednje velika kohezija, pri tresenju se ne razpusti	Atterbergove meje plastičnosti	
			Organska glina ali melj, vonj po razpadu org. snovi, sivi, modrikasto sivi odtiski	Značilni sivi, temno sivi in rjavi toni, značilen vonj, majhna kohezija	Atterbergove meje plastičnosti Kolorimetrijska metoda v NaOH Žarilna izguba	
	Meli in gline, meja zidkosti je večja od 50 %	MH	Anorganski melj, sljudnat ali droben diatomejski pesek ali meljasta zemljina, plastičen melj, polžarica	Majhna kohezija, pri tresenju se ne razpusti.	Atterbergove meje plastičnosti	
			Anorganska glina z visoko plastičnostjo, mastna glina (kraška glina)	Visoka kohezija, ni občutljiva na tresenje	Atterbergove meje plastičnosti	
			Organska glina s srednjo do visoko plastičnostjo, organski melj	Značilni sivi, temno sivi in rjavi toni, značilen vonj, majhna kohezija	Atterbergove meje plastičnosti Kolorimetrijska metoda v NaOH Žarilna izguba	
		Šota	Šota in ostale org. zemljine	ni uporaben za gradnjo	Žarilna izguba	
		Pt				

Priloga C: Prikaz območij zrnivosti za različne vrste stabilizacije zemljin v Sloveniji leta 1968 (Brand, 1967
cit. po Žmavc, 1970)

Appendix C: Grading zones for different soil stabilisation techniques in Slovenia during 1968 (Brand, 1967
cit. after Žmavc, 1970)



A: Neprimerno za stabilizacijo zemljin (Unsuitable for any stabilisation method)

B: Primerno za vse metode stabilizacije zemljin (Suitable for all stabilisation methods)

C: Primerno za stabilizacijo s cementom, apnom, pepelom ali organskimi vezivi ter neprimerno za mehanično stabilizacijo (Suitable for stabilisation with cement, lime, ash or organic binders) and unsuitable for mechanical stabilisation

D: Stabilizacija z apnom (Stabilisation with lime)

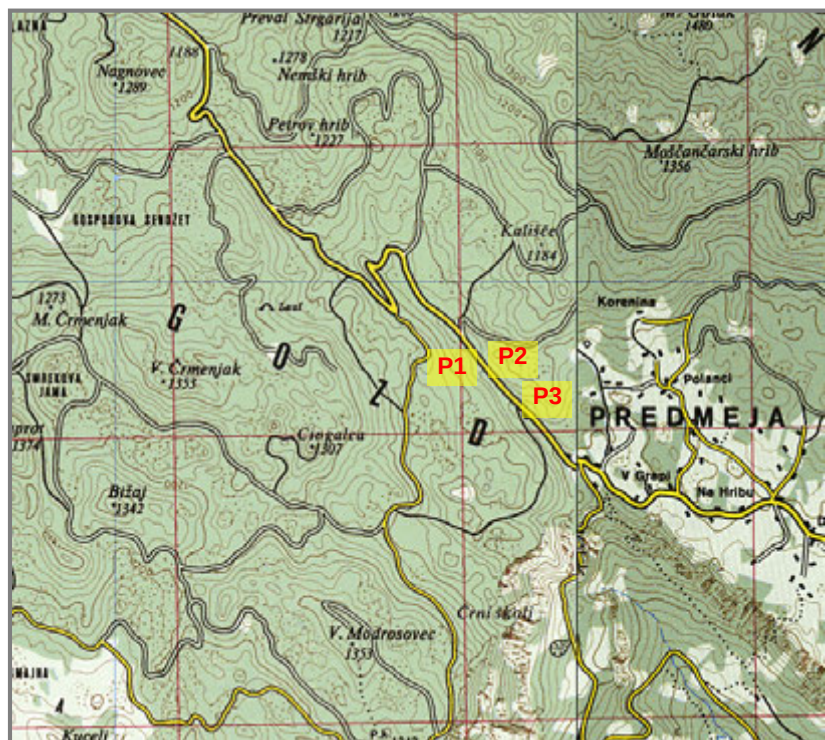
Priloga D: Odvisnosti ostalih kazalnikov nosilnosti za voziščne konstrukcije cest od dinamičnega deformacijskega modula E_{vd} (Žmavc, neobjavljeno)

Appendix D: Dependence of other bearing capacity indicators for road pavements from dynamic deforming module E_{vd} (Žmavc, neobjavljeno)

