

3 | 2025



Documenta Archaeologica | Monographiae

Vpliv mehanskih obremenitev na arheološke ostaline v tleh

Tamara Leskovar



UNIVERZA
V LJUBLJANI



Filozofska
fakulteta

Zbirka: Documenta Archaeologica 3

ISSN 2820-5987 tiskana izdaja; ISSN 2820-5995 e-izdaja

Naslov: **Vpliv mehanskih obremenitev na arheološke ostaline v tleh**

Uredniki serije: Matija Črešnar, Andrej Gaspari, Predrag Novaković, Manca Vinazza, Katharina Zanier

Tehnični urednik: Andrej Gaspari

Avtorica: Tamara Leskovar

Recenzenta: Predrag Novaković, Vlatko Bosiljkov

Likovno-grafična zasnova in prelom: Žiga Valetič

Jezikovni pregled: Rok Janežič

Izris načrtov: Avtorica

Fotografije: Jašar Skorupan

Založila: Založba Univerze v Ljubljani

Za založbo: Gregor Majdič, rektor Univerze v Ljubljani

Izdala: Znanstvena založba Filozofske fakultete Univerze v Ljubljani

Za izdajatelja: Mojca Schlamberger Brezar, dekanja Filozofske fakultete Univerze v Ljubljani

Tisk: Birografika BORI d. o. o.

Naklada: 200 izvodov

Izid publikacije so podprli:

Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije,

Raziskovalni in infrastrukturni program Arheologija (P6-0247)

Znanstvena založba Filozofske fakultete Univerze v Ljubljani

Ljubljana, 2025

Prva e-izdaja. Publikacija je v digitalni obliki prosto dostopna na/First e-edition.

Digital copy of the book is available on: <https://e-knjige.ff.uni-lj.si/>

DOI: 10.4312/9789612976583

To delo je ponujeno pod licenco Creative Commons Priznanje avtorstva-Deljenje pod enakimi pogoji

4.0 Mednarodna licenca (izjema so fotografije)./This work is licensed under a Creative Commons

Attribution-ShareAlike 4.0 International License (except photographs).



Kataložna zapisa o publikaciji (CIP) pripravili
v Narodni in univerzitetni knjižnici v Ljubljani

Tiskana knjiga

COBISS.SI-ID= 249203459

ISBN 978-961-297-661-3

E-knjiga

COBISS.SI-ID 249155843

ISBN 978-961-297-658-3 (PDF)

Kazalo

	Povzetek / Abstract	17
1	Ohranjanje arheoloških ostalin v tleh	19
2	Mehanika tal	23
2.1	Fizikalne lastnosti zemljin	23
2.2	Napetosti v tleh	25
2.3	Dodatne napetosti	26
3	Mehanika trdnih teles	29
3.1	Napetosti	29
3.2	Deformacije	31
3.3	Zveza med napetostmi in deformacijami	33
4	Preiskave	39
4.1	Dilatometrsko preiskava	39
4.2	Porušne preiskave	40
4.3	Uporovni merilni lističi	41
5	Izvedba porušnih preiskav	45
5.1	Postavitev preizkuševališča	45
5.2	Spremljajoče porušne preiskave	56
5.2.1	Natezni preizkusi	57
5.2.2	Upogibni preizkusi	58
5.3	Analiza preizkušancev in podatkov	60
6	Rezultati	69
6.1	Spremembe vlažnosti	69
6.2	Zgoščevanje zemljin	70
6.3	Spremembe modula stisljivosti tal	72
6.4	Spremembe napetosti v zemljini	73
6.5	Premiki preizkušancev	74
6.6	Poškodbe preizkušancev	76
6.7	Rezultati merilnih lističev	78

7	Interpretacija rezultatov	99
8	Mehanske obremenitve tal pri varovanju <i>in situ</i>	105
9	Zaključki	109
10	Viri in literatura	113
11	Priloge	117
A	Priloga – preizkus 1	118
B	Priloga – preizkus 2	120
C	Priloga – preizkus 3	122
D	Priloga – preizkus 4	124
E	Priloga – preizkus 5	128
F	Priloga – preizkus 6	134
G	Priloga – preizkus 7	139
H	Priloga – preizkus 8	144
I	Priloga – preizkus 9	149
J	Priloga – preizkus 10	155
K	Priloga – povzetek metodologije porušnih preiskav	157
L	Priloga – premiki in poškodbe preizkušancev v preizkusih 4–9	158
M	Priloga – primerjava rezultatov	161
N	Priloga – geotehnični podatki	166
	Zahvale	168

Kazali slik in preglednic

Kazalo slik

Slika 2.1: Primer porazdelitvene krivulje glede na velikost zrn in njihovo zastopanost.	24
Slika 2.2: Odnos med vrednostjo χ in nasičenostjo zemljine (Bishop et al., 1960; Das in Sobhan, 2013, 924, Slika 9.20).	26
Slika 2.3: Shematski prikaz točkovnega obremenjevanja (Das in Sobhan 2013, 312, Slika 10.7).	27
Slika 2.4: Shematski prikaz obremenjevanja pravokotnega območja (Das in Sobhan 2013, 336, Slika 10.25).	28
Slika 3.1: Graf napetosti in deformacij krhkega in žilavega materiala.	29
Slika 3.2: Shematski prikaz delovanja sile F v smeri osi x na prečni prerez A.	30
Slika 3.3: Shematski prikaz delovanja sile F v smeri osi x na prečni prerez B.	31
Slika 3.4: Shematski prikaz nateznih deformacij.	31
Slika 3.5: Shematski prikaz sočasnega nastanka nateznih in tlačnih deformacij.	32
Slika 3.6: Shematski prikaz deformacij v dveh dimenzijah telesa.	33
Slika 3.7: Shematski prikaz strižnih deformacij.	33
Slika 3.8: Shematski prikaz delovanja napetosti na obravnavani delček telesa.	34
Slika 3.9: Graf napetosti in deformacij v primeru linearnih elastičnih deformacij.	34
Slika 3.10: Graf napetosti in deformacij v primeru nelinearnih elastičnih deformacij.	35
Slika 3.11: Graf napetosti in deformacij v primeru elastično plastičnih deformacij.	35
Slika 3.12: Graf napetosti in deformacij v primeru porušitve materiala.	36
Slika 3.13: Graf napetosti in deformacij na osi x	36
Slika 3.14: Osne obremenitve v smeri x , y in z (prirejeno po Špacapan 2008, 89, Slika 7).	37
Slika 3.15: Shematski prikaz definicije Poissonovega količnika pri enoosni obremenitvi (prirejeno po Špacapan 2008, 87, Slika 5).	37
Slika 3.16: Shematski prikaz prostorskih obremenitev (prirejeno po Špacapan 2008, 89, Slika 7).	38
Slika 4.1: Shematski prikaz dilatometriškega preizkusa (Gaberc et al. 2004, 166, Slika 1).	39
Slika 4.2: Tipično obnašanje preizkušanca ob nateznem preizkusu.	41
Slika 4.3: Shematski prikaz tritočkovnega upogibnega preizkusa.	41
Slika 4.4: Shematski prikaz enojnega uporovnega merilnega lističa.	42
Slika 4.5: Shematski prikaz trojnega merilnega lističa.	43
Slika 5.1: Obremenilna kvadratna plošča, prilagojena za namestitev na servohidravlični bat. .	46
Slika 5.2: Celica, zapolnjena s prodom (levo) ter prodom in meljem (desno).	46

Slika 5.3: Nameščanje merilcev v plast melja.	47
Slika 5.4: Namestitev zaščitnega sloja iz geotekstila in drobljenega kamenja.	47
Slika 5.5: Keramični lonček (KE-LO) in keramična skleda (KE-SK).	48
Slika 5.6: Pečnica (KE-PE) in tegula (KE-TE).	48
Slika 5.7: Stegnenica (KO-ST)	48
Slika 5.8: Lopatica (KO-LO).	48
Slika 5.9: Lobanja (KO-LO).	48
Slika 5.10: Arheološka cevasta kost (KO-GO).	48
Slika 5.11: Kos brona (BR-PR).	49
Slika 5.12: Del kose iz kovanega železa (ZE-KO).	49
Slika 5.13: Kos tečaja iz kovanega železa (ZE-TE).	49
Slika 5.14: Visok steklen kozarec (ST-VK).	49
Slika 5.15: Nizek steklen kozarec (ST-KO).	49
Slika 5.16: Steklена skodelica (ST-SK).	49
Slika 5.17: Kos lesenega kola (LE-KO) iz arheološkega konteksta.	50
Slika 5.18: Kos lesene deske (LE-DE) iz arheološkega konteksta.	50
Slika 5.19: Shematski prikaz postavitve preizkuševališča.	51
Slika 5.20: Namestitev lesenih preizkušancev v melj.	51
Slika 5.21: Namestitev preizkušancev v prod (levo) in melj (desno).	52
Slika 5.22: Namestitev merilcev vlažnosti in temperature v melj.	52
Slika 5.23: Servohidravlični bat laboratorija KPL.	53
Slika 5.24: Napetosti v zemljini ob različnih obremenitvah površine (prirejeno po Mathewson, Gonzalez in Eblen 1992, 80, Slika 28).	54
Slika 5.25: Vrh plasti melja po obremenjevanju, zaščitni sloj in geotekstil sta že odstranjena.	55
Slika 5.26: Odtisi že odstranjenih vodoravno nameščenih lesenih preizkušancev.	55
Slika 5.27: Izkopavanje preizkušancev v melju.	55
Slika 5.28: Izkopavanje preizkušancev v produ.	55
Slika 5.29: Postavitev in obremenjevanje preizkuševališča v preizkusu 10.	56
Slika 5.30: Bronasti (zgoraj) in železni (spodaj) preizkušanci za spremljajoče porušne preiskave.	57
Slika 5.31: Izvedba nateznega preizkusa bronastega preizkušanca.	57
Slika 5.32: Graf nateznih napetosti in nateznih deformacij bronastih preizkušancev.	58
Slika 5.33: Graf nateznih napetosti in nateznih deformacij železnih preizkušancev.	58
Slika 5.34: Izmera površine koščenega preizkušanca.	59
Slika 5.35: Izvedba tritočkovnega upogibnega preizkusa na koščenem preizkušancu (stegnenici).	59
Slika 5.36: Graf upogibnih napetosti in nateznih deformacij keramičnega preizkušanca.	59
Slika 5.37: Graf upogibnih napetosti in nateznih deformacij koščenih preizkušancev.	59
Slika 5.38: Graf napetosti in deformacij pri nateznem preizkusu kovinskih materialov z označenim območjem linearnosti.	61
Slika 5.39: Graf deformacij v odvisnosti od vsiljene sile z določenimi silo porušitve (F_p), silo pri $1/3$ (F_1) in $2/3$ (F_2) porušitve keramičnega preizkušanca.	61
Slika 5.40: Poenostavitev prečnega prereza kosti v elipso.	61

Slika 5.41: Graf napetosti in deformacij kosti z označenim območjem linearnosti.	62
Slika 5.42: Graf deformacij v odvisnosti od vsiljene sile z določeno mejo linearnosti za kost. .	62
Slika 5.43: Primer izrisa smeri minimalnih in maksimalnih glavnih deformacij na keramični skodelici.	63
Slika 5.44: Prikaz grafa nateznih (+) in tlačnih (-) napetosti (σ) in deformacij (ϵ).	64
Slika 5.45: Preskoki na grafu napetosti in deformacij preizkušanca (σ - ϵ) – odraz stopenjskega obremenjevanja.	64
Slika 5.46: Preskoki na grafu deformacij preizkušanca v odvisnosti od obremenjevanja površine (σ_{pov} - ϵ).	64
Slika 5.47: Primer ostrega preskoka iz tlačnih v natezne deformacije preizkušanca.	65
Slika 5.48: Primer tlačnih maksimalnih napetosti z nateznimi maksimalnimi deformacijami preizkušanca.	65
Slika 5.49: Primer sunkovite rasti deformacij brez rasti napetosti na grafu deformacij preizkušanca v odvisnosti od obremenjevanja površine (σ_{pov} - ϵ).	65
Slika 5.50: Primer sunkovite rasti deformacij brez dviga napetosti na grafu napetosti in deformacij preizkušanca (σ - ϵ).	65
Slika 6.1: Graf sprememb vlažnosti med obremenjevanjem v preizkusih (P) 2–9.	70
Slika 6.2: Povprečno zgoščevanje proda in melja v preizkusih (P) 1–3.	70
Slika 6.3: Povprečno zgoščevanje proda in melja v preizkusih (P) 4–9.	71
Slika 6.4: Modul stisljivosti (M) pred (modra) in po (oranžna) obremenjevanju v preizkusih (P) 1–3.	72
Slika 6.5: Modul stisljivosti (M) na različnih globinah plasti melja v preizkusih (P) 4–9 pred (modra) in po (oranžna) obremenjevanju.	73
Slika 6.6: Spremembe napetosti ($\Delta\sigma$) med obremenjevanjem na opazovanih globinah v melju (rjava) in produ (oranžna).	73
Slika 6.7: Premiki navpično (N) in vodoravno (V) nameščenih preizkušancev v preizkusih (P) 1–3.	74
Slika 6.8: Povprečni premiki preizkušancev v produ in melju preizkusov (P) 4–9.	75
Slika 6.9: Poškodbe navpično (N) in vodoravno (V) nameščenih preizkušancev v preizkusih (P) 1–3.	76
Slika 6.10: Poškodbe preizkušancev v produ in melju preizkusov (P) 4–9.	77
Slika 6.11: Poškodbe preizkušancev glede na material v preizkusih 4–9.	77
Slika 6.12: Stopnje poškodb keramičnih, steklenih in koščenih preizkušancev v preizkusih 4–9.	78
Slika 6.13: Največje napetosti (σ) železnih preizkušancev v produ (P) in melju (M) preizkusov 4–9 med obremenjevanjem (rdeča) in razbremenjevanjem (zelena).	79
Slika 6.14: Največje deformacije (ϵ) železnih preizkušancev v produ (P) in melju (M) preizkusov 4–9 med obremenjevanjem (rdeča) in razbremenjevanjem (zelena).	79
Slika 6.15: Ostanek deformacij (ϵ) v železnih preizkušancih po koncu razbremenjevanja v produ (P) in melju (M) preizkusov 4–9.	80
Slika 6.16: Največje napetosti (σ) bronastih preizkušancev v produ (P) in melju (M) med obremenjevanjem (rdeča) in razbremenjevanjem (zelena) v preizkusih 4–9.	81

Slika 6.17: Največje deformacije (ϵ) v bronastih preizkušancih v produ (P) in melju (M) med obremenjevanjem (rdeča) in razbremenjevanjem (zelena) v preizkusih 4–9.	81
Slika 6.18: Ostanek deformacij v bronastih preizkušancih po koncu razbremenjevanja v produ (P) in melju (M) preizkusov 4–9.	82
Slika 6.19: Največje minimalne (min) in maksimalne (max) napetosti (σ) stegnenic v produ (P) in melju (M) preizkusov 4–9 med obremenjevanjem (rdeča) in razbremenjevanjem (zelena).	83
Slika 6.20: Največje minimalne (min) in maksimalne (max) deformacije (ϵ) stegnenic v produ (P) in melju (M) preizkusov 4–9 med obremenjevanjem (rdeča) in razbremenjevanjem (zelena).	83
Slika 6.21: Primerjava grafov napetosti in deformacij (σ - ϵ) stegnenic v produ v preizkusih (P) 4 in 7 med obremenjevanjem (polna črta) in razbremenjevanjem (R; prekinjena črta).	84
Slika 6.22: Primerjava grafov napetosti in deformacij (σ - ϵ) stegnenic v melju v preizkusih (P) 4 in 7 med obremenjevanjem (polna črta) in razbremenjevanjem (R; prekinjena črta).	84
Slika 6.23: Največje minimalne (min) in maksimalne (max) napetosti (σ) lobanj v produ (P) in melju (M) preizkusov 4–9 med obremenjevanjem (rdeča) in razbremenjevanjem (zelena).	85
Slika 6.24: Največje minimalne (min) in maksimalne (max) deformacije (ϵ) lobanj v produ (P) in melju (M) preizkusov 4–9 med obremenjevanjem (rdeča) in razbremenjevanjem (zelena).	85
Slika 6.25: Ostanek minimalnih (min) in maksimalnih (max) deformacij (ϵ) v lobanjah v produ (P) in melju (M) po koncu razbremenjevanja v preizkusih 5, 6 in 9.	86
Slika 6.26: Primerjava grafov napetosti in deformacij (σ - ϵ) lobanj v produ v preizkusih (P) 5, 6 in 9 med obremenjevanjem (polna črta) in razbremenjevanjem (R; prekinjena črta).	87
Slika 6.27: Primerjava grafov napetosti in deformacij (σ - ϵ) lobanj v melju v preizkusih (P) 5, 6 in 9 med obremenjevanjem (polna črta) in razbremenjevanjem (R; prekinjena črta).	87
Slika 6.28: Največje minimalne (min) in maksimalne (max) napetosti (σ) lopatic v produ (P) in melju (M) preizkusov 4–9 med obremenjevanjem (rdeča) in razbremenjevanjem (zelena).	88
Slika 6.29: Največje minimalne (min) in maksimalne (max) deformacije (ϵ) lopatic v produ (P) in melju (M) preizkusov 4–9 med obremenjevanjem (rdeča) in razbremenjevanjem (zelena).	88
Slika 6.30: Ostanek minimalnih (min) in maksimalnih (max) deformacij v lopaticah v produ (P) in melju (M) preizkusov 5–9 po koncu razbremenjevanja.	89
Slika 6.31: Primerjava grafov napetosti in deformacij (σ - ϵ) lopatic v produ v preizkusih (P) 5, 7 in 9 med obremenjevanjem (polna črta) in razbremenjevanjem (R; prekinjena črta).	90
Slika 6.32: Primerjava grafov napetosti in deformacij (σ - ϵ) lopatic v melju v preizkusih (P) 5, 7 in 9 med obremenjevanjem (polna črta) in razbremenjevanjem (R; prekinjena črta).	90
Slika 6.33: Primerjava grafov napetosti in deformacij (σ - ϵ) lopatic v produ v preizkusih (P) 6 in 8 med obremenjevanjem (polna črta) in razbremenjevanjem (R; prekinjena črta).	91
Slika 6.34: Primerjava grafov napetosti in deformacij (σ - ϵ) lopatic v melju v preizkusih (P) 6 in 8 med obremenjevanjem (polna črta) in razbremenjevanjem (R; prekinjena črta).	91
Slika 6.35: Največje minimalne (min) in maksimalne (max) napetosti (σ) keramike v produ (P) in melju (M) preizkusov 4–9 med obremenjevanjem (rdeča) in razbremenjevanjem (zelena).	92