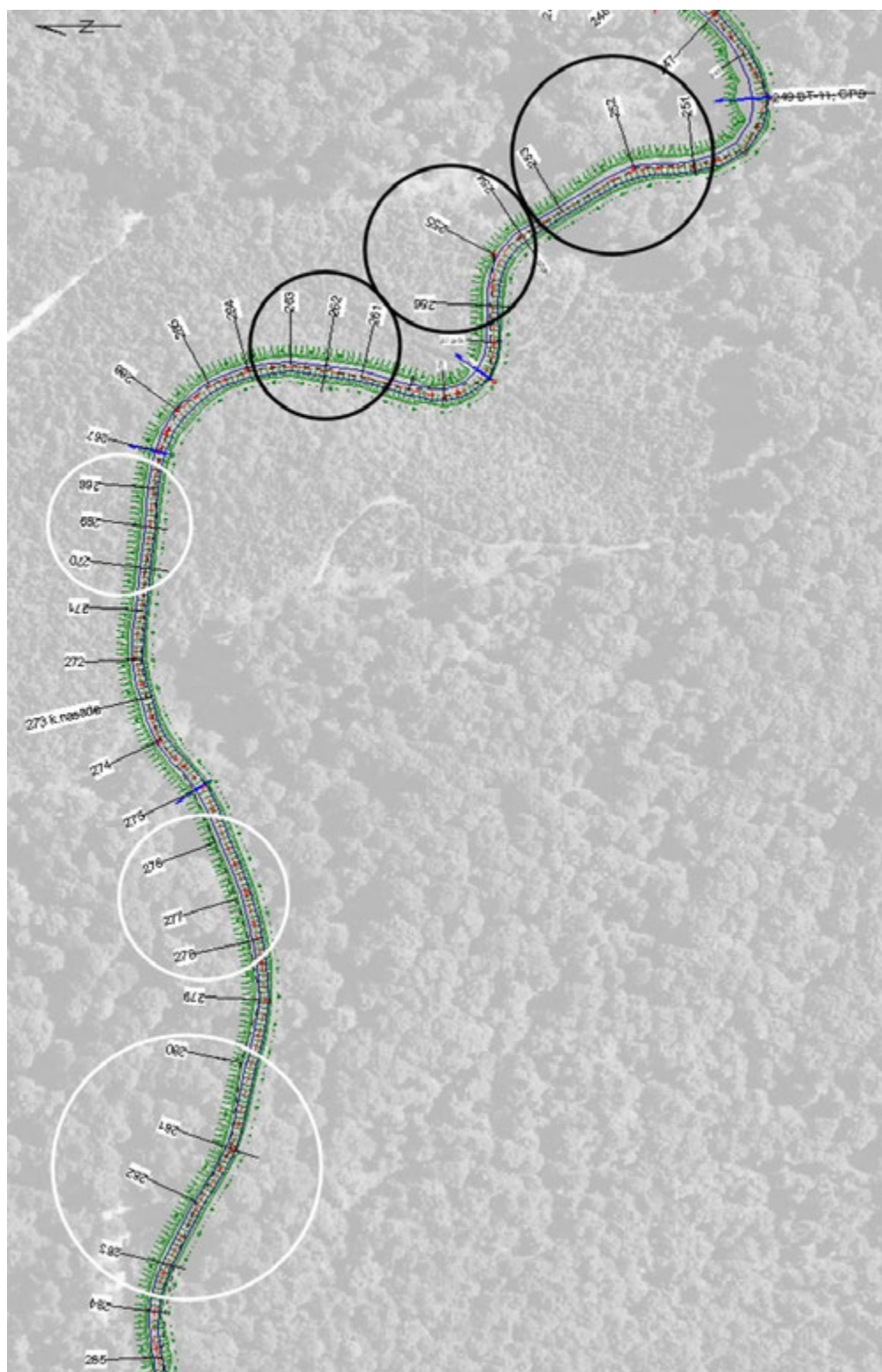
E_{VD}	M_E	E_{V1}	$E_{V2-coherent}$	$E_{V2-uncoherent}$	CBR
MN/m ²	MN/m ²	MN/m ²	MN/m ²	MN/m ²	%
7	2	6	10		2
8	4	9	15		3
10	6	11	18		4
	7	12	20		5
11	8	13	22	42	5
	9	14	0	44	6
	11	15	25		6
	13	16	27	49	7
	15	18	29		8
15	18	19	32	57	9
	19	20	0	59	10
	20	21	34	60	10
	27	25	41		13
22	30	26	44		14
33	34	28		74	15
	39	29		78	16
40	49	34		88	20
	59	39		98	24
	69			108	28
52	78	49		116	33
	81	50		118	34
	88			123	38
	0	56		128	40
61	98	61		134	44
71	108	67		144	50
92				180	
113				210	
143				250	

Priloga E: Podrobnejša lokacija analiziranih vlak na predelu Predmeja (zgoraj) in predelu Rogatec (spodaj)

Appendix E: Detailed location of analysed skid trails on study area Predmeja (above) and on study area Rogatec (below)