Slika 6.36: Največje minimalne (min) in maksimalne (max) deformacije (ϵ) lopatic v produ (P) in melju (M) preizkusov 4–9 med obremenjevanjem (rdeča) in razbremenjevanjem (zelena).	92
Slika 6.37: Ostanek minimalnih (min) in maksimalnih (max) deformacij keramičnih preizkušancev v produ (P) in melju (M) preizkusov 5–9 po koncu razbremenjevanja.	93
Slika 6.38: Primerjava grafov napetosti in deformacij (σ - ϵ) keramike v produ v preizkusih (P) 5, 7 in 9 med obremenjevanjem (polna črta) in razbremenjevanjem (R; prekinjena črta).	94
Slika 6.39: Primerjava grafov napetosti in deformacij (σ - ϵ) keramike v melju v preizkusih (P) 5, 7 in 9 med obremenjevanjem (polna črta) in razbremenjevanjem (R; prekinjena črta).	94
Slika 6.40: Primerjava grafov napetosti in deformacij (σ - ϵ) keramike v produ v preizkusih (P) 6 in 8 med obremenjevanjem (polna črta) in razbremenjevanjem (R; prekinjena črta).	95
Slika 6.41: Primerjava grafov napetosti in deformacij (σ - ϵ) keramike v melju v preizkusih (P) 6 in 8 med obremenjevanjem (polna črta) in razbremenjevanjem (R; prekinjena črta).	95
Slika 6.42: Največje minimalne (min) in maksimalne (max) napetosti (σ) stekla v produ (P) in melju (M) preizkusov 4–9 med obremenjevanjem (rdeča) in razbremenjevanjem (zelena).	96
Slika 6.43: Največje minimalne (min) in maksimalne (max) deformacije (ϵ) stekla v produ (P) in melju (M) preizkusov 4–9 med obremenjevanjem (rdeča) in razbremenjevanjem (zelena).	96
Slika 6.44: Ostanek minimalnih (min) in maksimalnih (max) deformacij steklenih preizkušancev v produ (P) in melju (M) preizkusov 5–9 po koncu razbremenjevanja.	97
Slika 7.1: Napetosti (modra) in deformacije (rdeča) sodobnega (SOD), rimskega (RIM) in prazgodovinskega (PRZG) keramičnega preizkušanca ob nastanku prvih razpok v preizkusu 10.	102
Slika 7.2: Primerjava grafov napetosti in deformacij (σ - ϵ) sodobnega (SOD), rimskega (RIM) in prazgodovinskega (PRZG) keramičnega preizkušanca v preizkusu 10.	103
Slika A.1: Shematski prikaz premikov preizkušancev v preizkusu 1.	119
Slika B.1: Shematski prikaz premikov preizkušancev v preizkusu 2.	121
Slika C.1: Shematski prikaz premikov preizkušancev v preizkusu 3.	123
Slika D.1: Shematski prikaz premikov in poškodb preizkušancev v preizkusu 4.	125
Slika E.1: Shematski prikaz premikov in poškodb preizkušancev v preizkusu 5.	129
Slika F.1: Shematski prikaz premikov in poškodb preizkušancev v preizkusu 6.	135
Slika G.1: Shematski prikaz premikov in poškodb preizkušancev v preizkusu 7.	140
Slika H.1: Shematski prikaz premikov in poškodb preizkušancev v preizkusu 8.	145
Slika I.1: Shematski prikaz premikov in poškodb preizkušancev v preizkusu 9.	150

Kazalo preglednic

Preglednica 2.1: Razvrstitev zemljin glede na velikost zrn.	23
Preglednica 2.2: Konsistenčno stanje zemljin glede na indeks konsistence.	24
Preglednica 2.3: Konsistenčno stanje zemljin glede na indeks konsistence.	25
Preglednica 5.1: Povzetek glavnih značilnosti posameznih preizkusov.	55
Preglednica 5.2: Povzetek lastnosti kovinskih preizkušancev.	57
Preglednica 5.3: Moduli elastičnosti (E) kovinskih preizkušancev.	58
Preglednica 5.4: Povzetek lastnosti koščenih preizkušancev.	59
Preglednica 5.5: Moduli elastičnosti (E) keramičnih in koščenih preizkušancev.	60
Preglednica 5.6: Ovrednotenje poškodb preizkušancev.	60
Preglednica 5.7: Opazovane globine za izračun napetosti v zemljini.	65
Preglednica 6.1: Podatki o natezni trdnosti kovanega železa.	79
Preglednica 6.2: Podatki o natezni trdnosti brona.	81
Preglednica 6.3: Podatki o natezni in tlačni trdnosti prašičje kosti.	83
Preglednica 6.4: Vrednosti napetosti in deformacij pri lobanjah ob doseženi meji plastičnosti.	86
Preglednica 6.5: Vrednosti napetosti in deformacij pri lopaticah ob doseženi meji plastičnosti.	89
Preglednica 6.6: Podatki o natezni trdnosti keramičnih preizkušancev.	92
Preglednica 6.7: Vrednosti napetosti in deformacij keramičnih preizkušancev ob nastanku poškodb.	93
Preglednica 6.8: Podatki o natezni in tlačni trdnosti stekla.	97
Preglednica 7.1: Pozitivni in negativni vplivi različnih dejavnikov na preizkušance v obremenitvenih preizkusih.	100
Preglednica 7.2: Vizualno dokumentirane poškodbe arheoloških koščenih preizkušancev v preizkusih 6–9.	101
Preglednica 7.3: Povzetek pomenljivih vrednosti za v preizkusih izrazito poškodovane preizkušance.	103
Preglednica 7.4: S simulacijami pridobljene velikosti deformacij tal (Povzeto po Avsenik 2012, 104–105, Preglednici 40 in 41).	104
Preglednica 8.1: Pregled splošnih mejnih napetosti in deformacij za izbrane materiale.	106
Preglednica 8.2: Podatki o napetostih in deformacijah, zemljini in globini, pri katerih so se preizkušanci poškodovali.	106
Preglednica 8.3: Kategorije redoks potenciala.	107
Preglednica 9.1: Najpomembnejše lastnosti okolja za ohranjanje različnih materialov.	109
Preglednica 9.2: Velikost deformacij v preizkušancih ob nastanku poškodb.	110
Preglednica A.1: Povzetek namestitve preizkušancev v preizkusu 1.	118
Preglednica A.2: Vlažnost pred, med, ob koncu ter po preizkusu 1.	118
Preglednica A.3: Napetosti na opazovanih globinah v preizkusu 1.	118
Preglednica A.4: Posedanje plasti v preizkusu 1.	118
Preglednica A.5: Premiki preizkušancev v preizkusu 1.	118

Preglednica B.1: Povzetek namestitve preizkušancev v preizkusu 2.	120
Preglednica B.2: Vlažnost pred, med, ob koncu ter po preizkusu 2.	120
Preglednica B.3: Napetosti na opazovanih globinah v preizkusu 2.	120
Preglednica B.4: Posedek plasti v preizkusu 2.	120
Preglednica B.5: Premiki in poškodbe preizkušancev v preizkusu 2.	120
Preglednica C.1: Povzetek namestitve preizkušancev v preizkusu 3.	122
Preglednica C.2: Vlažnost pred, med, ob koncu ter po preizkusu 3.	122
Preglednica C.3: Napetosti na opazovanih globinah v preizkusu 3.	122
Preglednica C.4: Posedanje plasti v preizkusu 3.	122
Preglednica C.5: Premiki preizkušancev v preizkusu 3.	122
Preglednica D.1: Povzetek namestitve preizkušancev v preizkusu 4.	124
Preglednica D.2: Vlažnost pred, med, ob koncu ter po preizkusu 4.	124
Preglednica D.3: Napetosti na opazovanih globinah v preizkusu 4.	124
Preglednica D.4: Posedanje plasti v preizkusu 4.	124
Preglednica D.5: Premiki in poškodbe preizkušancev v preizkusu 4.	124
Preglednica D.6: Napetosti in deformacije železnih preizkušancev v preizkusu 4.	126
Preglednica D.7: Napetosti in deformacije bronastih preizkušancev v preizkusu 4.	126
Preglednica D.8: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije stegenice v produ v preizkusu 4.	126
Preglednica D.9: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije stegenice v melju v preizkusu 4.	126
Preglednica D.10: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije keramičnega lončka v produ v preizkusu 4.	127
Preglednica D.11: Minimalne in maksimalne glavne napetosti keramičnega lončka v melju v preizkusu 4.	127
Preglednica D.12: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije steklenega nizkega kozarca v produ v preizkusu 4.	127
Preglednica D.13: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije nizkega kozarca v melju v preizkusu 4.	127
Preglednica E.1: Povzetek namestitve preizkušancev v preizkusu 5.	128
Preglednica E.2: Vlažnost pred, med, ob koncu ter po preizkusu 5.	128
Preglednica E.3: Delež vode v melju v preizkusu 5.	128
Preglednica E.4: Napetosti na opazovanih globinah v preizkusu 5.	128
Preglednica E.5: Posedanje plasti v preizkusu 5.	128
Preglednica E.6: Premiki in poškodbe preizkušancev v preizkusu 5.	129
Preglednica E.7: Napetosti in deformacije železnih preizkušancev v preizkusu 5.	130
Preglednica E.8: Napetosti in deformacije bronastih preizkušancev v preizkusu 5.	130
Preglednica E.9: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije lopatice v produ preizkusa 5.	131
Preglednica E.10: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije lopatice v melju preizkusa 5.	131
Preglednica E.11: Napetosti in deformacije lobanje v produ preizkusa 5.	131

Preglednica E.12: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije lobanje v melju preizkusa 5.	131
Preglednica E.13: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije lopatice v produ preizkusa 6.	132
Preglednica E.14: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije keramične skodelice v produ preizkusa 5.	132
Preglednica E.15: Minimalne in maksimalne normalne napetosti keramične skodelice v melju preizkusa 5.	132
Preglednica E.16: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije visokega kozarca v produ preizkusa 5.	132
Preglednica E.17: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije visokega steklenega kozarca v melju preizkusa 5.	133
Preglednica F.1: Povzetek namestitve preizkušancev v preizkusu 6.	134
Preglednica F.2: Vlažnost pred, med, ob koncu in po koncu preizkusa 6.	134
Preglednica F.3: Delež vode v melju v preizkusu 6.	134
Preglednica F.4: Napetosti na opazovanih globinah v preizkusu 6.	134
Preglednica F.5: Posedanje plasti v preizkusu 6.	134
Preglednica F.6: Premiki in poškodbe preizkušancev v preizkusu 6.	135
Preglednica F.7: Napetosti in deformacije železnih preizkušancev v preizkusu 6.	136
Preglednica F.8: Napetosti in deformacije bronastih preizkušancev v preizkusu 6.	136
Preglednica F.9: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije v lopatici v melju preizkusa 6.	137
Preglednica F.10: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije lobanje v produ preizkusa 6.	137
Preglednica F.11: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije lobanje v melju preizkusa 6.	137
Preglednica F.12: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije keramične skodelice v produ preizkusa 6.	137
Preglednica F.13: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije keramične skodelice v melju preizkusa 6.	138
Preglednica F.14: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije visokega steklenega kozarca v produ preizkusa 6.	138
Preglednica F.15: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije visokega steklenega kozarca v melju preizkusa 6.	138
Preglednica G.1: Povzetek namestitve preizkušancev v preizkusu 7.	139
Preglednica G.2: Vlažnost pred, med, ob koncu ter po preizkusu 7.	139
Preglednica G.3: Delež vode v melju v preizkusu 7.	139
Preglednica G.4: Napetosti na opazovanih globinah v preizkusu 7.	139
Preglednica G.5: Posedanje plasti v preizkusu 7.	139
Preglednica G.6: Premiki in poškodbe preizkušancev v preizkusu 7.	140
Preglednica G.7: Napetosti in deformacije železnih preizkušancev v preizkusu 7.	141
Preglednica G.8: Napetosti in deformacije bronastih preizkušancev v preizkusu 7.	141

Preglednica G.9: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije stegnenice v produ preizkusa 7.	142
Preglednica G.10: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije stegnenice v melju preizkusa 7.	142
Preglednica G.11: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije lopatice v produ preizkusa 7.	142
Preglednica G.12: Minimalne in maksimalne glavne napetosti lopatice v melju preizkusa 7.	142
Preglednica G.13: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije keramične skodelice v produ preizkusa 7.	142
Preglednica G.14: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije keramične skodelice v melju preizkusa 7.	143
Preglednica G.15: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije nizkega steklenega kozarca v produ preizkusa 7.	143
Preglednica G.16: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije nizkega steklenega kozarca v melju preizkusa 7.	143
Preglednica H.1: Povzetek namestitve preizkušancev v preizkusu 8.	144
Preglednica H.2: Vlažnost pred, med, ob koncu ter po preizkusu 8.	144
Preglednica H.3: Delež vode v melju v preizkusu 8.	144
Preglednica H.4: Napetosti na opazovanih globinah v preizkusu 8.	144
Preglednica H.5: Posedanje plasti v preizkusu 8.	144
Preglednica H.6: Premiki in poškodbe preizkušancev v preizkusu 8.	145
Preglednica H.7: Napetosti in deformacije železnih preizkušancev v preizkusu 8.	146
Preglednica H.8: Napetosti in deformacije bronastih preizkušancev v preizkusu 8.	147
Preglednica H.9: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije lopatice v produ preizkusa 8.	147
Preglednica H.10: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije lopatice v melju preizkusa 8.	147
Preglednica H.11: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije keramičnega lončka v produ preizkusa 8.	147
Preglednica H.12: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije keramične skodelice v melju preizkusa 8.	148
Preglednica H.13: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije steklene skodelice v produ preizkusa 8.	148
Preglednica H.14: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije steklene skodelice v melju preizkusa 8.	148
Preglednica I.1: Povzetek namestitve preizkušancev v preizkusu 9.	149
Preglednica I.2: Vlažnost pred, med, ob koncu ter po preizkusu 9.	149
Preglednica I.3: Delež vode v melju v preizkusu 9.	149
Preglednica I.4: Napetosti na opazovanih globinah v preizkusu 9.	149
Preglednica I.5: Posedanje plasti v preizkusu 9.	149
Preglednica I.6: Premiki in poškodbe preizkušancev v preizkusu 9.	150
Preglednica I.7: Napetosti in deformacije železnih preizkušancev v preizkusu 9.	151
Preglednica I.8: Napetosti in deformacije bronastih preizkušancev v preizkusu 9.	152

Preglednica I.9: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije lopatice v produ preizkusa 9.	152
Preglednica I.10: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije lopatice v produ preizkusa 9.	152
Preglednica I.11: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije lobanje v produ preizkusa 9.	152
Preglednica I.12: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije lobanje v melju preizkusa 9.	153
Preglednica I.13: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije keramične skodelice v produ preizkusa 9.	153
Preglednica I.14: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije keramične skodelice v melju preizkusa 9.	153
Preglednica I.15: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije steklene skodelice v produ preizkusa 9.	153
Preglednica I.16: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije steklene skodelice v melju preizkusa 9.	154
Preglednica J.1: Povzetek namestitve preizkušancev v preizkusu 10.	155
Preglednica J.2: Poškodbe preizkušancev v preizkusu 10.	155
Preglednica J.3: Minimalne in maksimalne napetosti in deformacije sodobne stegenice preizkusa 10.	155
Preglednica J.4: Minimalne in maksimalne napetosti in deformacije antične cevaste kosti preizkusa 10.	155
Preglednica J.5: Minimalne in maksimalne napetosti in deformacije sodobnega keramičnega odlomka v preizkusu 10.	155
Preglednica J.6: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije antičnega keramičnega odlomka v preizkusu 10.	156
Preglednica J.7: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije prazgodovinskega keramičnega odlomka v preizkusu 10.	156
Preglednica M.1: Povprečno zgoščevanje proda in melja v preizkusih 1–3.	161
Preglednica M.2: Povprečno zgoščevanje proda in melja v preizkusih 4–9.	161
Preglednica M.3: Totalne napetosti (σ) v zemljini na opazovanih globinah pred obremenjevanjem.	161
Preglednica M.4: Največje dosežene totalne napetosti (σ_{MAX}) v zemljini na opazovanih globinah med obremenjevanjem.	161
Preglednica M.5: Spremembe totalnih napetosti ($\Delta\sigma$) v zemljinah na opazovanih globinah med obremenjevanjem.	162
Preglednica M.6: Povprečni premiki vodoravno in navpično nameščenih preizkušancev v preizkusih 1–3.	162
Preglednica M.7: Povprečni premik preizkušancev v produ in melju v preizkusih 4–9.	162
Preglednica M.8: Ostanek deformacij v železnih preizkušancih po koncu razbremenjevanja.	162
Preglednica M.9: Ostanek deformacij v bronastih preizkušancih po koncu razbremenjevanja.	163
Preglednica M.10: Ostanek deformacij v lobanjah po koncu razbremenjevanja.	163

Preglednica M.11: Ostanki deformacij v lopaticah po koncu razbremenjevanja.	164
Preglednica M.12: Ostanki deformacij v keramičnih preizkušancih po koncu razbremenjevanja.	164
Preglednica M.13: Vrednosti napetosti in deformacij ob nastanku poškodb na steklenih preizkušancih.	165
Preglednica M.14: Preostale deformacije v steklenih preizkušancih po koncu razbremenjevanja.	165
Preglednica N.1: Groba ocena prepustnosti glede na vrsto zemljine.	166
Preglednica N.2: Groba ocena modula stisljivosti in Poissonovega količnika za različne vrste zemljin (Das in Baaranja 2003, 352, Preglednici 11.4, 11.5).	167

Povzetek

Načrtovanje ohranjanja arheoloških ostalin *in situ* zahteva razumevanje, kako se površinske mehanske obremenitve prenašajo skozi arheološke plasti. V ta namen smo izvedli kontroliran laboratorijski poskus za oceno vpliva obremenitev tal s težko mehanizacijo na zakopane ostaline. Umetna »najdišča« smo konstruirali v namenskem jeklenem zabojniku s plastmi peščenega melja in proda. Na različne globine smo namestili nabor arheoloških in modernih predmetov; izbrane predmete smo opremili z uporovnimi merilnimi lističi. Servo-hidravlični bat je izvajal statične in dinamične (vibracijske) obremenitve. Vlažnost in temperatura sta bili spremljani pred, med in po obremenjevanju, tridimenzionalno dokumentiranje plasti in artefaktov ter *in situ* meritve togosti tal pa so bili izvedeni pred in po obremenitvah.

Zbrani podatki zajemajo stiskanje plasti in prerazporeditev vlage, premike predmetov, napetosti in deformacije na z uporovnimi merilnimi lističi opremljenih predmetih ter makroskopsko opazne poškodbe. Rezultati poudarjajo, da (i) zrnavost in vlažnost tal bistveno vplivata na prenos obremenitev, (ii) materialne lastnosti in položaj predmetov določajo tako premike kot poškodbe, (iii) premiki artefaktov znotraj plasti predstavljajo pomemben dejavnik tveganja in (iv) dinamične vibracije so izrazito bolj škodljive kot ekvivalentne statične sile. Pomembno je, da splošni zaščitni sloj ni vedno učinkovita pri zmanjšanju poškodb, kar poudarja, da je treba strategije zaščite prilagoditi lastnostim tal, načinu obremenjevanja in ciljnim materialom.

Ugotovitve prispevajo k na dokazih utemeljenemu upravljanju tveganj zgoščanja tal in izboljšujejo odločanje pri ohranjanju arheoloških ostalin *in situ*, vključno s tem, kdaj in kako omejiti dinamične obremenitve ter kdaj je uporaba zaščitnega sloja smiselna.

Abstract

Planning *in situ* preservation of archaeological remains requires understanding how surface mechanical loading propagates through archaeological deposits. We conducted a controlled, laboratory experiment to evaluate the effects of heavy-equipment compaction on buried remains. Artificial “sites” were constructed in a custom steel soil box using layered sandy silt and gravel. A range of archaeological and modern artefacts were placed at known depths and orientations; selected items were instrumented with strain gauges. A servo-hydraulic actuator applied static and dynamic (vibratory) loads. Moisture and temperature were monitored before, during, and after loading, while three-dimensional documentation of layers and artefacts and *in situ* soil stiffness tests were performed pre- and post-loading.

The dataset captures layer compression and moisture redistribution, artefact displacements, stresses and strains on instrumented artefacts, and macroscopically observable damage. Results highlight that (i) soil grain size and moisture state substantially influence load transmission, (ii) the material properties and position of artefacts govern both movement and damage, (iii) artefact mobility within layers is a critical risk factor, and (iv) dynamic vibrations are markedly more damaging than equivalent static forces. Notably, a generic protective layer did not consistently reduce damage, underscoring that protection strategies must be tailored to soil conditions, loading mode, and target materials.

These findings advance an evidence-based approach to managing compaction risks and refine decision-making for *in situ* preservation, including when and how to restrict dynamic loads and when protective layers are warranted.

1. Ohranjanje arheoloških ostalin v tleh

Postopno izginjanje arheološke dediščine in dejstvo, da se arheološke ostaline najbolj ohranjajo v svojem primarnem okolju, sta močno vplivala na nastanek doktrine ohranjanja arheološke dediščine *in situ*. Ob primernih pogojih in ukrepih takšno varovanje omogoča precej bolj celostno in dolgoročno ohranitev arheoloških ostalin na izvornem kraju, s katerim tvorijo celoto in v katerem imajo največjo vrednost. Nčelo ohranjanja *in situ* izhaja iz stališča, da izkopavanja pomenijo fizično uničenje integritete arheološkega zapisa, iz zavedanja, da bodo prihodnje, naprednejše tehnologije omogočile pridobivanje več in bolj kakovostnih informacij, ter iz praktičnega spoznanja, da so številna izkopavanja strokovno šibka ter nimajo ekonomskih in drugih zmožnosti za celovito arheološko raziskavo. Ne nazadnje sta pomembna tudi etični vidik ohranjanja dediščine za zanamce ter upoštevanje možnosti, da je z zadostnim znanjem in s pravilnimi ukrepi mogoče njeno celostno in dolgoročno ohranjanje *in situ* (Groenewoudt in Bloemers 1997, 128). Skladno z malteško konvencijo, katere namen je varovanje evropske arheološke dediščine kot vira evropskega kolektivnega spomina, sredstva zgodovinskega in znanstvenega proučevanja ter definiranja standardov upravljanja z arheološko dediščino (MEKVAD 1999), celostno in dolgoročno varovanje arheoloških ostalin *in situ* v sodobni arheološki in konservatorski stroki velja za prednostno.

Varovanje *in situ* temelji na razmeroma upravičenem predvidevanju, da se ostaline najbolj ohranjajo v izvornem okolju. Običajno je utemeljeno z navedbo, da obstoj sto ali tisoče let starih ostalin dokazuje dobre pogoje za njihovo nadaljnjo dolgoročno ohranitev. Pri tem je pogosto zanemarjeno, da tudi ob idealnih pogojih in ustreznem upravljanju procesov propadanja ostalin ni mogoče povsem ustaviti, temveč zgolj upočasniti (Huisman 2009, 181). Poleg tega se zaradi številnih človekovih posegov okolje nenehno in hitro spreminja, kar dodatno ogroža dolgoročno ohranjanje ostalin. Dokazano je, da npr. gradnje in intenzivno kmetovanje izrazito negativno učinkujejo na okolje in arheološke ostaline (Darvill in Fulton 1998).

Raziskave, ki prinašajo podatke o ohranjanju in propadanju arheoloških ostalin *in situ* v različnih okoljih in pod različnimi vplivi, so izredno koristne, vendar zelo drage, logistično zahtevne in glede marsičesa šele na začetku. Varovanje *in situ* namreč pomeni nadaljnje izpostavljanje ostalin zunanjemu okolju. Za razliko od hrambe v muzeju, kjer je mogoče okolje optimizirati, nadzorovati in vzdrževati, je zunanje okolje precej bolj kompleksno in dinamično, zaradi česar njegove spremembe težko nadzorujemo. Tako je dolgoročno varovanje arheoloških ostalin *in situ* mogoče le ob zadostnem razumevanju odnosa med materialom in fizičnim okoljem, ki ga obdaja. Dobro razumevanje tega odnosa omogoča prepoznavanje ključnih dejavnikov okolja, kar je nujno izhodišče za sprejemanje najustreznejših konservatorskih ukrepov. Vendar odnos med materialnimi ostanki in fizičnim okoljem pomeni le eno, in sicer tehnično komponento, ki je del širše družbeno in kulturno utemeljene strategije ohranjanja arheološke dediščine. Vse konservatorske strategije in posamezne odločitve v konkretnih primerih morajo upoštevati celoten kontekst, družbeni in tehnični. S pričujočo raziskavo preučujemo predvsem slednjega, in sicer z namenom boljšega razumevanja vplivov okolja na arheološke ostaline. Družbene potrebe namreč narekujejo pogostejše poseganje v prostor, kar pomeni vse večji pritisk na območja z arheološkimi ostalinami in zahteva hitre, ustrezne ter strokovno utemeljene odzive arheološke in konservatorske stroke. Pri tem težavo pomeni pomanjkanje primernih strokovnih

podatkov in znanj. Kljub temu, da so v tujini, predvsem v državah severne in zahodne Evrope, raziskave vplivov okolja in njegovih sprememb na *in situ* ohranjene ostaline že nekaj časa ena od pomembnih tem, je zaradi kompleksnosti področje še vedno v začetnih stadijih razvoja.

Dejavniki, ki povzročajo propadanje arheoloških materialov, so trenutno zgolj empirično opredeljeni in grobo razumljeni. Ker se različni materiali različno odzivajo na vplive okolja, je odnos med materialom in okoljem kompleksen ter se spreminja ne le od najdišča do najdišča in od materiala do materiala, temveč tudi znotraj enega najdišča in s stanjem ohranjenosti posameznega materiala (Smit et al. 2006, 35; van den Berg et al. 2010, 162–163). Prepoznavanje in razumevanje tistih lastnosti okolja, ki najbolj vplivajo na ohranjanje različnih vrst materialov, je pomemben del načrta za dolgoročno varovanje arheoloških ostalin. Poleg pogosto omenjenih lastnosti tal, kot so vlažnost, temperatura, pH vrednost, redoks potenciala in biološke aktivnosti, med pomembne dejavnike okolja sodijo mehanske obremenitve. V tleh prisotni materiali so izpostavljeni teži tal ter potencialnim dodatnim obremenitvam površine, kot so težki gradbeni stroji, nasiipi, stavbe ipd. (Huisman 2009; De Lange et al. 2012; McGowan in Prangnell 2015). Obremenitve povečajo napetosti v tleh, kar vodi v deformacijo in prerazporeditev trdnih delcev zemljine ter iztiskanje zraka in/ali vode iz por. S tem pride do zgoščevanja zemljine in posedanja tal (Das in Sobhan 2013, 146), kar vpliva na celotno arheološko najdišče. Najočitnejša posledica so mehanske poškodbe ostalin (Garfinkel in Lister 1983; Olson et al. 1988; Mathewson et al. 1992; McGowan in Prangnell 2015), ne gre pa zanemariti premikanja ostalin in s tem spreminjanja njihovega konteksta. Tako lahko zaradi raznolikih lastnosti zemljin v tleh ter različnega zgoščevanja in posedanja pride do popačenja stratigrafskega zapisa najdišča (De Lange et al. 2012; McGowan in Prangnell 2015). Ker posedanje poteka z odtekanjem vode, se spreminja tudi vlažnost tal (De Lange et al. 2012).

Kljub velikemu vplivu mehanskih obremenitev na arheološke ostaline je ta problem še vedno slabo raziskan. Poznanih je nekaj študij o odzivu različnih zemljin na mehanske obremenitve, ki pa so le posredno upoštevale prenos obremenitev na arheološke ostaline. Tako so Sidell in sodelavci (2004) v laboratorijski raziskavi proučevali odziv različnih vrst zemljin na statične in dinamične mehanske obremenitve. Ugotovili so, da so na obremenitve bolj odporne grobozrnate in manj stisljive zemljine v primerjavi s fino zrnatimi in bolj stisljivimi zemljinami. Poleg tega so izpostavili hipotezo o lažjem in hitrejšem prenosu obremenitev na artefakte iz grobozrnatih v primerjavi s fino zrnatimi zemljinami, ki pa je niso preverili z empiričnimi raziskavami. V podobni raziskavi je Hyde (2004) primerjal odziv različno strukturiranih zemljin na obremenitve, pri čemer je kot vključke obravnaval zrna peska. Rezultati so pokazali, da so poškodbe odvisne od strukture zemljine in velikosti vključenih peščenih zrn; predvsem pa so poškodbe naraščale z zmanjševanjem velikosti zrn. Vpliv zgoščevanja različnih vrst tal na arheološke ostaline so na podlagi geoloških podatkov posredno preučevali tudi v nizozemskem projektu o predvidevanju občutljivosti tal z ohranjenimi arheološkimi ostalinami na posedanje (*A predictive map of compression-sensitivity of the Dutch archaeological soil archive*) (De Lange et al. 2012). Rezultati projekta so bili prikazani na 3D zemljevidu z izračuni predvidenega zgoščevanja tal glede na njihov profil. Na osnovi zemljevida je sicer mogoče izluščiti ogrožena območja, vendar brez natančnejše povezave z dejanskimi arheološkimi ostalinami. Avsenik (2012) je v svoji diplomski nalogi izvajala računalniške 2D simulacije obremenjevanja peščenih in glinenih tal. V simulacijah je upoštevala učinek različno visokih nasipov, grajenih iz različnih materialov in geosintetikov, na v tleh prisotne arheološke artefakte. Pri tem je predpostavila, da se bodo arheološki artefakti zaradi svoje majhnosti deformirali enako kot zemljine. V simulacijah obremenitev je upoštevala predvsem globino arheoloških artefaktov, lastnosti zemljine in uporabljenega nasipnega materiala, vrsto in smer deformacij ter uporabo geosintetika. Rezultati so pokazali visoko ogroženost artefaktov, ki so ležali v globini do 1 m; do določene mere bi jo lahko zmanjšali z izgradnjo primerne nasipa, denimo z uporabo geosintetika in materiala z nizko prostorninsko težo.

Le v maloštevilnih raziskavah so vpliv obremenitev na arheološke ostaline v tleh preučevali neposredno. Del projekta Caltrans (California Department of Transportation) iz leta 1981 je bila študija vpliva mehanskih

obremenitev na umetno ustvarjeno arheološko najdišče (Garfinkel in Lister 1983). Rezultati so pokazali jasne poškodbe preizkušancev, ki so bili dve leti zakopani pod 22,8 m visokim nasipom. Leta 1988 je bila s pomočjo računalniških simulacij in laboratorijskih raziskav izvedena študija vpliva vertikalnih obremenitev zemljine in v njej prisotnih preizkušancev (Olson et al. 1988). Izkazalo se je, da je odstranjevanje zemljine, ki je prekrivala preizkušance, povzročilo več škode kot samo obremenjevanje. Večjo kombinirano laboratorijsko in terensko raziskavo so izvedli v Teksasu leta 1992 (Mathewson, Gonzales in Eblen 1992), kjer so opazovali vplive laboratorijsko vsiljenih tlačnih napetosti in premikajočih se gradbeniških strojev na v zemljino zakopane preizkušance. Raziskava je pokazala zmanjševanje poškodb z naraščanjem globine ter velik pomen stisljivosti in vlažnosti zemljine ter lege artefaktov. V raziskavi so preizkušali tudi zaščitna prekritja, za katera se je izkazalo, da zmanjšujejo deformacije. Eno najboljsejših raziskav vpliva mehanskih obremenitev na arheološke artefakte sta izvedla English Heritage in DEFRA (Ministrstvo za okolje, prehrano in podeželje/Department for Environment, Food and Rural Affairs) (Booth in Spandl 2009). Raziskava je vključevala laboratorijske in terenske preizkuse obremenjevanja tal, v katerih so bili zakopani preizkušanci. Tla so obremenjevali s kmetijskimi stroji in merili pritiske, ki so nastali v tleh. Glavni zaključki projekta so izpostavili razlike med posameznimi vrstami mehanizacije, manjše poškodbe v primeru zmanjšane tlaka v pnevmatikah strojev oz. pri uporabi pnevmatik večjih dimenzij, zmanjševanje pritiska z globino, 10-odstotni porast pritiska pri ponavljajočih se obremenitvah istega območja, večji prenos pritiska na preizkušance v grobozrnatih zemljinah v primerjavi s fino zrnatimi ter omejen vpliv vlažnosti na prenos pritiskov iz zemljin na preizkušance. Pokazalo se je tudi, da so bile deformacije odvisne od vrste, oblike in lege preizkušancev v tleh. Leta 2015 je McGowan (2015) objavila rezultate raziskave, v kateri so preučevali posledice vertikalnih pritiskov na primeru enega pokopališča. Izračuni so pokazali predvsem različne učinke obremenjevanja glede na dimenzije grobov, njihovo globino in vrste zemljine, v kateri so ležali. Še nekoliko bolj specifična je bila študija odziva sodobnih kosti in kosti iz arheoloških kontekstov na neposredno diametralno obremenjevanje (Turner-Walker, Parry 1995, 190). Tu so rezultati pokazali jasno izgubo trdnosti kosti iz arheoloških kontekstov, pri čemer so spremljajoče kemične analize razkrile izgubo trdnosti zaradi hidrolize kolagena in delovanja mikroorganizmov.