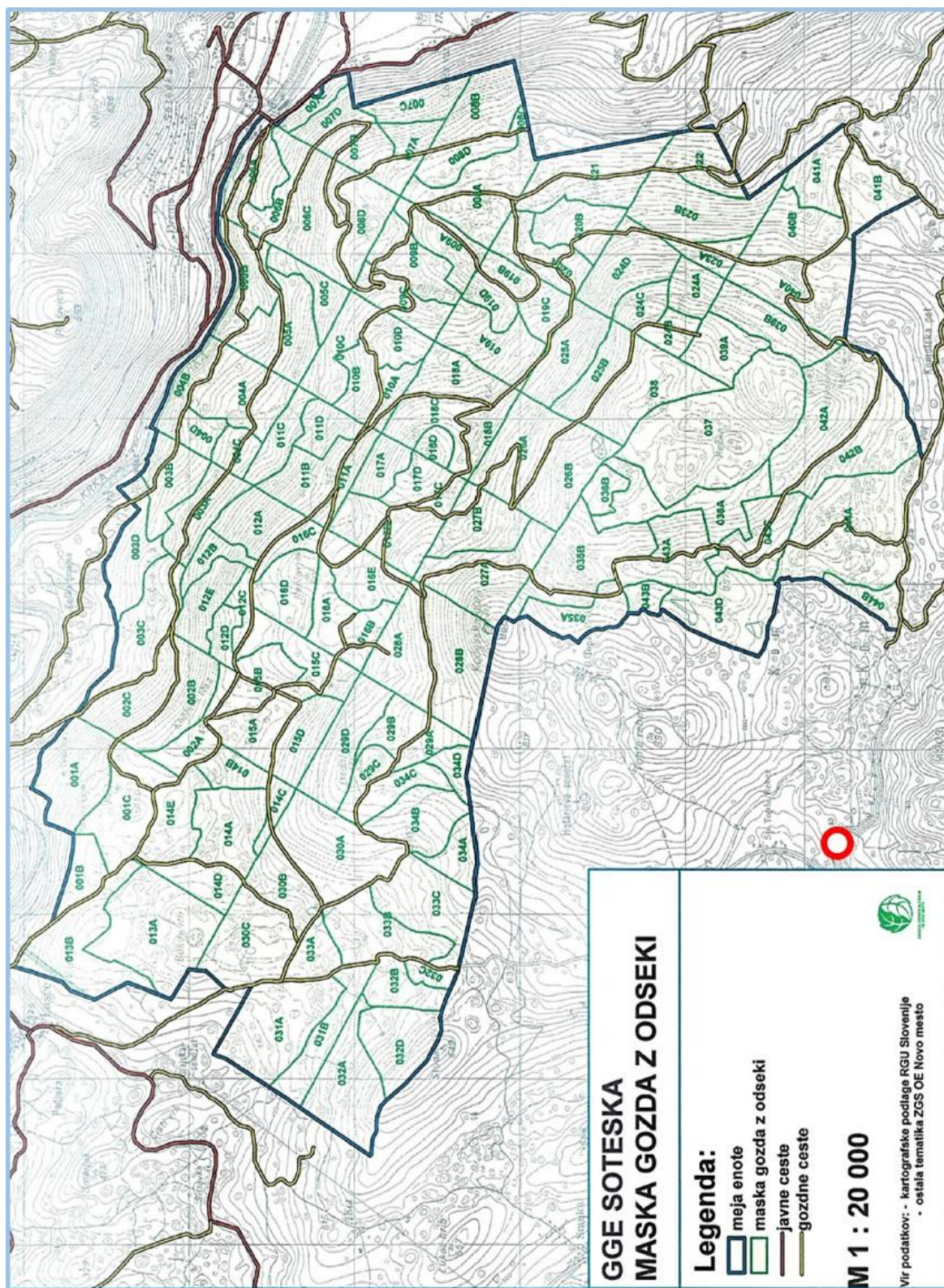


Priloga F: Analizirani odseki na gozdni cesti 'Bajs' (beli krogi – značilni odseki, črni krogi – opazovalno polje)
Appendix F: Analysed segments on forest road 'Bajs' (white circles – typical segments, black circles – observation track)



Priloga H: Karta transportno-gravitacijske enote Soteska – 1.914 ha gozdov (JV Slovenija)

Appendix H: Map of the transport-gravity unit Soteska – 1914 hectares of forests (SE Slovenia)



Priloga I: Povprečne vrednosti faktorjev ekvivalentnosti za reprezentativna vozila, določene na podlagi induktivnih števecv prometa na javnih cestah (TSC 06.511 : 2009)

Appendix I: Average values of the equivalency factors for representative vehicles, determined on the basis of inductive traffic counter on public roads (TSC 06.511 : 2009)

TSC 06.511 : 2009

Razpredelnica 1: Faktorji ekvivalentnosti osnih obremenitev izbranih reprezentativnih motornih vozil v odnosu na nazivno osno obremenitev 100 kN

Obremenitev osi kN	Faktor ekvivalentnosti					
	enojno kolo	enojna os dvojno kolo	široko kolo	enojno kolo	os v zapregi dvojno kolo	široko kolo
4	0,000003	0,000002	0,000002	0,000002	0,000001	0,000002
6	0,000013	0,000009	0,000012	0,000009	0,000006	0,000009
8	0,000041	0,000027	0,000038	0,000029	0,000019	0,000027
10	0,000100	0,000066	0,000092	0,000072	0,000047	0,000066
15	0,00051	0,00033	0,00047	0,00036	0,00024	0,00033
20	0,00160	0,00105	0,00148	0,00114	0,00075	0,00106
25	0,00391	0,00256	0,00360	0,00280	0,00183	0,00258
30	0,00810	0,00531	0,00747	0,00580	0,00380	0,00535
35	0,01501	0,00985	0,01384	0,01074	0,00705	0,00990
40	0,02560	0,01680	0,02361	0,01832	0,01202	0,01690
45	0,04101	0,02690	0,03782	0,02934	0,01925	0,02707
50	0,06250	0,04101	0,05765	0,04473	0,02934	0,04125
55	0,09151	0,06004	0,08440	0,06548	0,04296	0,06040
60	0,12960	0,08503	0,11954	0,09274	0,06085	0,08554
65	0,17851	0,11712	0,16465	0,12774	0,08381	0,11782
70	0,24010	0,15753	0,22146	0,17182	0,11273	0,15848
75	0,31641	0,20759	0,29184	0,22642	0,14855	0,20884
80	0,40960	0,26874	0,37780	0,29311	0,19231	0,27036
82	0,45212	0,29664	0,41702	0,32354	0,21227	0,29842
85	0,52201	0,34249	0,48148	0,37355	0,24508	0,34455
90	0,65610	0,43047	0,60517	0,46951	0,30804	0,43306
95	0,81451	0,53440	0,75127	0,58286	0,38241	0,53761
100	1,00000	0,65610	0,92237	0,71560	0,46951	0,66005
105	1,21551	0,79749	1,12114	0,86982	0,57069	0,80229
110	1,46410	0,96060	1,35044	1,04771	0,68740	0,96637
115	1,74901	1,14752	1,61323	1,25159	0,82117	1,15443
120	2,07360	1,36049	1,91262	1,48387	0,97357	1,36867
125	2,44141	1,60181	2,25188	1,74707	1,14625	1,61144
130	2,85610	1,87389	2,63438	2,04383	1,34095	1,88516
135	3,32151	2,17924	3,06365	2,37687	1,55946	2,19235
140	3,84160	2,52047	3,54337	2,74905	1,80365	2,53564
145	4,42051	2,90029	4,07733	3,16331	2,07545	2,91774
150	5,06250	3,32151	4,66949	3,62273	2,37687	3,34149

Razpredelnica 2: Povprečne vrednosti faktorjev ekvivalentnosti za reprezentativna vozila

Reprezentativno vozilo	Povprečni faktor ekvivalentnosti		
	AC in HC	G1 in G2	R1 in R2
- osebno	0,00003	0,00003	0,00003
- avtobus	1,40	1,15	0,85
- tovorno:			
- lahko	0,005	0,005	0,005
- srednje	0,35 ¹⁾ /0,6 ²⁾	0,25 ¹⁾ /0,5 ²⁾	0,25 ¹⁾ /0,4 ²⁾
- težko	1,70 ¹⁾ /0,7 ²⁾	1,45 ¹⁾ /0,9 ²⁾	1,35 ¹⁾ /1,0 ²⁾
- težko s prikolico	1,60	1,40	1,25

¹⁾ kategorije vozil določene na podlagi izmerjenih medosnih razdalj (WIM)

²⁾ kategorije vozil določene na podlagi induktivnih števecv prometa

Priloga J: Izgled odsekov grajenih vlak na mešani podlagi leta spomladi 2009 in spomladi 2014

Appendix J: Appearance of the constructed skid trail sections on mixed base during spring 2009 and 2014



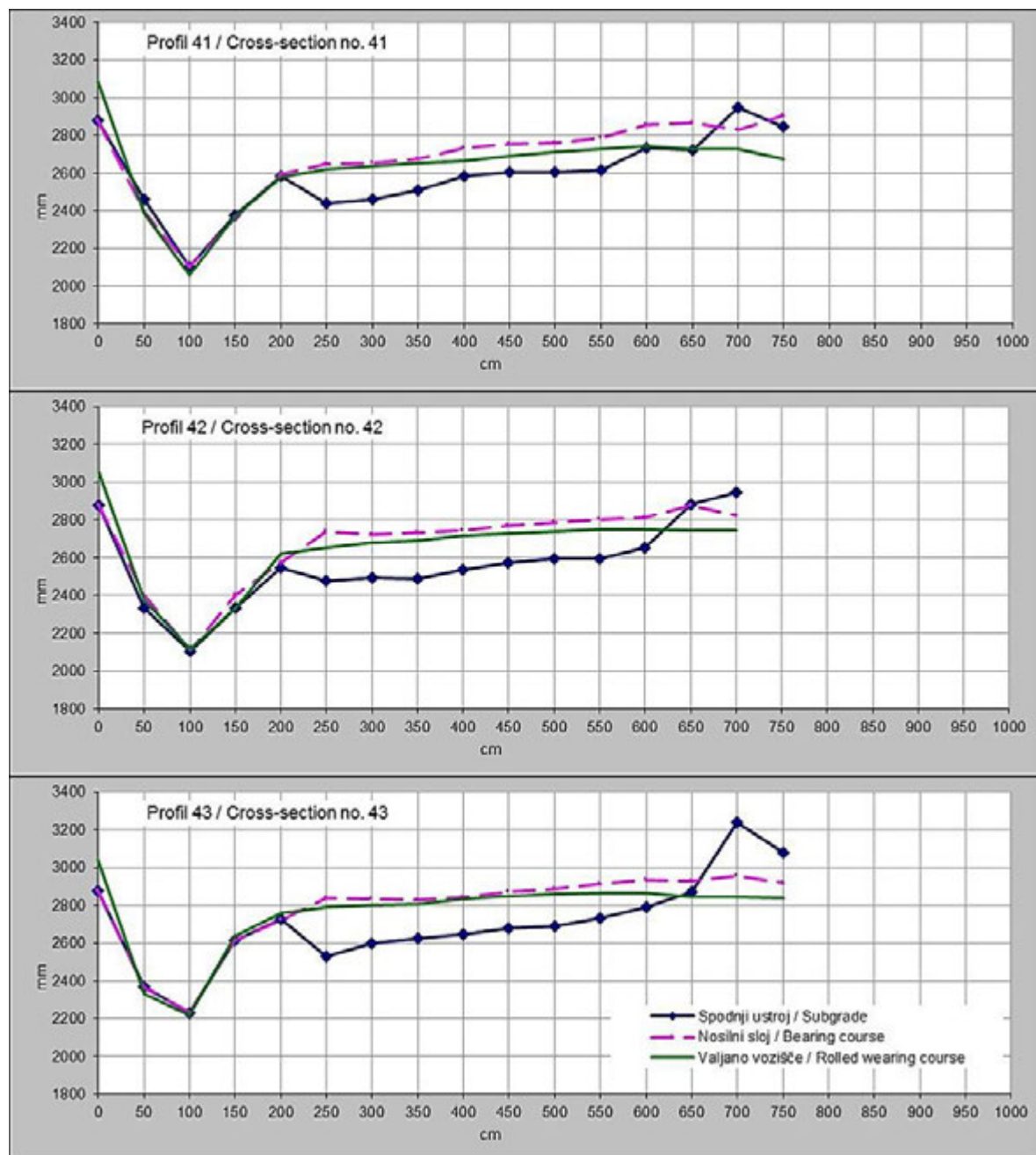
Priloga K: Izgled odsekov grajenih vlak na karbonatni podlagi leta spomladi 2009 in spomladi 2014

Appendix K: Appearance of the constructed skid trail sections on mixed base during spring 2009 and 2014