Za boljše razumevanje vplivov okolja na ohranitev arheoloških ostalin *in situ*, zlasti vpliva mehanskih obremenitev, smo poskušali čim bolj natančno preučiti mehanske obremenitve zemljin in materialov oz. kako statične in dinamične obremenitve z in brez uporabe zaščitnega sloja učinkujejo na preizkušance iz različnih materialov, nameščene v prodnato in meljasto zemljino. Za potrebe laboratorijskih preizkusov smo postavili posebno preizkuševališče, v katerem smo opazovali učinke obremenitev, izvedli porušne preiskave materialov ter opravili vrsto testov na materialih z različno stopnjo ohranjenosti. Zaradi prevelikega števila dejavnikov smo raziskavo omejili na podpovršinske arheološke ostaline, ohranjene v z vodo nenasičenih tleh, pri čemer smo se osredotočili predvsem na vpliv mehanskih obremenitev na materiale, ki so pogosto prisotni v arheoloških kontekstih.

V tleh prisotne arheološke ostaline tvorijo del talnega profila, sestavljenega iz različnih talnih horizontov oz. slojev zemljin. Zaradi raznolikosti v procesih nastanka in razvoja se zemljine med seboj razlikujejo po fizičnih, kemičnih in bioloških lastnostih (Jenny 1994, 2–19; Goffe 2007, 209, 210). Poenostavljeno, zemljine so trikomponentni sistem, sestavljen iz trdne, tekoče in plinaste faze. Trdno komponento zastopajo mineralni in organski delci različne kemične sestave, velikosti, oblike in usmerjenosti. V porah med delci sta tekoča in plinasta komponenta oz. talne raztopine in zrak (Hillel 1998, 8–10). Ker so tla izpostavljena različnim naravnim in človekovim vplivom, so dinamično, tridimenzionalno okolje, ki se prostorsko in časovno spreminja (Wilson in Pollard 2002, 646). Zaradi tega so v tleh ohranjene arheološke ostaline oz. materiali, iz katerih so sestavljene, nenehno pod vplivom različnih fizičnih, kemičnih in bioloških procesov. Materiali so odprt sistem, ki z okoljem izmenjuje energijo in snovi zaradi razlik v sestavi materiala in zemljine, ki ga obdaja. Razlike pomenijo energetska nestabilnost ter neravnotežje med materialom in okoljem. Zaradi težnje po stabilnosti in ravnotežju v materialu prihaja do sprememb kemičnih in strukturnih lastnosti. S

približevanjem ravnotežju so spremembe manjše in počasnejše, vse dokler ne pride do vzpostavitve stabilnega odnosa, ki materialu omogoči dolgoročno ohranitev. Vzpostavljeno ravnotežje je lahko porušeno zaradi sprememb v okolju ali pa nikoli ni doseženo. Ob odsotnosti ravnotežja in nestabilnosti v materialu prihaja do nenehnih sprememb, ki s časom pripeljejo do njegovega popolnega propada (Wilson in Pollard 2002, 644–646; Raiswell 2009, 595).

Ker različne lastnosti tal različno vplivajo na različne materiale, je za dolgoročno ohranjanje arheoloških ostalin *in situ* ključno poznavanje lastnosti posameznega arheološkega materiala, nivoja podtalnice ter vlažnosti, temperature, pH vrednosti, redoks potenciala, biološke aktivnosti in mehanskih lastnosti tal. Številne predhodne raziskave so pokazale, da arheološke ostaline v z vodo nenasičenih tleh najbolj ogrožajo geokemične interakcije med trdnimi delci, talnimi raztopinami in zrakom, pri organskih ostalinah je treba k temu prišteti še biološko aktivnost (Wilson in Pollard 2002, 646; Davidson in Wilson 2006, 22; Kibblewhite et al. 2015, 251).

Poseben vidik ohranjanja arheoloških ostalin *in situ* so dodatne mehanske obremenitve in posledično posedanje tal. Posedanje je naraven proces konsolidacije tal, odvisen od lastnosti posameznih zemljin. Proces lahko pospešijo dodatne obremenitve na površini tal, kot so težka mehanizacija, nasipi in objekti. V vsakem primeru je posedanje odvisno od lastnosti zemljin, predvsem od njihove teksture, strukture, poroznosti in predhodne konsolidacije. Velikim spremembam so posebej podvržena slabo konsolidirana, fino-zrnata glinena in šotna tla, medtem ko so spremembe grobozrnatih peščenih in prodnatih tal manjše (Davidson in Wilson 2006, 22; Das in Sobhan 2013, 151). Pri posedanju tal so resda najočitnejše prav fizične spremembe, vendar ne gre zanemariti, da ima lahko posedanje za posledico tudi kemične in biološke spremembe. Zemljine se namreč zgoščujejo na račun zmanjševanja por, kar vpliva na pretočnost tal ter vsebnost vode in zraka v porah (Davidson in Wilson 2006, 22; Huisman 2012, 60–71).

2 Mehanika tal

Mehanske lastnosti tal so deformabilnost, prepustnost ter trdnost tal. Odvisne so od fizikalnih lastnosti zemljin, ki so pogojene z vrsto nastanka materiala, njegovo starostjo, kemično zgradbo, velikostjo in strukturo zrn, napetostjo v geološki zgodovini ter vlažnostjo in konsistenco okolja, ki je obdajalo arheološke materiale. Zato so zemljine v tleh nehomogeni in anizotropni materiali. Njihovih lastnosti ne moremo izraziti s povprečnimi vrednostmi, temveč jih moramo za vsak primer posebej ugotavljati s terenskimi in/ali laboratorijskimi preizkusi (Stanek in Turk 2008, 183-186).

2.1 Fizikalne lastnosti zemljin

Zemljine so dvo- ali trikomponentni sistem, sestavljen iz trdne snovi, zraka in/ali vode. Njihove osnovne fizikalne lastnosti so zrnavost, poroznost, zasičenost, vlažnost, konsistenca in gostota. Te lastnosti so definirane številčno in so osnova za poenostavljeno klasifikacijo oz. identifikacijo tal, ki se bodo z mehanskega stališča obnašala podobno.¹ Pridobitev podatkov o osnovnih fizikalnih lastnostih zemljin temelji na standardiziranih inženirskih laboratorijskih preizkusih² in jih na tem mestu nismo natančno opisovali.

Zrnavost oz. granulometrični sestav je predstavljen z velikostjo osnovnih delcev, ki zemljine delijo v različne skupine glede na klasifikacijo MIT³ (Preglednica 2.1). Ker zemljine niso sestavljene zgolj iz zrn enega velikostnega razreda, je potrebna mehanska analiza oz. sejanje za določitev prisotnih velikostnih razredov in njihove absolutne oz. relativne zastopanosti (Slika 2.1). Pridobljeni podatki omogočajo izris porazdelitvene krivulje ter izračun koeficientov enakomernosti (C_u) in ukrivljenosti (C_c). Koeficienta dajeta informacije o dobro ali slabo stopnjevani zrnavosti. Pri dobro stopnjevani zrnavosti so vsi velikostni razredi delcev dobro zastopani. Zemljine s slabo stopnjevano zrnavostjo imajo enolično zrnavost, torej prevladujejo delci ene velikosti, ali vrzelasto zrnavost, pri kateri je postopnost prehajanja delcev preko velikostnih razredov diskontinuirana, ker nekateri velikostni razredi manjkajo.

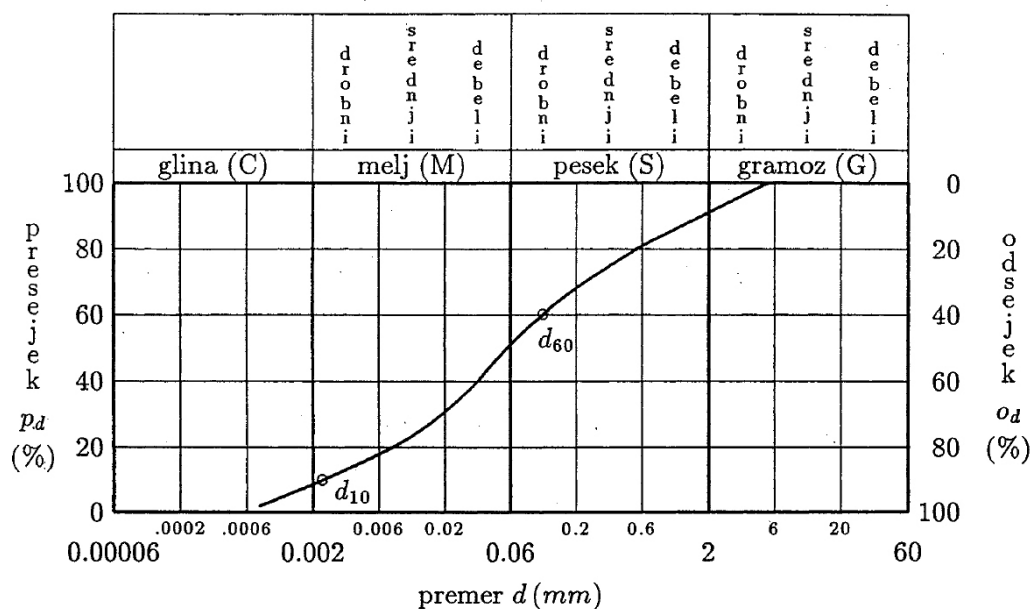
Preglednica 2.1: Razvrstitev zemljin glede na velikost zrn.

VELIKOST (mm)	VRSTA ZEMLJINE	DELITEV	VELIKOST (mm)	VRSTA ZEMLJINE	DELITEV
60–20	GRAMOZ	debel	0,06–0,02	MELJ	debel
20–6		srednji	0,02–0,006		srednji
6–2		droben	0,006–0,002		droben
2–0,6	PESEK	debel	0,002–0,0006	GLINA	debela
0,6–0,2		srednji	0,0006–0,0002		srednja
0,2–0,06		droben	0,0002–0,00006		drobna

1 <http://dk.mors.si/Dokument.php?id=132&lang=slv>.

2 <http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/kmtal-gradiva/Gradiva%20za%20vec%20predmetov/MT%20-%20FIZIKALNE%20LASTNOSTI.pdf>; Das in Baaranja 2003.

3 Massachusetts Institute of Technology.



Slika 2.1: Primer porazdelitvene krivulje glede na velikost zrn in njihovo zastopanost.⁴

Poroznost tal je posledica prisotnosti por med trdnimi delci. Definirana je s količnikom por (e) ali deležem por (n). Prvi je količnik med volumnom praznih prostorov (V_v) ter volumnom trdne snovi (V_s). Drugi je količnik med volumnom praznih prostorov (V_v) in celotnim volumnom (V). Količnik por v realnih situacijah niha med 4 in 0,4, delež por teoretično niha med 1 in 0, realno pa med 0,8 in 0,3.

Ker količnik por ne velja za najboljšega pokazatelja lastnosti tal, se uporablja tudi relativna gostota (D_r), izražena kot količnik razlike med količnikom por v najbolj razrahljanih razmerah ($e_{\max}$) in količnikom por (e) ter razliko med količnikom por v najbolj razrahljanih razmerah ($e_{\max}$) in najbolj zgoščenih razmerah ($e_{\min}$). Količnik relativne gostote izraža stopnjo zgoščenosti tal in se giblje od 0 ($e=e_{\max}$) do 1 ($e=e_{\min}$) (**Preglednica 2.2**).

Preglednica 2.2: Konsistenčno stanje zemljin glede na indeks konsistence.

KOLIČNIK RELATIVNE GOSTOTE (D_r)	ZGOŠČENOST
$0 < D_r < 0,35$	rahla
$0,35 < D_r < 0,65$	srednje gosta
$0,65 < D_r < 0,85$	gosta
$0,85 < D_r < 1$	zelo gosta

Zasičenost zemljine (S_r) je odvisna od količine vode v porah ter definirana s količnikom med volumnom vode (V_w) in volumnom praznih prostorov (V_v). Stopnja zasičenosti je tako lahko med 0 in ≈ 1 oz. med 0 % in 100 %.

Vlažnost zemljine je razmerje med težo vode in težo trdnih snovi. Vlažnost vpliva na konsistenco zemljine, ki je lahko v osnovi trdna, poltrdna, plastična (gnetna) in židka. Delež vlažnosti, pri kateri zemljina preide iz trdnega v poltrdno stanje, imenujemo meja krčenja (w_s), iz poltrdnega v plastično meja plastičnosti (w_p) in iz plastičnega v židko meja židkosti (w_L). Poznavanje konsistenčnih (leznih) mej omogoča izračun indeksa plastičnosti (I_p) in konsistence (I_C). V grobem je mogoče stanje zemljine opredeliti na osnovi indeksa konsistence (**Preglednica 2.3**). Četudi se lahko konsistenca iste zemljine spreminja, se njene lezne meje ne. Tako je indeks plastičnosti ena redkih količin, ki se s časom ne spreminja.

4 <https://gradbenik.files.wordpress.com/2010/01/1-fizikalne-lastnosti-zemljin.pdf>.

Preglednica 2.3: Konsistenčno stanje zemljin glede na indeks konsistence.

INDEKS KONSISTENCE (I_c)	KONSISTENČNO STANJE
$I_c < 0$	židko
$I_c = 0$	meja med židkim in gnetnim
$0 < I_c < 0,33$	lahko gnetno
$0,33 < I_c < 0,66$	srednje gnetno
$0,66 < I_c < 1$	težko gnetno
$I_c = 1$	meja med gnetnim in poltrdnim
$I_c > 1$	poltrdno ali trdno

Gostota oz. prostorninska teža (γ) je definirana kot teža talne gmote na enoto volumna. Gostota je predstavljena s prostorninsko težo vlažne zemljine (γ), prostorninsko težo trdnih delcev oz. gostoto trdne faze tal (γ_s) in s suho prostorninsko težo oz. volumsko gostoto tal (γ_d). Prostorninska teža vlažne zemljine se močno spreminja v odvisnosti od zgoščenosti in zrnivosti ter običajno niha med 15 in 23 kN/m³. Peščena tla imajo prostorninsko težo med 18 in 21 kN/m³, medtem ko se gline večinoma gibljejo v razponu med 16 in 20 kN/m³.

Z vidika mehanike so fizikalne lastnosti zemljin pomembne za razumevanje in predvidevanje obnašanja tal. Grobozrnate zemljine (npr. gramoz, pesek) z dobro stopnjevano zrnavostjo imajo večjo nosilnost v primerjavi s fino zrnatimi zemljinami (melj, glina) in/ali zemljinami s slabo stopnjevano zrnavostjo. Enakomerno stopnjevana zrnavost namreč omogoča visoko gostoto zemljine, saj so pore med večjimi delci zapolnjene z manjšimi delci. Tako so tla močnejša in bolj sposobna prenašati obremenitve. Pomembno vlogo igra tudi vlažnost, predvsem pri fino zrnatih zemljinah. Grobozrnate zemljine imajo med trdnimi delci velike odprtine in lahko hitro odvajajo vodo. Poleg tega so delci peska in gramoza razmeroma veliki in težki, tako da ima vlažnost nanje le minimalen vpliv. Nasprotno fino zrnate zemljine vsebujejo drobne delce, tudi mikroskopsko drobne, ki so lahki in tako pod močnim vplivom vode v porah. Spremembe vlažnosti fino zrnatih zemljin vodijo v velike prostorninske spremembe, kot sta krčenje in nabrekanje. Nihanje vlažnosti pa ne vpliva zgolj na volumen, temveč tudi na plastičnost in nosilnost tal. Izsušena fino zrnata zemljina namreč izgubi plastične in kohezijske lastnosti ter s tem odpornost na deformacije oz. deformiranje brez pokanja in lomljenja. Na drugi strani večja vsebnost vode v fino zrnatih zemljinah zmanjšuje moč povezovanja med delci in s tem poslabšuje nosilno kapaciteto tal (Das in Sobhan 2013).