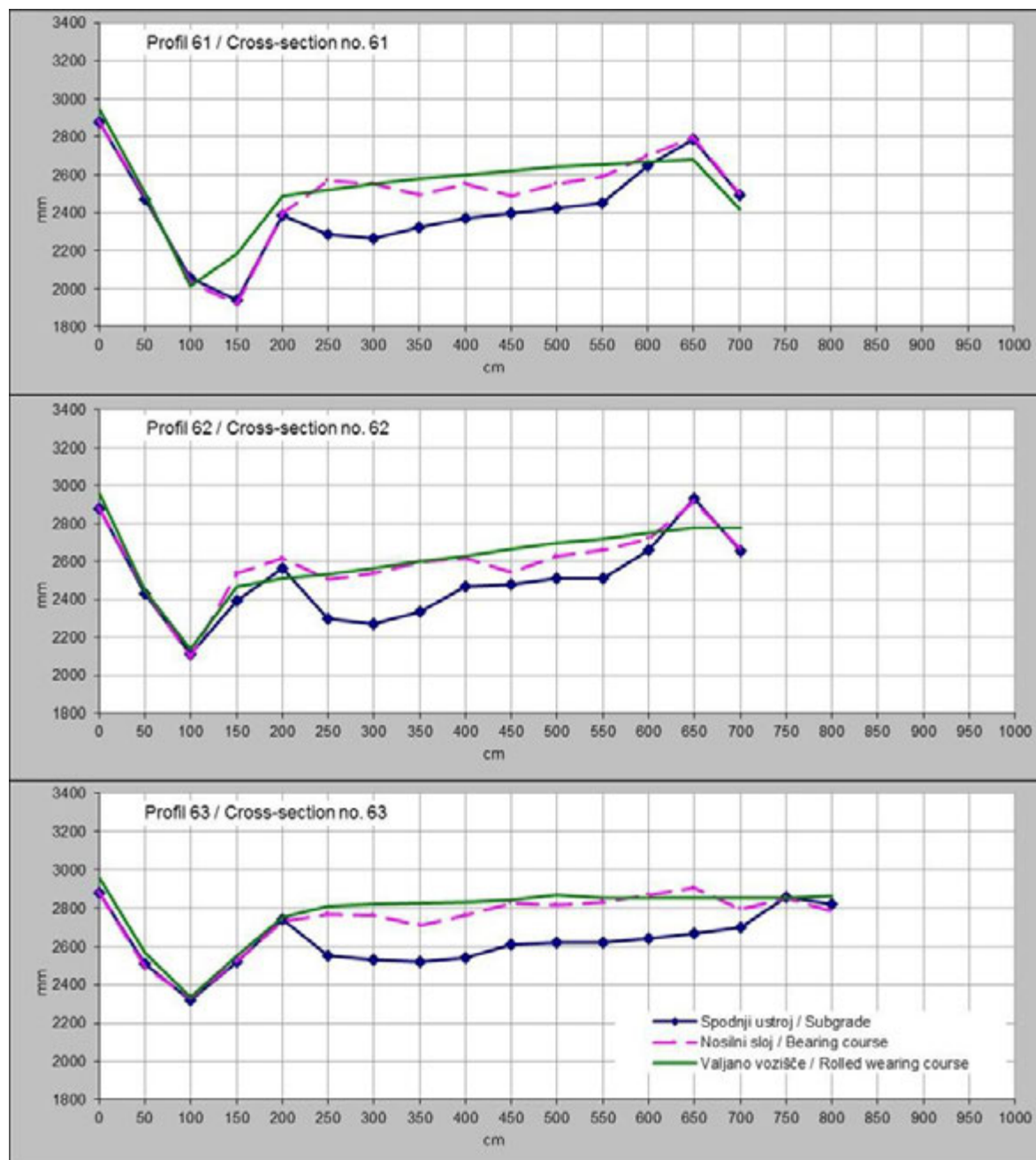
Priloga L: Oblike voziščne konstrukcije na opazovalnem polju »Bajs«: profili 41 – 43

Appendix L: Pavement shapes on observational track »Bajs«: cross-sections 41 – 43



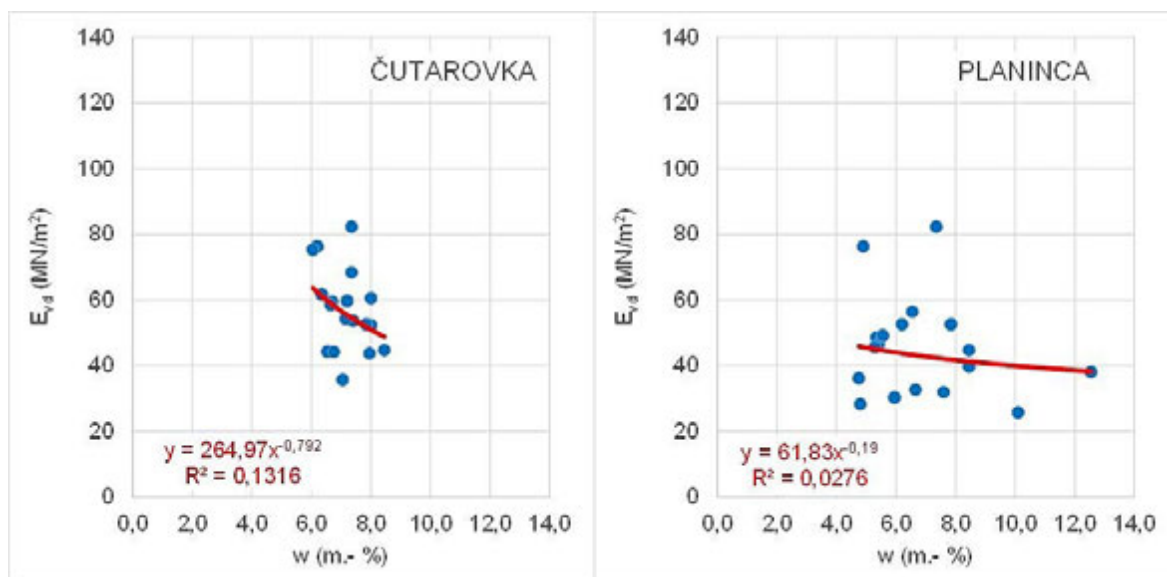
Priloga M: Oblike voziščne konstrukcije na opazovalnem polju »Bajs«: profili 61 – 63

Appendix M: Pavement shapes on observational track »Bajs«: cross-sections 61 – 63



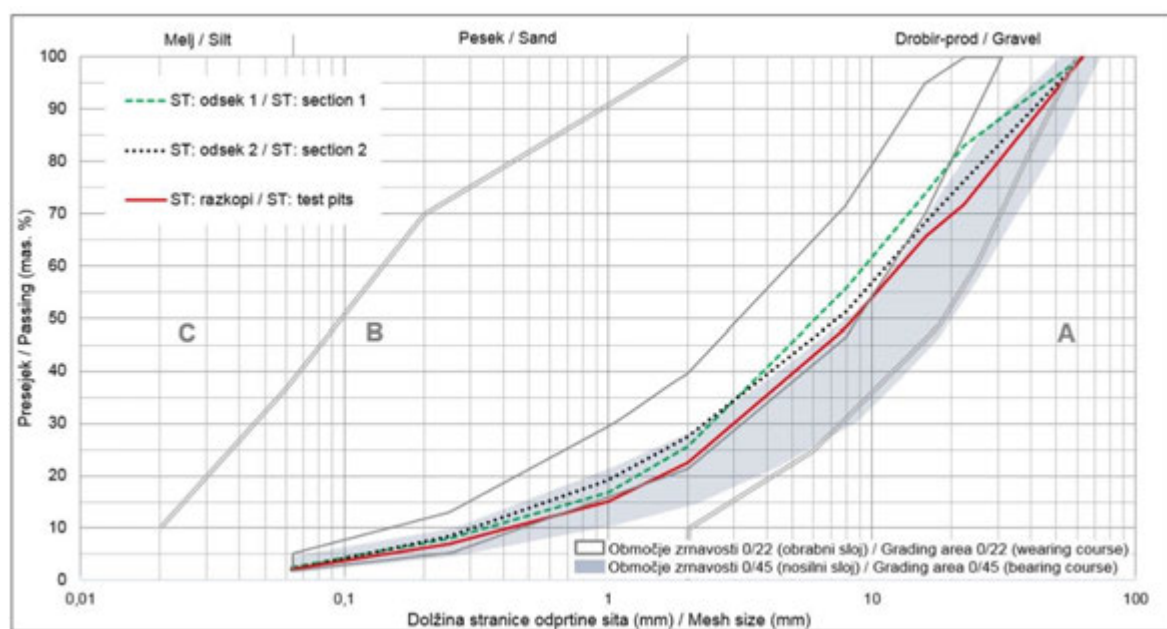
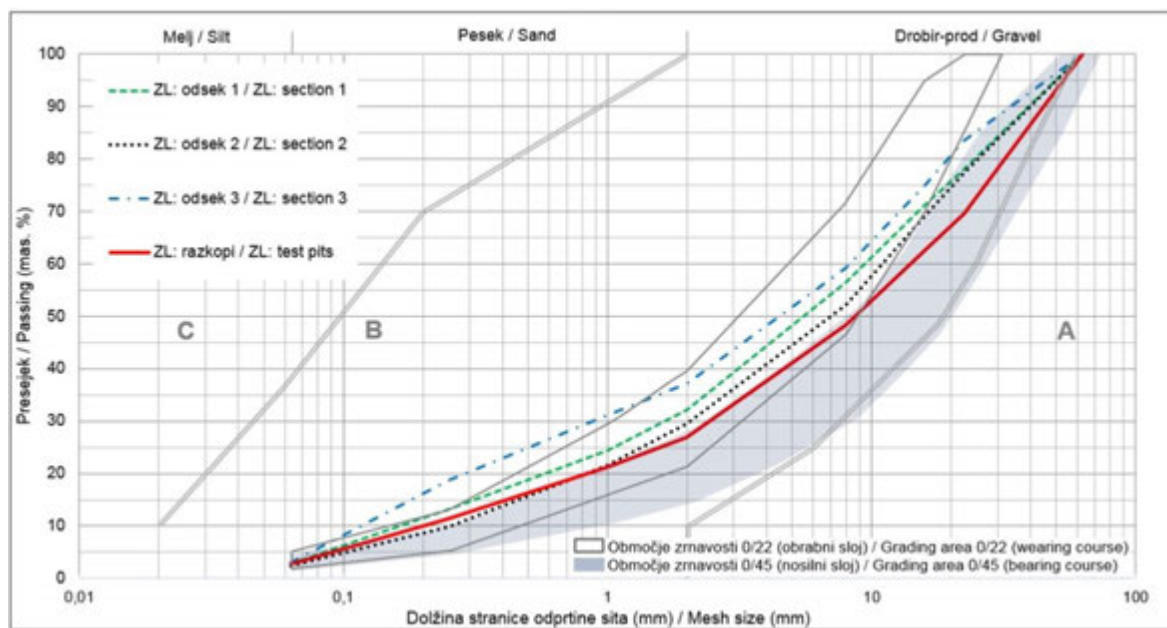
Priloga N: Odvisnost nosilnosti vozišča (povprečje merilnih mest »b« in »c«) od izotopske vsebnosti vlage za novo stransko cesto na karbonatni podlagi (levo) in staro stransko cesto na karbonatni podlagi (desno)