2.2 Napetosti v tleh

Napetost v tleh je vsota prvotnih napetosti, torej lastne teže tal, in pornega tlaka (μ). V popolnoma suhih zemljinah celotne napetosti prevzamejo trdni delci. Tako so totalne napetosti (σ) enake efektivnim napetostim (σ'):

$$\sigma = \sigma'.$$

V z vodo nasičenih zemljinah prvotne totalne napetosti (σ) deloma prevzamejo trdni delci (σ'), deloma voda v porah (μ) med delci:

$$\sigma = \sigma' + \mu.$$

Prvotne totalne vertikalne napetosti (σ_v) so tako enake vsoti količnikov prostorninskih tež posameznih slojev (γ_i) in njihovih debelin (Δz_i):

$$\sigma_v \equiv \sigma_{zz} = \sum \gamma_i z_i.$$

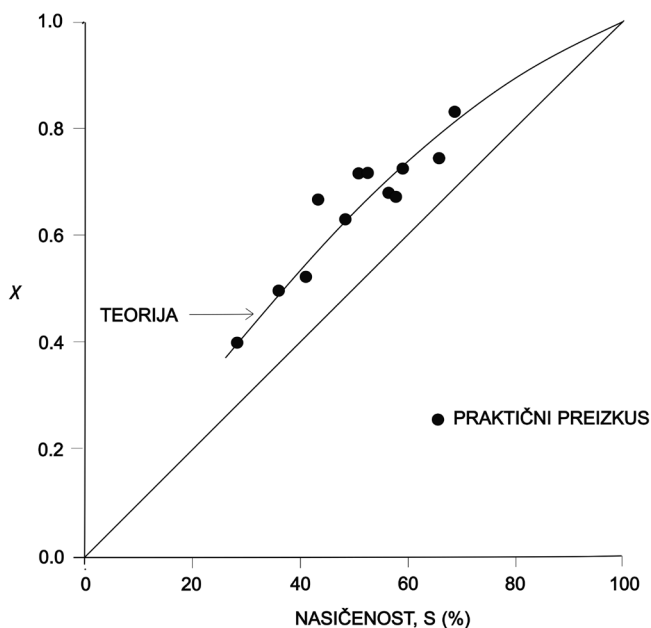
Efektivne napetosti (σ'_v) so enake razliki med totalnimi napetostmi (σ_v) in pornim tlakom (μ).

$$\sigma'_v \equiv \sigma'_{zz} = \sigma_v - \mu.$$

V deloma nasičenih zemljinah so pore zapolnjene z vodo in zrakom. Tako del napetosti odpade na zrna, del na vodo v porah ter del na zrak v porah. Pri nasičenosti plasti nad 85 % se zemljina obnaša zelo podobno kot pri 100-odstotni nasičenosti (Briaud 2013, 253, 254) (**Slika 2.2**). Ob nasičenosti, nižji od 85 %, je treba poleg efektivnih napetosti (σ') in tlaka porne vode (μ_w) upoštevati tlak pornega zraka (μ_a):

$$\sigma = \sigma' + \mu_a + \chi(\mu_a - \mu_w).$$

Pri tem je χ delež vode v zemljini in je pri suhih zemljinah enak 0, pri nasičenih zemljinah je enak 1, medtem ko so vmesne vrednosti odvisne od stopnje nasičenosti S (%).



Slika 2.2: Odnos med vrednostjo χ in nasičenostjo zemljine (Bishop et al., 1960; Das in Sobhan, 2013, 924, Slika 9.20).

2.3 Dodatne napetosti

Obremenjevanje zemljin povzroči nastanek dodatnih napetosti. Pri tem del obremenitve prevzamejo trdni delci, del pa voda v porah. Pri popolnoma suhi zemljini celotno obremenitev prevzamejo trdni delci. Prostornina zemljine se zmanjša na račun zmanjšanja por med trdnimi delci, zemljina pa se zgosti. Pri nasičeni zemljini obremenitve prevzame voda v porah, kar vodi v dvig vodnega pornega tlaka. Zaradi obremenitev se voda prične izcejati iz por. Iz zemljine se skupaj z vodo odvaja tudi dodaten porni tlak, obremenitve pa se postopno prenašajo na trdne delce. Posledično se trdni delci prerazporedijo v bolj gosto lego, prostornina zemljine pa se zmanjša. Če voda ne more odteči dovolj hitro, obtežbo v celoti prevzame voda v porah. Pri tem zemljina izgubi strižno trdnost, tako da pride do likvifikacije oz. utekočinjenja (Terzaghi, Peck in Mesri 1996, 102; Stanek in Turk 2008, 183-186).

Obremenjevanje zemljine torej vodi v spremembe napetostnega stanja, ki je vsota prvotnih napetosti in z obremenitvami povzročenih dodatnih napetosti. treba je vedeti, da se totalne napetosti s časom ne spreminjajo, spreminja se razmerje med efektivnimi napetostmi in pornim tlakom. Zaradi iztiskanja zraka in/ali izcejanja vode iz zemljine je porni tlak nižji, trdni delci so vse bolj zgoščeni in efektivne napetosti vse višje.

Ob vertikalnem obremenjevanju pravokotnega območja tal je spremembe napetosti v zemljini mogoče izračunati na osnovi Boussinesqove rešitve za točkovno obremenjevanje (Das in Sobhan 2012, 312). Pri tem

je treba upoštevati dimenzije oz. dolžino (L) in širino (B) obremenjenega območja ter vsiljeno silo (F), ki služijo za izračun napetosti na površini obremenjevanja (q) (Slika 2.3).

Boussinesqova rešitev za izračun napetosti v izbrani točki ob točkovnem obremenjevanju:

$$\Delta\sigma_x = \frac{P}{2\pi} \left\{ \frac{3x^2z}{L^5} - (1-2\nu) \left[\frac{x^2-y^2}{Lr^2(L+z)} + \frac{y^2z}{L^3r^2} \right] \right\};$$

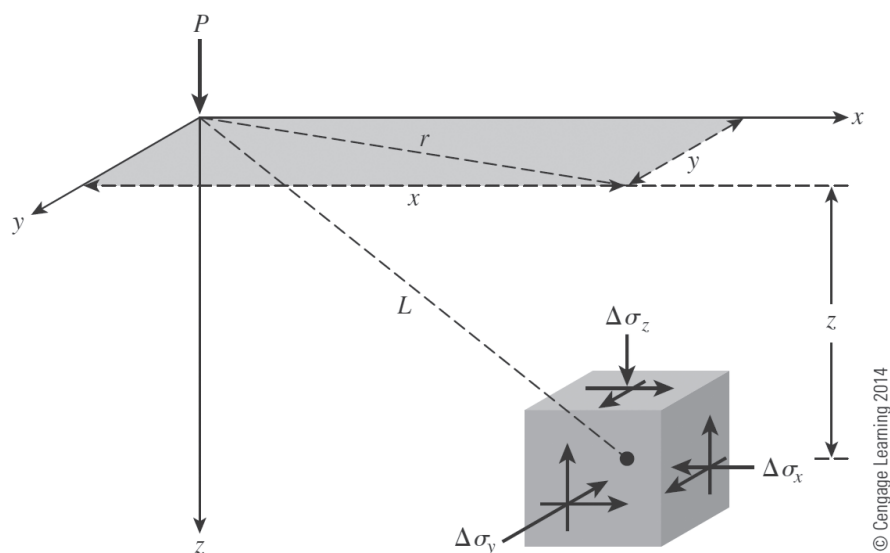
$$\Delta\sigma_y = \frac{P}{2\pi} \left\{ \frac{3y^2z}{L^5} - (1-2\nu) \left[\frac{y^2-x^2}{Lr^2(L+z)} + \frac{x^2z}{L^3r^2} \right] \right\};$$

$$\Delta\sigma_z = \frac{3Pz^3}{2\pi L^5} = \frac{3P}{2\pi} \frac{z^3}{(r^2+z^2)^{5/2}}.$$

Pri tem velja:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2};$$

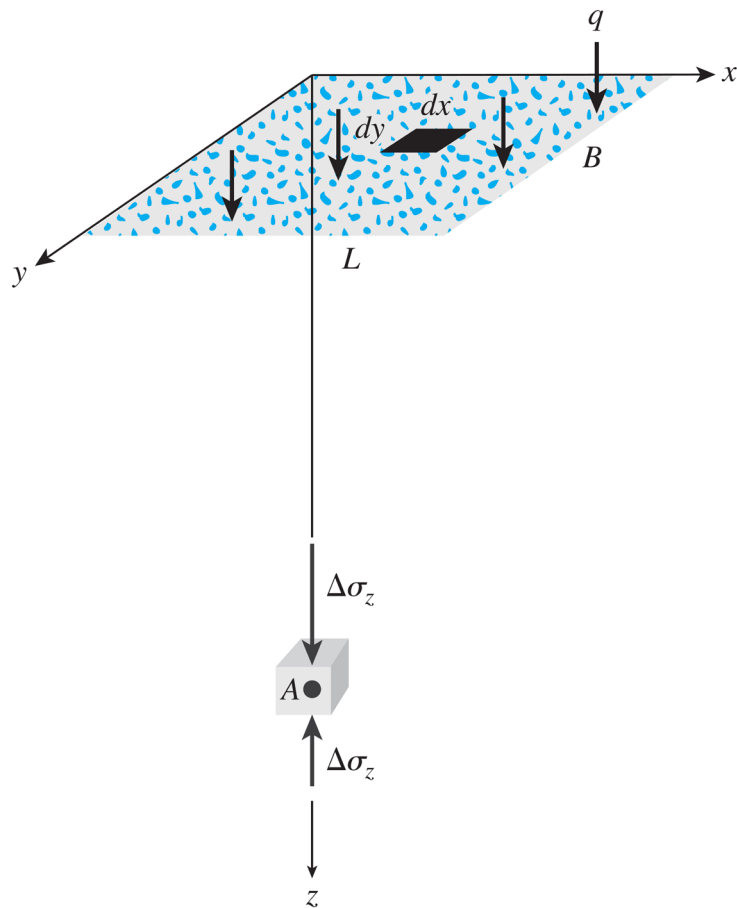
$$L = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = \sqrt{r^2 + z^2};$$



Slika 2.3: Shematski prikaz točkovnega obremenjevanja (Das in Sobhan 2013, 312, Slika 10.7).

Pri tem P predstavlja točkovno obremenitev, L razdaljo med izbrano točko in izvorom obremenitve, v Poissonov količnik, r horizontalno razdaljo med točko na površini in projekcijo izbrane točke v globini na površino ter x,y,z koordinate točke, v kateri želimo izračunati napetost.

Za izračun spremembe napetosti ob obremenjevanju pravokotnega območja sta predpostavljena točka A, ki leži pod vogalom območja obremenjevanja na globini z , ter območje elementa obremenjevanja $dx dy$ (Slika 2.4).



© Cengage Learning 2014

Slika 2.4: Shematski prikaz obremenjevanja pravokotnega območja (Das in Sobhan 2013, 336, Slika 10.25).

Obremenitev na izbranem elementu je podana kot:

$$dq = q \, dx \, dy.$$

Sprememba napetosti ($d\sigma_z$) v točki A, povzročena z obremenitvijo dq , je tako izračunana na osnovi enačbe za izračun spremembe v primeru točkovnega obremenjevanja:

$$\Delta\sigma_z = \frac{3Pz^3}{2\pi L^5} = \frac{3P}{2\pi} \frac{z^3}{(r^2 + z^2)^{5/2}},$$

Pri tem je P nadomeščen z $dq = q \, dx \, dy$ in r^2 z $x^2 + y^2$, torej:

$$d\sigma_z = \frac{3q \, dx \, dy \, z^3}{2\pi(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}}.$$

Z obremenitvijo pravokotnega območja povzročena sprememba napetosti je sedaj lahko izračunana z integralom:

$$\Delta\sigma_z = \int_{y=0}^B \int_{x=0}^L \frac{3qz^3(dx \, dy)}{2\pi(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} = qI_3.$$

Pri tem velja:

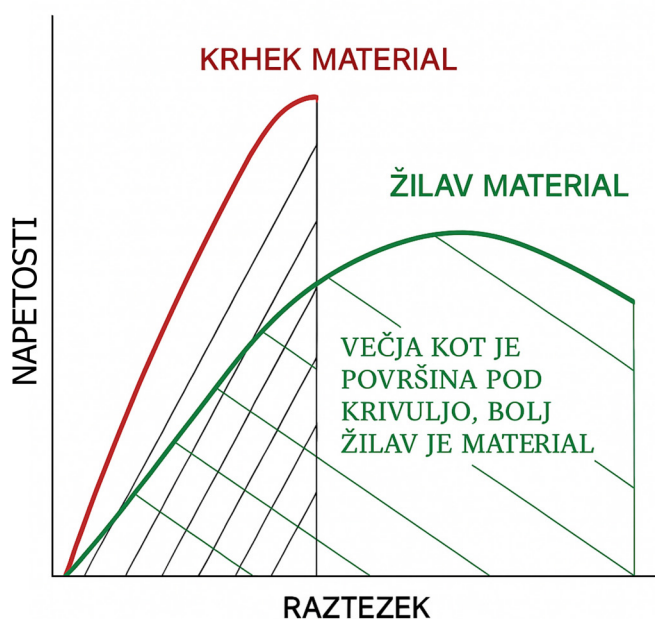
$$I_3 = \frac{1}{4\pi} \left[\frac{2mn\sqrt{m^2+n^2+1}}{m^2+n^2+m^2n^2+1} \left(\frac{m^2+n^2+2}{m^2+n^2+1} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{2mn\sqrt{m^2+n^2+1}}{m^2+n^2-m^2n^2+1} \right) \right];$$

$$m = \frac{B}{z}; \quad n = \frac{L}{z}.$$

3 Mehanika trdnih teles

Trdne snovi so sestavljene iz osnovnih gradnikov: atomov, ionov ali molekul. Njihova razporeditev je lahko urejena ali naključna ter snovi ločuje na amorfne (npr. steklo), kristalne (npr. minerali) in kristalaste (npr. kovine). V osnovi je za mehaniko trdnih teles pomembna struktura snovi, ki tvorijo materiale. Narekuje namreč izotropijo (enako obnašanje v vseh smereh) ali anizotropijo (različno obnašanje v različnih smereh). Izotropija je značilna predvsem za amorfne in kristalaste snovi, medtem ko je anizotropija značilnost kristalnih snovi (Srpčič 2003, 297-299; Stanek in Turk 2008, 128-132).

Nadalje je potrebno poznavanje mehanskih lastnosti materiala. Tipični mehanski lastnosti materialov sta odpornost proti zunanji sili ter sposobnost preoblikovanja. K prvi sodita trdnost in trdota, k drugi razteznost in duktilnost. Trdnost je definirana s trdnostjo na meji plastičnosti in maksimalno trdnostjo materiala. Trdota pomeni odpornost materiala proti razenju in je odvisna od kemijskih vezi med gradniki materiala. Razteznost materiala določa vrednost relativnega raztezka pri porušitvi materiala, duktilnost pa razmerje med deformacijami ob pretrgu na meji plastičnosti. Trdota, trdnost, razteznost in duktilnost skupaj tvorijo žilavost materiala, pri kateri gre za sposobnost absorpcije energije do zloma, pri čemer materiali z nizko žilavostjo veljajo za krhke, materiali z visoko žilavostjo pa za žilave (Slika 3.1).⁵



Slika 3.1: Graf napetosti in deformacij krhkega in žilavega materiala.

Ob izpostavljenosti mehanskim obremenitvam se napetostno stanje v materialu spremeni, material pa se deformira. Deformacije so lahko povratne oz. elastične ali nepovratne oz. plastične. Prevlada prvih pomeni krhek material, medtem ko prevlada drugih kaže na žilav material. Steklo in keramika sodita med krhke materiale, medtem ko je uvrstitev kosti in kovin sicer odvisna od njihovih lastnosti, a običajno sodijo med žilave

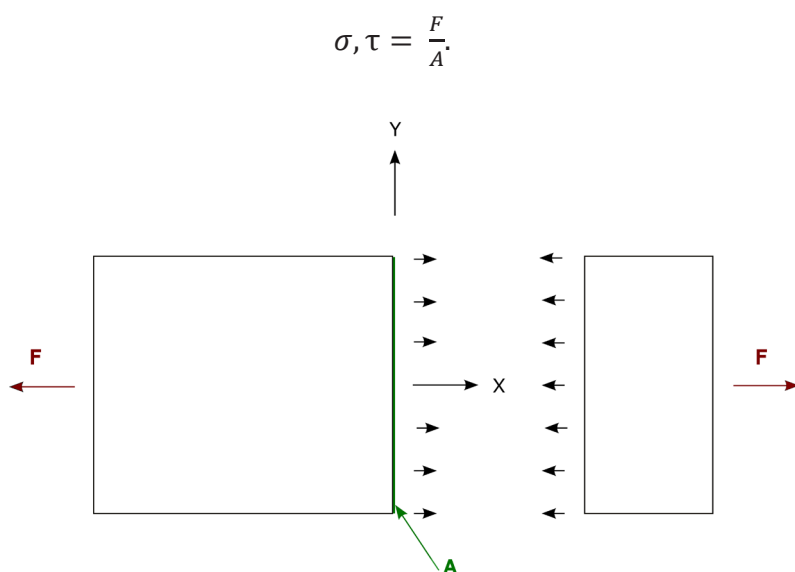
⁵ <http://www.zag.si/ajax/DownloadHandler.php?file=1553>; www.zag.si/ajax/DownloadHandler.php?file=1557;

materiale (Glavič 2006). Za razumevanje odziva materiala na obremenjevanje oz. posledičnih sprememb je tako potrebno razumevanje napetosti, deformacij in odnosa med njimi. Pri tem velja omeniti, da je bila v pričujoči raziskavi kljub uporabi anizotropnih materialov zaradi prevelike zahtevnosti anizotropija zanemarjena.

3.1 Napetosti

Mehanska napetost je sila na ploskovno enoto. Sestavljena je iz tlačne, natezne, upogibne, strižne in torzijske napetosti, ki se med seboj razlikujejo po smeri delovanja. V splošnem je napetost tenzor⁶ 2. reda,⁷ kar pomeni, da ima velikost in dve smeri. Največja možna napetost v danem materialu je izražena s trdnostjo oz. porušno napetostjo.

Pri enoosni obremenitvi materiala s silo F v smeri osi x je ob predpostavki, da se sila enakomerno razporedi po prečnem prerezu A , povprečna napetost na ravnino prečnega prereza A enaka količniku med silo F in ploščino ravnine A (Slika 3.2). Pravokotno na ravnino delujoče napetosti so normalne napetosti (σ), medtem ko so z ravnino vzporedno delujoče napetosti strižne napetosti (τ):⁸



Slika 3.2: Shematski prikaz delovanja sile F v smeri osi x na prečni prerez A .

Izbira usmerjenosti prečnega prereza oz. ravnine je popolnoma arbitrarna, zato je lahko usmerjenost ravnine tudi drugačna od smeri delovanja sil. Denimo, koordinatni sistem n - t je postavljen pod poljubnim kotom β glede na smer delovanja sil. Vektor sile F je razdeljen na dve komponenti F_n in F_t , ki sta usmerjeni normalno ter vzporedno glede na izbrano ravnino B (Slika 3.3). Na ravnini B obstajajo normalne in strižne napetosti. Povprečna normalna napetost σ je usmerjena v smeri osi n , povprečna strižna napetost τ pa v smeri osi t :^{9,10}

$$\sigma = \frac{F_n}{B} \text{ in } \tau = \frac{F_t}{B}.$$

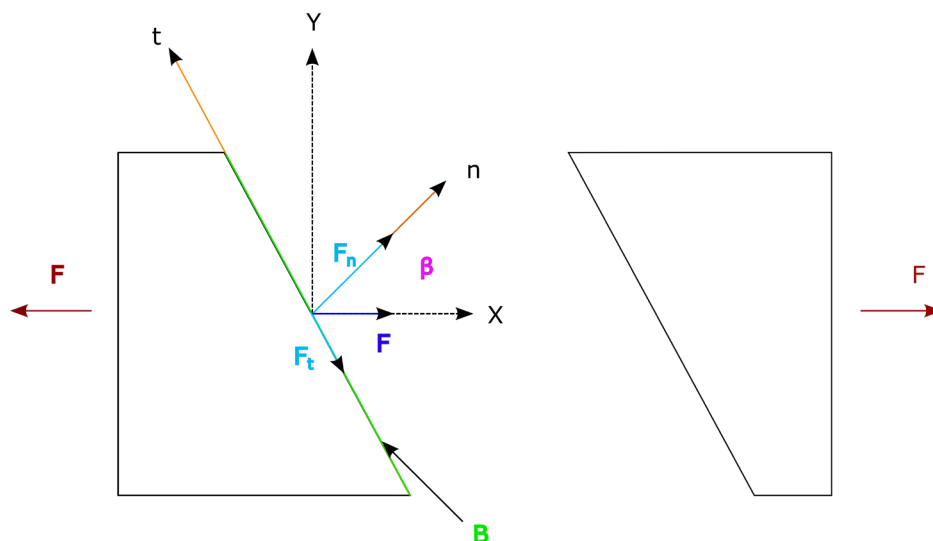
⁶ Količina, ki jo lahko izrazimo s kvadratno matriko števil.

⁷ Tenzorji so razvrščeni v: tenzorje reda 0 – skalarji, količine, ki imajo velikost, vendar ne smeri, denimo temperatura in masa; tenzorje reda 1 – vektorji, ki imajo velikost in smer, denimo sila in hitrost; tenzorje reda 2 – imajo velikost in dve smeri, denimo napetosti in deformacije.

⁸ http://www.omega.com/techref/pdf/StrainGage_Measurement.pdf.

⁹ Opozoriti je treba, da je bil na komponente razdeljen vektor sile (F) in ne napetosti. Napetosti imajo resda velikost in smer, vendar niso vektorji. Poleg tega napetosti niso neposredno merljive, njihov izračun pa temelji na drugih merljivih količinah.

¹⁰ http://www.omega.com/techref/pdf/StrainGage_Measurement.pdf.



Slika 3.3: Shematski prikaz delovanja sile F v smeri osi x na prečni prerez B .

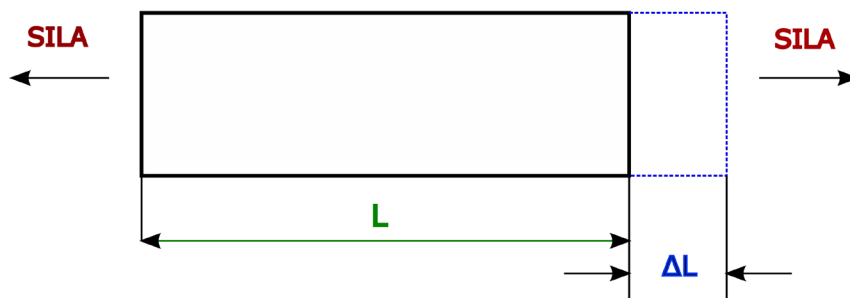
3.2 Deformacije

Zaradi učinkovanja zunanje sile na telo se to deformira oz. spremeni obliko ali prostornino. Zunanja sila povzroči premik atomov in s tem poruši ravnovesje sil v telesu. Porušitev ravnovesja vodi v nastanek notranjih sil kot posledice delovanja sil atomov, ki odpravljajo premaknjene atome nazaj v njihov prvotni položaj. Ker premaknjeni atomi pritiskajo tudi na atome, ki niso neposredno premaknjeni, se z zunanjo silo nastale napetosti in deformacije prenesejo na celotno telo. Deformacija telesa je tolikšna, da mehanska napetost v telesu uravnovesi zunanjo silo, ki deformacijo povzroča (Kladnik 1989, 132).

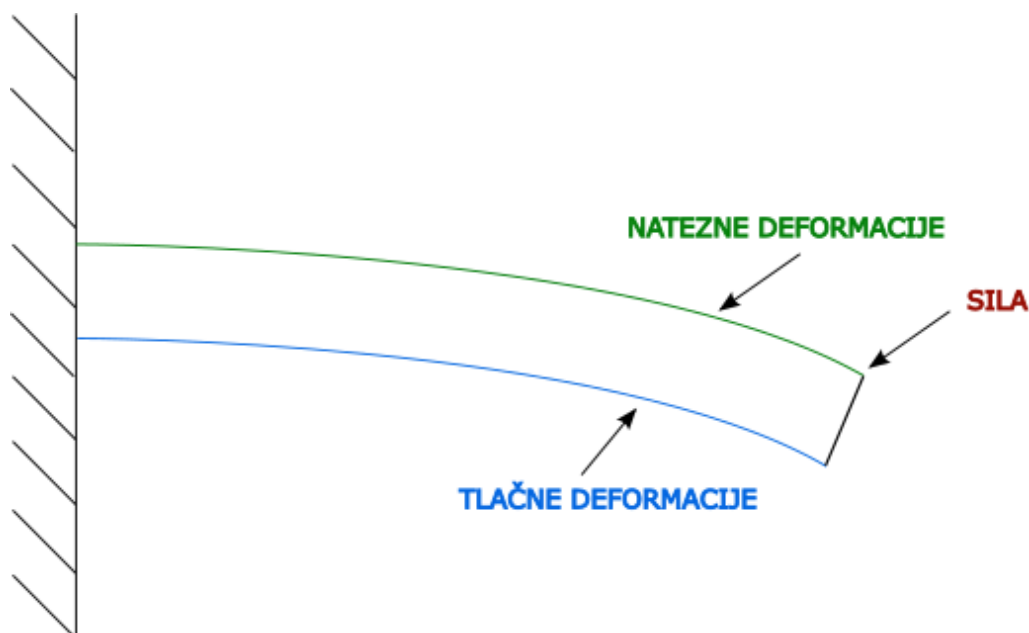
Glede na smer delovanja zunanje sile so deformacije natezne, tlačne ali strižne. Delovanje zunanje sile pravokotno na obremenjeno telo povzroča stiskanje telesa in s tem tlačne deformacije. Delovanje zunanje sile pravokotno ven iz ploskve telesa povzroča natezne deformacije. Delovanje zunanje sile vzporedno s ploskvijo telesa povzroča strižne deformacije. Tlačne in natezne deformacije običajno vodijo v spremembe prostornine, medtem ko strižne deformacije povzročijo spremembo oblike telesa (Kladnik 1989, 133).

Deformacije (ϵ) merimo s pomočjo spremembe dimenzij telesa z raztezanjem ali krčenjem (Sliki 3.4–3.5). Ker je raztezek oz. skrčec premo sorazmeren s prvotno dolžino telesa, deformacije predstavljajo brezdimenzijsko razmerje (Kladnik 1989, 133):

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L}.$$



Slika 3.4: Shematski prikaz nateznih deformacij.



Slika 3.5: Shematski prikaz sočasnega nastanka nateznih in tlačnih deformacij.

Deformacije so natezne (pozitivne), tlačne (negativne) in strižne (sprememba kota). Izražene so z enotami dolžine ali kot delež. Denimo: $\varepsilon = 0,1 \% = 0,001$, kar pomeni razteg 1 m dolge stranice za 0,001 m oz. 1 mm. Ob nateznih in tlačnih deformacijah pride tudi do spremembe relativne prostornine, ki je enaka vsoti relativnih raztezkov oz. skrčkov vseh stranic telesa (Kladnik 1989, 133):

$$\frac{\Delta V}{V} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z.$$

Pri izotropnih telesih so relativni raztezki oz. skrčki v smeri posameznih koordinat enaki, zato velja, da je relativna sprememba prostornine enaka trikratnemu relativnemu raztezkul dolžine (Kladnik 1989, 133):

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z = \varepsilon,$$

$$\frac{\Delta V}{V} = 3\varepsilon.$$

Podobno velja za spremembo površine ploskve telesa. Ta je enaka vsoti relativnih raztezkov oz. skrčkov obeh stranic ploskve (Kladnik 1989, 133):

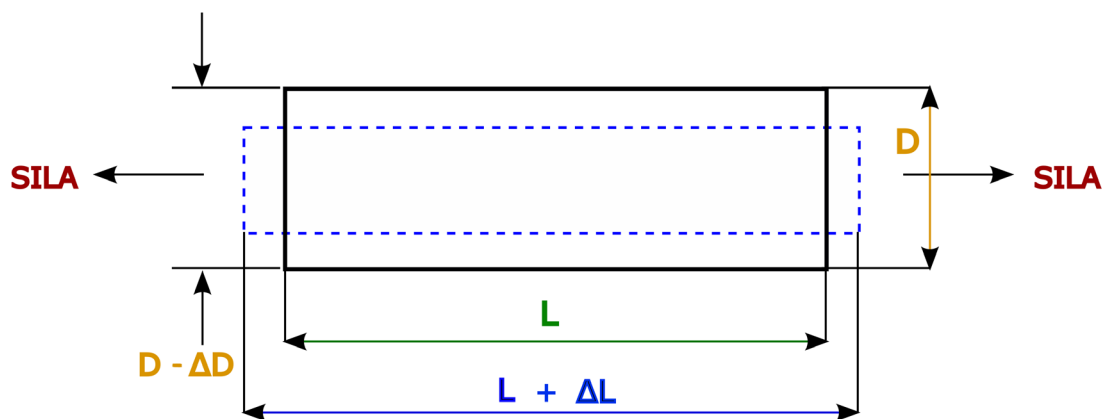
$$\frac{\Delta S}{S} = \varepsilon_y + \varepsilon_z,$$

$$\frac{\Delta S}{S} = 2\varepsilon.$$

Ker se lahko deformacije pojavijo v več dimenzijah hkrati, denimo ob spremembah dolžine pride tudi do spremembe širine ali oboda, je potrebna vpeljava Poissonovih deformacij. Te so pravokotne glede na obremenitveno silo in nastanejo zaradi Poissonovega količnika ν (Slika 3.6). Količnik je definiran kot negativni količnik deformacije, pravokoten glede na vzdolžno deformacijo:¹¹

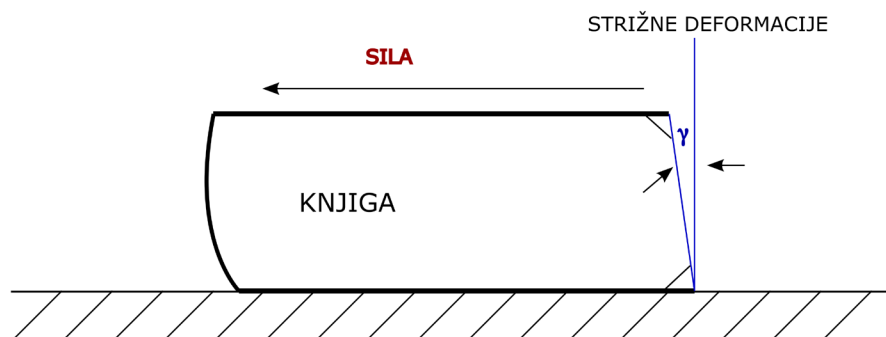
$$\nu = -\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_1}.$$

¹¹ http://www.omega.com/techref/pdf/StrainGage_Measurement.pdf.



Slika 3.6: Shematski prikaz deformacij v dveh dimenzijah telesa.

Poleg nateznih in tlačnih deformacij se lahko pojavijo še strižne deformacije oz. spremembe kota (Slika 3.7). Strižne deformacije (γ) so definirane s spremembo radiana kota med linijama, ki sta bili pred deformacijo pravokotni.¹²

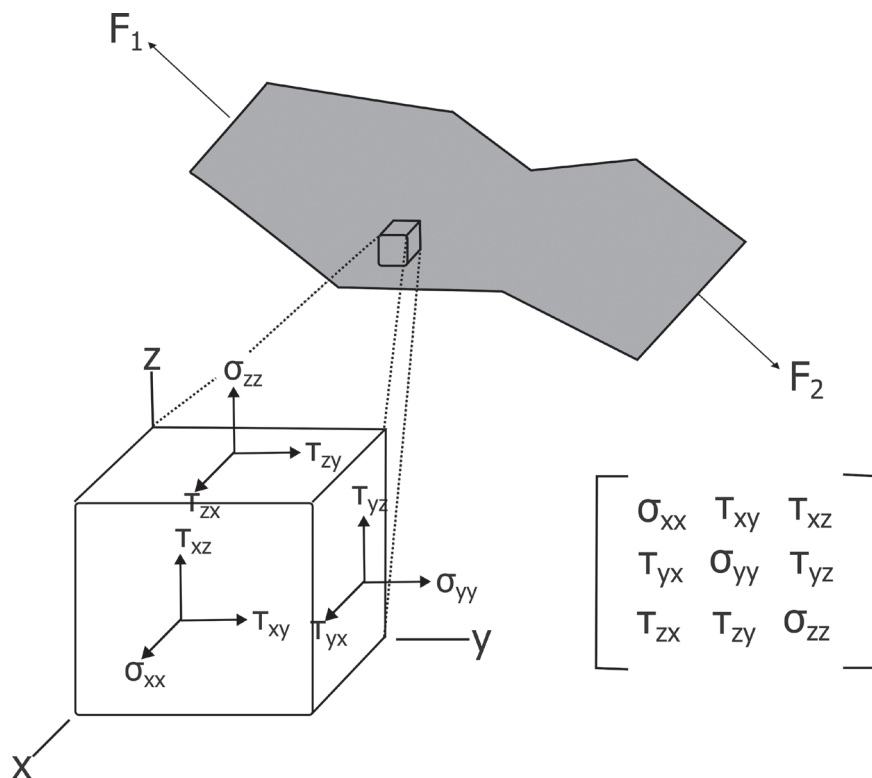


Slika 3.7: Shematski prikaz strižnih deformacij.