Appendix N: Dependence of carriageway bearing capacity (average of measurement spot »b« and »c«) from isotope moisture content for new secondary road on lime base (left) and old secondary road on lime base (right)

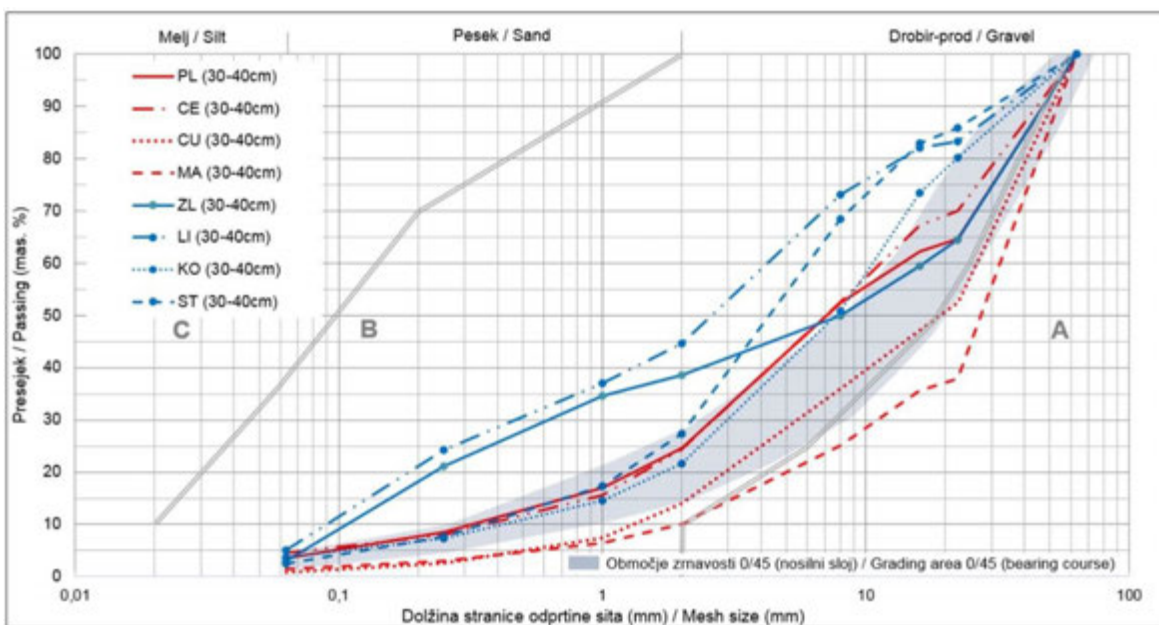


Priloga O: Primerjava zrnivosti odsekov in izkopov na dveh stranskih gozdnih cestah na mešani podlagi
(zgoraj: »Zlaka«, globina 0-10 cm; spodaj: »Strešni«, globina 10-30 cm)

Appendix O: Comparison of gradations between sections and test pits on two secondary forest roads on mixed
base (above: »Zlaka«, depth 0-10 cm; below: »Strešni«, depth 10-30 cm)