3.3 Zveza med napetostmi in deformacijami

Ob obremenitvah materiala z zunanjo silo na vsako površino delčka obravnavanega telesa delujejo tri napetosti: ena normalna (v smeri osi ravnine) in dve strižni (vzporedno z osjo ravnine, pravokotno druga na drugo) (Slika 3.8). Z vpeljavo ravnotežnega stanja na vsak delček obravnavanega telesa deluje 6 ločenih napetosti: $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}, \tau_{zx} = \tau_{xz}$.

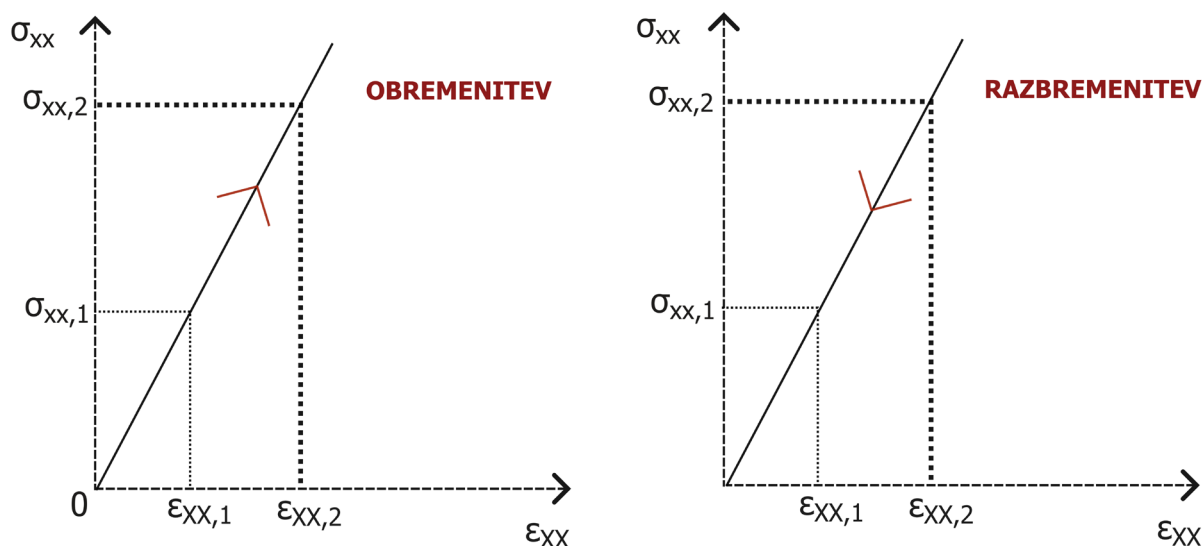
¹² Glej prejšnjo opombo.



Slika 3.8: Shematski prikaz delovanja napetosti na obravnavani delček telesa.¹³

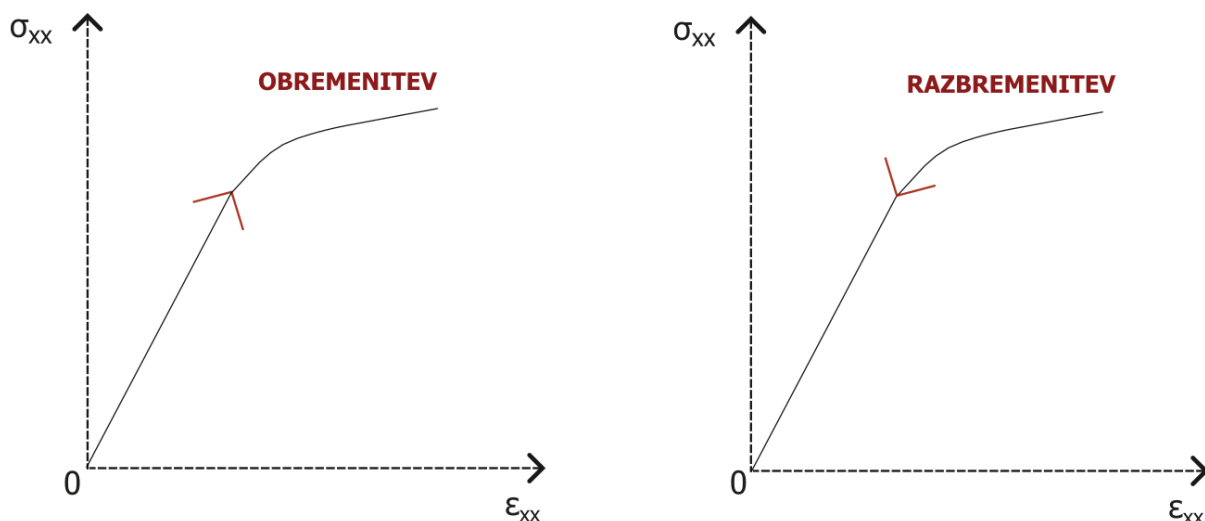
Napetosti povzročijo nastanek deformacij, ki so lahko povratne – linearne ali nelinearne elastične (ϵ_e) – ali nepovratne – plastične (ϵ_p) (Stanek in Turk 2008, 129).

Pri obremenjevanju in razbremenjevanju znotraj območja elastičnosti razbremenitev poteka po enaki poti kot obremenitev. Material se pri tem vrne v nedeformirano stanje, deformacije ob koncu razbremenitve pa so enake nič. Če je pri obremenitvah in razbremenitvah zveza med napetostjo in deformacijo linearna, je material linearno elastičen (Slika 3.9), sicer je nelinearno elastičen (Slika 3.10) (Stanek in Turk 2008, 132).



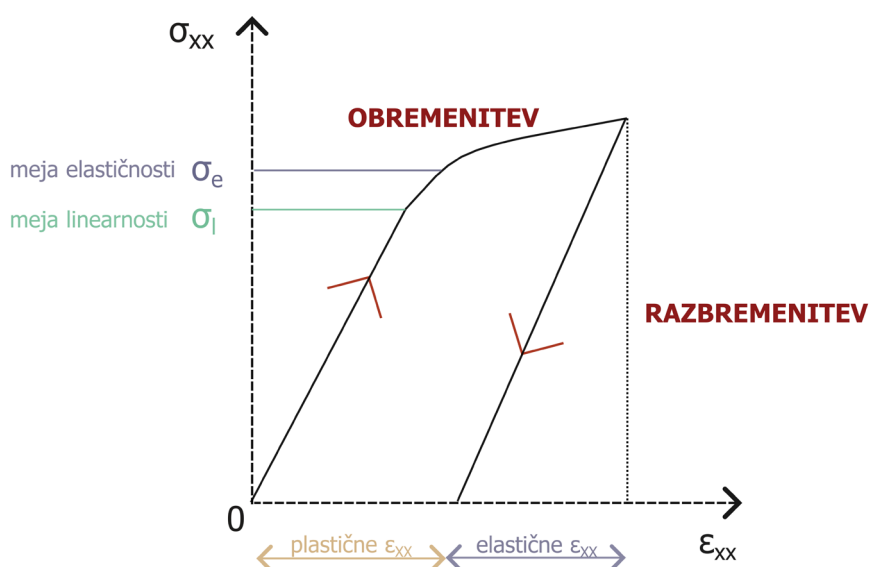
Slika 3.9: Graf napetosti in deformacij v primeru linearnih elastičnih deformacij.

¹³ <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Mechanical/StressStrain.htm>.



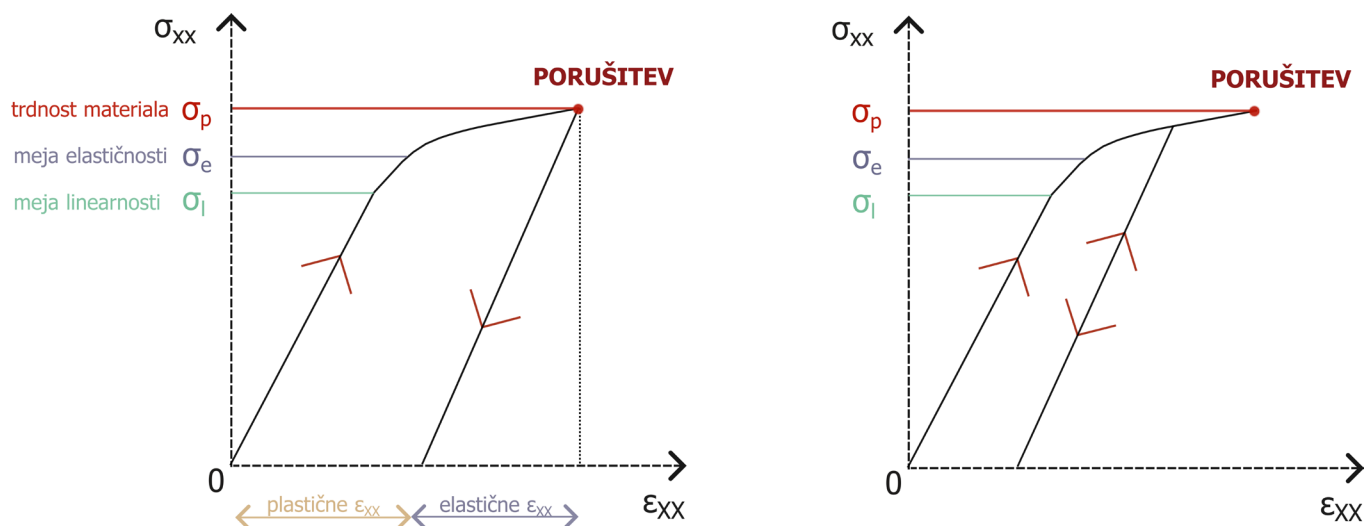
Slika 3.10: Graf napetosti in deformacij v primeru nelinearnih elastičnih deformacij.

Kadar se material ob razbremenitvi ne povrne v začetno stanje, govorimo o plastičnih deformacijah. Pri razbremenitvi se namreč povrne le elastični del deformacije, medtem ko plastični del ostane (Slika 3.11) (Stanek in Turk 2008, 134).



Slika 3.11: Graf napetosti in deformacij v primeru elastično plastičnih deformacij.

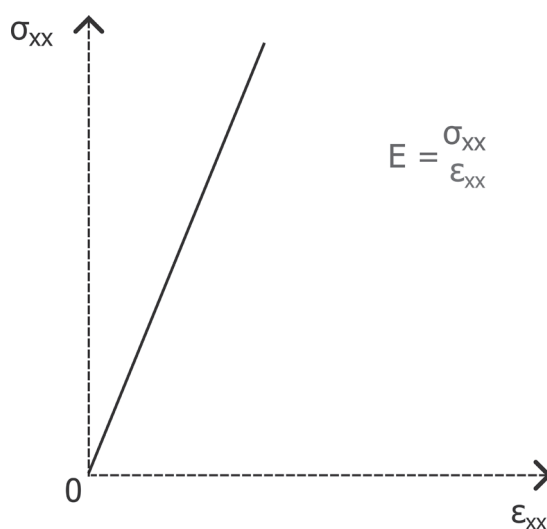
Ob dovolj majhnih obremenitvah se skoraj vsak material obnaša linearno elastično. To pomeni, da je napetost linearno odvisna od deformacije. Deformacija raste premo sorazmerno z napetostjo vse do meje linearnosti (σ_l). Z rastjo napetosti zveza med napetostjo in deformacijo preide v nelinearno. Deformacija je pri razbremenitvi povratna tako ob linearni kot nelinearni elastičnosti. Deformacija postane nepovratna, ko napetosti presežejo mejo elastičnosti (σ_e) in nastopijo plastične deformacije. Ob razbremenjevanju po preseženi meji elastičnosti zveza med napetostjo in deformacijo ne poteka več enako kot med obremenjevanjem, temveč vzporedno. Pri dovolj veliki obremenitvi lahko napetosti presežejo porušno napetost (σ_p) oz. trdnost materiala, pri čemer se material poruši (Slika 3.12). Napetost, pri kateri se material poruši, izraža trdnost materiala (Stanek in Turk 2008, 134, 189).



Slika 3.12: Graf napetosti in deformacij v primeru porušitve materiala.

Znotraj območja linearne elastičnosti velja Hookov zakon,¹⁴ pri čemer je razmerje med napetostjo in vzdolžno deformacijo (ϵ_{xx}) modul elastičnosti (E).¹⁵ Za izotropne materiale velja enoosna obremenitev za vsako smer pravokotnega koordinatnega sistema (Sliki 3.13–3.14):

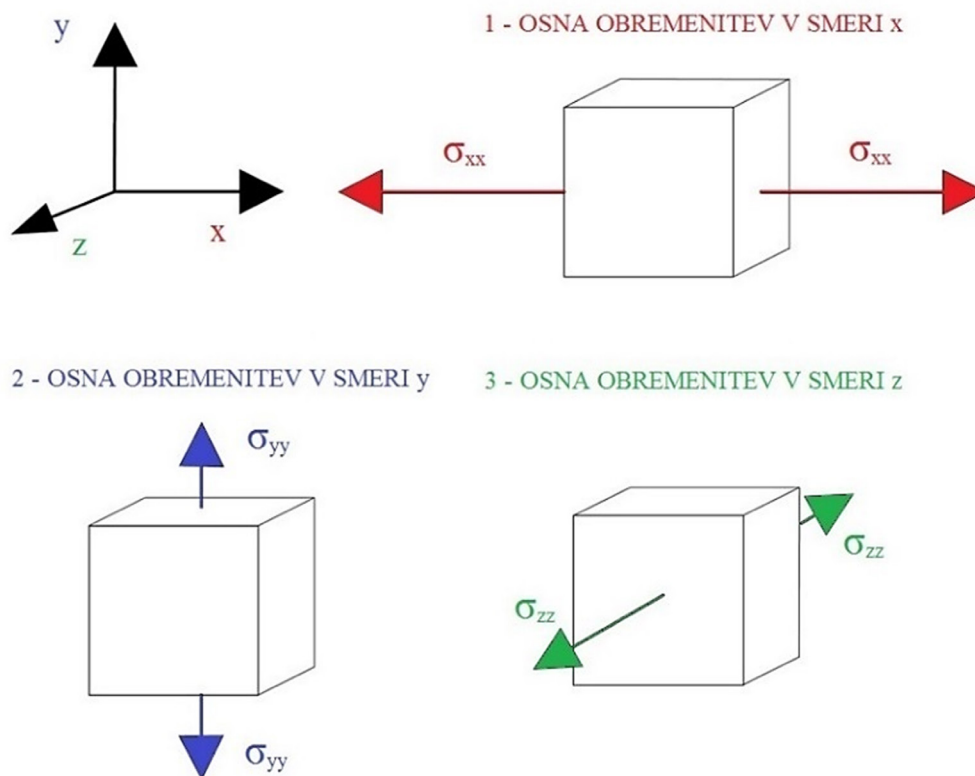
$$E = \frac{\sigma_{xx}}{\epsilon_{xx}}; E = \frac{\sigma_{yy}}{\epsilon_{yy}}; E = \frac{\sigma_{zz}}{\epsilon_{zz}}.$$



Slika 3.13: Graf napetosti in deformacij na osi x.

14 Območje veljavnosti Hookovega zakona je zamejeno z največjo deformacijo, pri kateri je napetost še premo sorazmerna z deformacijo (Kladnik 1989, 138).

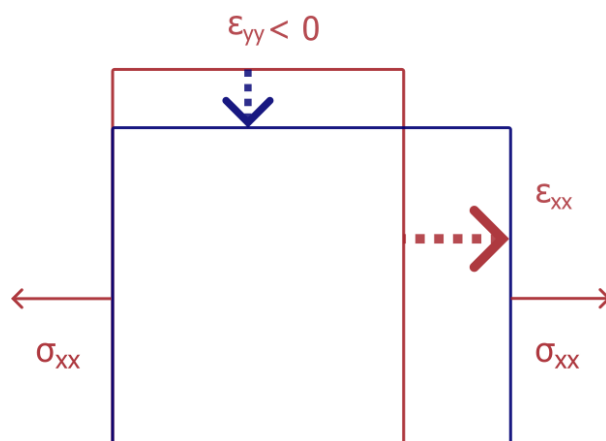
15 Modul elastičnosti je merilo elastične togosti telesa. Večji kot je modul elastičnosti, manjša je deformacija pri dani napetosti. Velik modul elastičnosti je značilen za težko raztegljive in stisljive materiale, denimo jeklo, majhen pa za lahko raztegljive in stisljive materiale, npr. gumo (Kladnik 1989, 137).



Slika 3.14: Osne obremenitve v smeri x, y in z (prirejeno po Špacapan 2008, 89, Slika 7).

Razmerje med prečno in vzdolžno deformacijo pri enoosni obremenitvi je definirano s Poissonovim količnikom prečne kontrakcije (Slika 3.15):

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{yy}}{\varepsilon_{xx}} = -\frac{\varepsilon_{zz}}{\varepsilon_{xx}}.$$



Slika 3.15: Shematski prikaz definicije Poissonovega količnika pri enoosni obremenitvi (prirejeno po Špacapan 2008, 87, Slika 5).