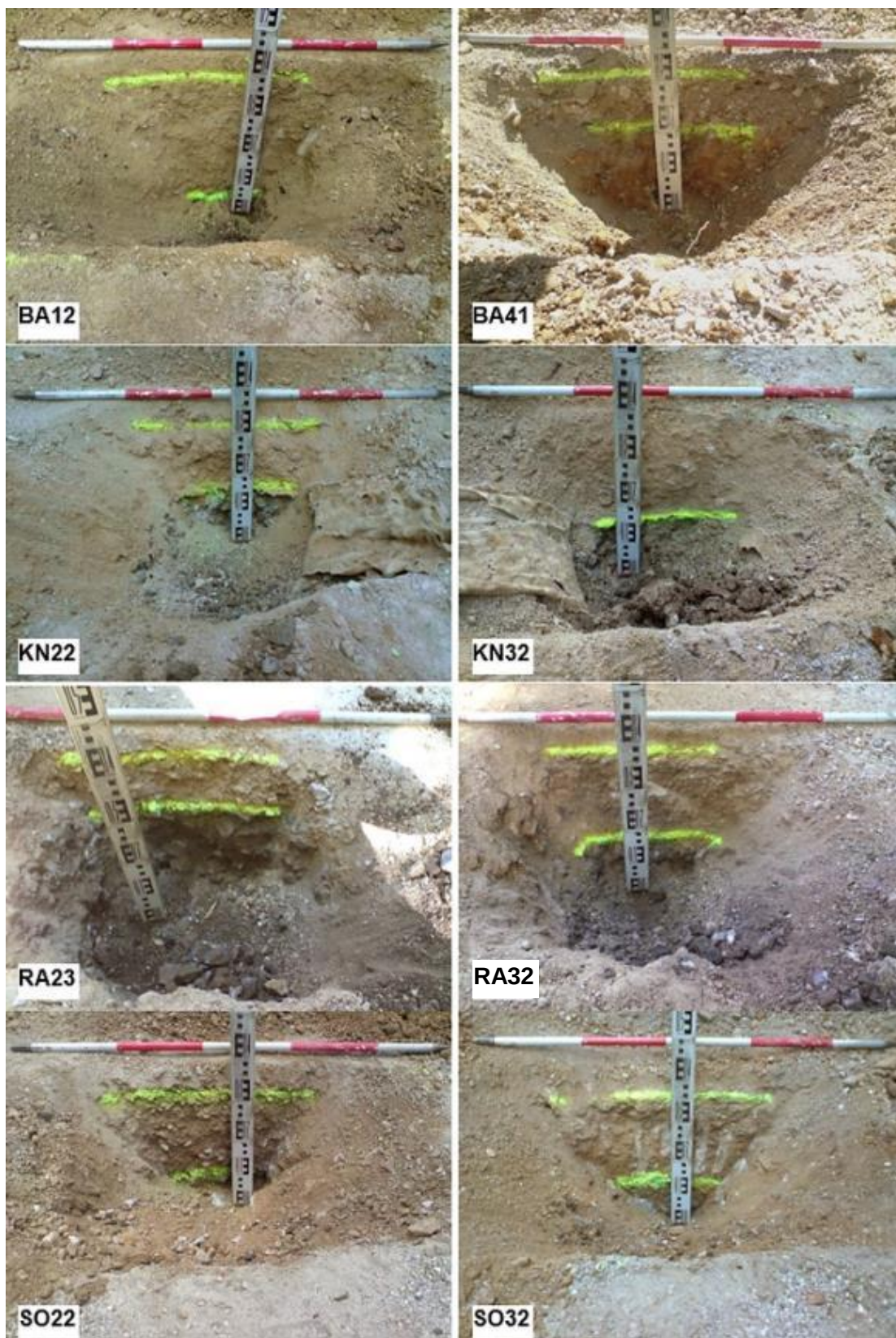


Appendix P: Comparison of test pit average gradations at 35 cm depth for analysed primary (above) and secondary forest roads (below)



Priloga Q: Slike vzorčnih izkopov za ceste »Bajs«, »Knipajz«, »Ravnik« in »Soteska«

Appendix Q: Photos of sample pits for roads »Bajs«, »Knipajz«, »Ravnik« and »Soteska«



Priloga R: Slike vzorčnih izkopov za ceste »Macesnova«, »Čemerje«, »Čutarovka« in »Planinca«

Appendix R: Photos of sample pits for roads Macesnova«, »Čemerje«, »Čutarovka« and »Planinca«



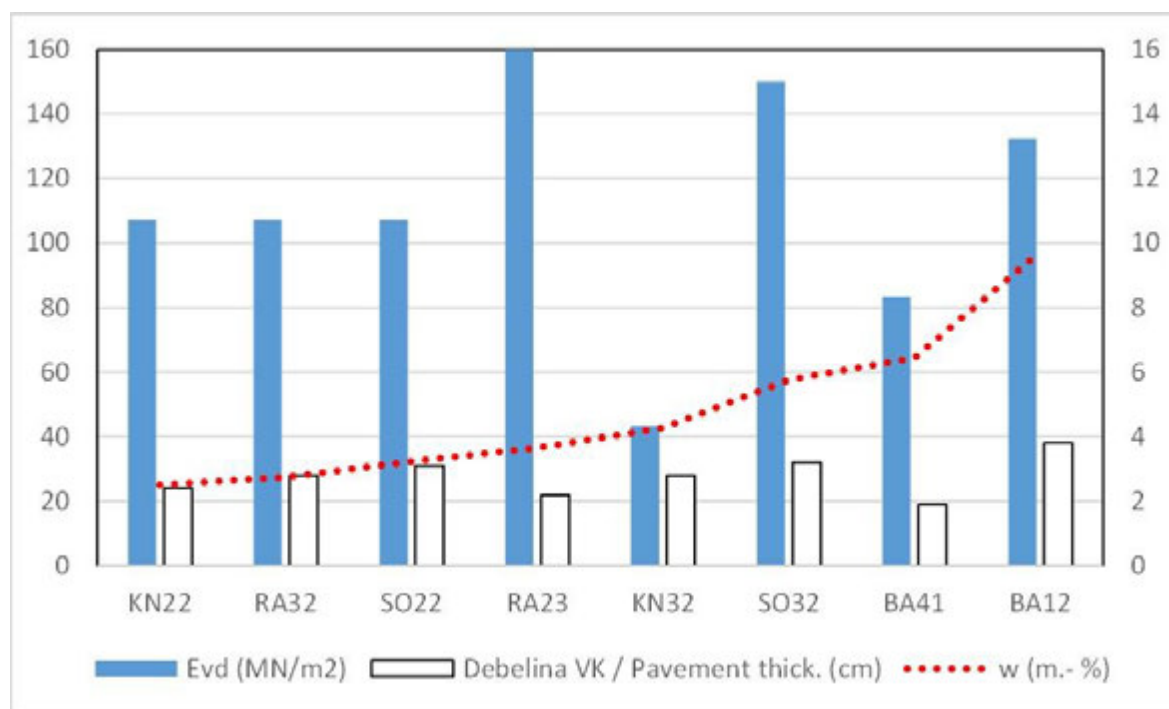
Priloga S: Slike vzorčnih izkopov za ceste »Lipovec«, »Zlaka«, »Strešni« in »Kovkovo«

Appendix S: Photos of sample pits for roads »Lipovec«, »Zlaka«, »Strešni« and »Kovkovo«



Priloga T: Porazdelitev vzorčnih izkopov glavnih cest glede na povprečno vlažnost, nosilnost in debelino voziščne konstrukcije

Appendix T: Arrangement of sample pits form primary roads according average moisture content, bearing capacity and pavement thickness



Priloga U: Odvisnost med globino kolesnice v nasipu in nosilnostjo vozišča za nove stranske ceste na karbonatu (zgoraj) in nove stranske ceste na mešani podlagi (spodaj)

Appendix U: Dependence between wheel rut on embankment and bearing capacity for new secondary roads on lime base (above) and new secondary roads on mixed base (below)