Razmerje med strižnimi napetostmi (τ) in strižnimi deformacijami (γ) je izraženo s strižnim modulom G , ki je enak tangensu naklonskega kota τ - γ in je v izotropnem materialu enak za vse smeri:

$$\tau_{xy} = \tan(\beta)\gamma_{xy} = G\gamma_{xy} = 2G\varepsilon_{xy}; \tau_{xz} = \tan(\beta)\gamma_{xz} = G\gamma_{xz} = 2G\varepsilon_{xz}; \tau_{yz} = \tan(\beta)\gamma_{yz} = G\gamma_{yz} = 2G\varepsilon_{yz}.$$

Ker strižne napetosti ne vplivajo na normalne deformacije in obratno ter ker strig v eni ravnini ne vpliva na deformaciji v drugi, podane enačbe v celoti definirajo zveze med strižnimi napetostmi in deformacijami v vseh treh smereh, torej v splošnem napetostno deformacijskem stanju.

Nasprotno so normalne napetosti in deformacije med seboj odvisne in so v 3D prostoru izpeljane s superpozicijo enoosnih obremenitev. Apliciranje sile in posledične napetosti v smeri osi x, y in z povzroči deformacije:

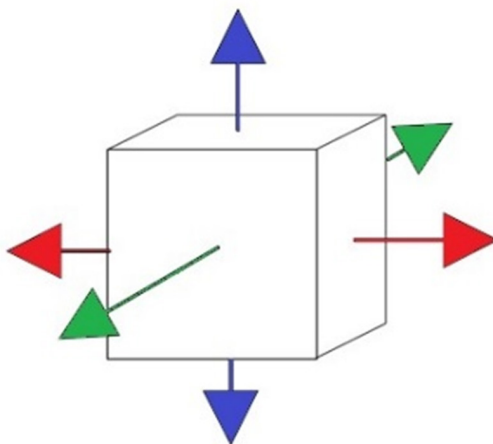
$$\begin{aligned}\varepsilon_{xx} &= \frac{\sigma_{xx}}{E}, \varepsilon_{yy} = -\frac{\nu\sigma_{xx}}{E}, \varepsilon_{zz} = -\frac{\nu\sigma_{xx}}{E}, \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{\sigma_{yy}}{E}, \varepsilon_{xx} = -\frac{\nu\sigma_{yy}}{E}, \varepsilon_{zz} = -\frac{\nu\sigma_{yy}}{E}, \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{\sigma_{zz}}{E}, \varepsilon_{xx} = -\frac{\nu\sigma_{zz}}{E}, \varepsilon_{yy} = -\frac{\nu\sigma_{zz}}{E}.\end{aligned}$$

Ob delovanju sile v vseh treh osnih smereh hkrati so napetosti vsota vseh treh napetosti (σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz}) (Slika 3.16). Ob predpostavljeni linearni elastičnosti so deformacije enake seštevku deformacij posamezne osne obremenitve:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xx} &= \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{xx} = \frac{\sigma_{xx}}{E} - \frac{\nu\sigma_{yy}}{E} - \frac{\nu\sigma_{zz}}{E} = \frac{1}{E}(\sigma_{xx} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})), \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{1}{E}(\sigma_{yy} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{zz})), \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{1}{E}(\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})).\end{aligned}$$

$$1 + 2 + 3 =$$

PROSTORSKA OBREMENITEV Z
GLAVNIMI NAPETOSTMI



Slika 3.16: Shematski prikaz prostorskih obremenitev (prirejeno po Špacapan 2008, 89, Slika 7).

4 Preiskave

Z namenom preučevanja vplivov mehanskih obremenitev na arheološke ostaline smo izvedli serijo preizkusov, ki so vključevali dilatometriške in porušne preiskave z uporabo uporovnih merilnih lističev, osnove katerih so predstavljene v nadaljevanju.

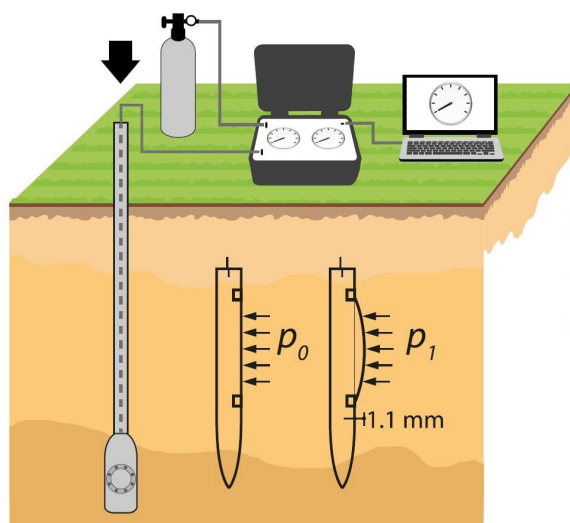
4.1 Dilatometriška preiskava

Dilatometriška preiskava je statični deformacijski test *in situ*, ki s pomočjo standardiziranih deformacij pločevinaste membrane na sondi omogoča meritve tlaka v tleh. Preiskava je primerna za večino vrst zemljin, z izjemo grobozrnatih nekonherentnih materialov, denimo debelega peska ali gramoza. Rezultati preiskave v osnovi omogočajo določitev modula stisljivosti (M_{DMT}) tal, ki je definiran z razmerjem med spremembo tlaka (p) in posledično spremembo prostornine ($\frac{\Delta p}{\Delta V/V}$) oz. odpornosti tal na posedanje. Z nadaljnjimi korelacijami je mogoče pridobiti tudi številne druge lastnosti, kot so efektivne napetosti (σ'), porni tlak (μ) in prostorninska teža zemljine (γ) (Gaberc et al. 2004, 165, 166).

Preiskave potekajo s kontinuiranim vertikalnim vtiskovanjem sonde v tla in bočnimi meritvami tlaka na željenih globinah (Slika 4.1). Na vsaki globini so opravljeni trije odčitki (Gaberc et al. 2004, 167):

1. Odčitek – A: tlak izravnave pločevinaste membrane oz. izenačenja s tlakom zemljine,
2. Odčitek – B: tlak izbočenja središča membrane za 1,1 mm,
3. Odčitek – C:¹⁶ tlak razbremenitve membrane v položaj A.

Zbrani in na osnovi kalibracije sonde korigirani rezultati meritev omogočajo izmero osnovnih dilatometriških količin, ki služijo nadaljnjim izračunom za določitev lastnosti zemljine (Gaberc et al., 2004, 168, Preglednica 1).



Slika 4.1: Shematski prikaz dilatometriškega preizkusa (Gaberc et al. 2004, 166, Slika 1).

¹⁶ Odčitek C ni nujen za potrebe vrednotenja osnovnih elementov. Njegova namembnost je izmera tlaka vode v tleh in tako ocena drenažne sposobnosti tal.

4.2 Porušne preiskave

Porušne preiskave omogočajo pridobitev podatkov o lastnostih materiala, kot so trdnost, meja elastičnosti, modul elastičnosti, duktilnost, odpornost, žilavost in Poissonov količnik. Preiskave temeljijo na nadzorovanem enosmernem obremenjevanju preizkušanca, običajno do njegove porušitve. Z obremenjevanjem je preizkušanec podvržen napetostim, ki povzročijo deformacije. Pridobljeni podatki o velikosti obremenitev ter napetostih in deformacijah so osnova za določitev lastnosti obravnavanega materiala (Hanžič, Ivanič in Mautinger, 2008, 8, 9).¹⁷ Obstaja več vrst porušnih preiskav, pri čemer izbira temelji na materialu in namenu preiskave. Za potrebe pričujoče raziskave je bila za določitev lastnosti kovin uporabljena natezna preiskava, medtem ko so bile lastnosti kosti in keramike določene s tritočkovno upogibno preiskavo.

Za potrebe nateznih preiskav so uporabljeni geometrijsko pravilno oblikovani preizkušanci, vpeti v klešče trgalnega stroja. Predpisana oblika narekuje ožji osrednji in opazovani del preizkušanca ter širša konca preizkušanca, vpeta v napravo. S tem sta zagotovljeni koncentracija napetosti in deformacij ter posledična porušitev preizkušanca v osrednjem, opazovanem delu. Preizkus poteka z nadzorovanim raztezanjem preizkušanca, pri čemer so beležene spremembe njegovih dimenzij oz. deformacije v odvisnosti od obremenitev oz. napetosti (Hanžič, Ivanič in Mautinger 2008, 8, 9).¹⁸

Z upoštevanjem geometrijske oblike preizkušanca pridobljeni podatki o velikosti obremenitev, napetosti in deformacijah omogočajo določitev lastnosti materiala. Sile (F) obremenjevanja ter dimenzije preizkušanca služijo izračunu napetosti med obremenjevanjem:

$$\sigma = \frac{\text{sila} - F \text{ (N)}}{\text{začetni prerez} - A \text{ (mm}^2\text{)}}.$$

Deformacije je mogoče izračunati na osnovi primerjave dolžine preizkušanca pred in po obremenjevanju:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L \text{ (sprememba dolžine preizkušanca)}}{L \text{ (začetna dolžina preizkušanca)}}.$$

V linearnem območju so napetosti in deformacije premo sorazmerne in velja Hookov zakon, ki omogoča izračun modula elastičnosti:

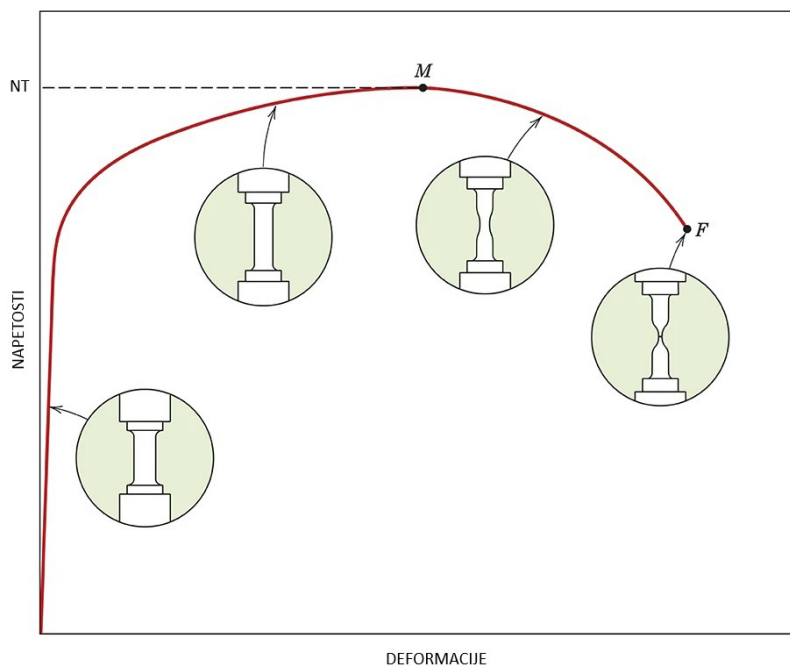
$$E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}.$$

Točka največjih napetosti predstavlja trdnost preizkušanca (**Slika 4.2**).¹⁹

¹⁷ <http://www.metu.edu.tr/~rgurbuz/Courses/MetE206.pdf>.

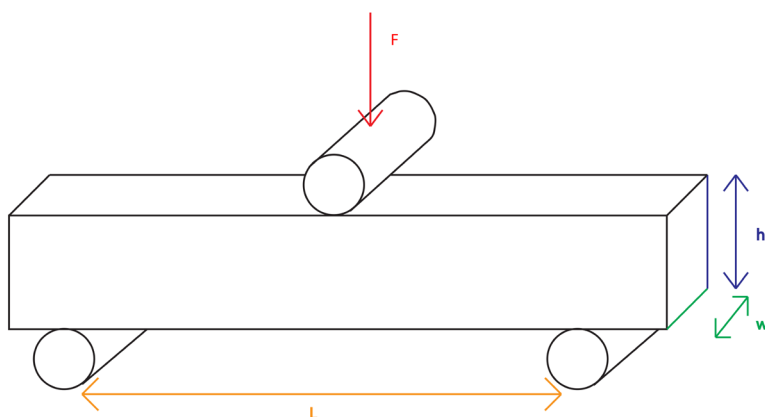
¹⁸ Glej prejšnjo opombo.

¹⁹ <http://www.metu.edu.tr/~rgurbuz/Courses/MetE206.pdf>.



Slika 4.2: Tipično obnašanje preizkušanca ob nateznem preizkusu.
NT – natezna trdnost preizkušanca pri največjih napetostih, doseženih v točki M.

Pri tritočkovnem upogibnem preizkusu je geometrijsko pravilno oblikovan preizkušanec nameščen na dva nosilca, s preizkušancu primerno medsebojno oddaljenostjo. Preizkušanec je obremenjen z vertikalno silo, in sicer na sredinski točki med nosilcema (Slika 4.3). Obremenitve povzročijo upogib preizkušanca, ki se krči v zgornjem in razteza v spodnjem delu. Posledično je zgornji del preizkušanca podvržen tlačnim, spodnji del pa nateznim napetostim in deformacijam (Hanžič, Ivanič in Mautinger 2008, 12).



Slika 4.3: Shematski prikaz tritočkovnega upogibnega preizkusa.

4.3 Uporovni merilni lističi

Uporovni merilni lističi delujejo na osnovi upora oz. njegovih sprememb in služijo za merjenje mehanskih deformacij materiala. Togo pritrjeni na površino preizkušanca se odzivajo na spremembe dimenzij obremenjenega materiala:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}.$$

Uporovni merilni listič deluje na podlagi kačasto navite kovinske žice ali kovinske folije. Z obremenjevanjem povzročene deformacije vodijo v spremembe dimenzij žice/folije in posledično spremembo upora (Slika 4.4).

Spremembe upora so izmerjene prek električnega vezja, običajno Wheatstonovega mostu.²⁰ Ta je na začetku uravnovešen, tako da je tok skozi drsnikovo vejo enak nič. Ob preoblikovanju kovinske žice/folije se ravnovesje mostu poruši in skozi drsnikovo vejo steče tok. Večja kot je deformacija žice/folije, večji je tok (DEU²¹ 2007).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta R / R}{K}.$$

R = upornost merilnega lističa;

ΔR = sprememba upornosti zaradi deformacije,

K = faktor uporovnega merilnega lističa.²² 5):



Slika 4.4: Shematski prikaz enojnega uporovnega merilnega lističa.

Uporovni merilni lističi so lahko različnih oblik. Osnova je samostojni element, ki meri deformacije v eni smeri. Meritvam deformacij v več smereh služijo lističi, sestavljeni iz dveh ali treh elementov, nameščenih pod različnimi koti. Poleg števila in orientacije elementov so lahko različne tudi dimenzije lističev. Njihova dolžina običajno niha med 0,2 mm in 120 mm, izbira pa je prilagojena strukturi materiala. Za homogene kristalaste in amorfne materiale so primerne minimalne dolžine, medtem ko kompozitna struktura betona zahteva večje dolžine. Raznolika je lahko tudi širina lističev, ki je prilagojena predvsem dimenzijam preizkušancev.

V naši raziskavi smo uporabili merilne lističe z enim in tremi elementi. S prvimi smo merili napetosti na kovini, z drugimi pa na napetosti na keramiki, kosteh in steklu.

Za enojni merilni listič v izotropnem napetostnem stanju velja:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma,$$

$$\tau_{xy} = 0.$$

Normalne napetosti na mestu uporovnega merilnega lističa, nameščenega v katerikoli smeri, so izračunane z enačbo:

$$\sigma = \frac{E\varepsilon}{1-\nu}.$$

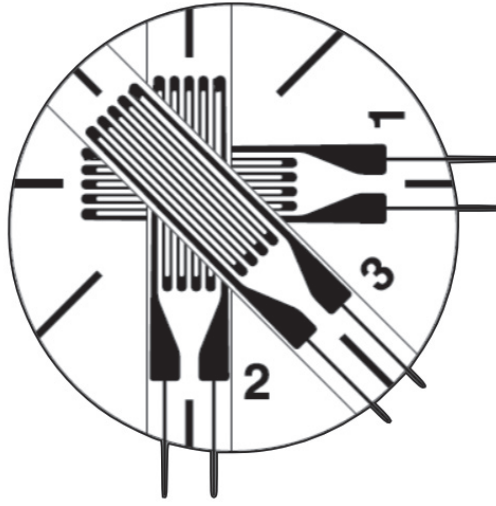
Uporovni merilni lističi iz treh elementov (Slika 4.5), nameščenih pod kotom 45 ° in 90 °, omogočajo meritve ravninskih deformacij v treh smereh ter tako izračun normalnih napetosti in deformacij v katerikoli smeri (TML,²³ 5):

20 Električno vezje, ki omogoča natančno izmero neznanega upora.

21 Dokuz Eylül Üniversitesi, Automatic Control Lab of Mechanical Engineering Department.

22 Faktor je podal proizvajalec in temelji na materialnih lastnostih merilnega lističa oz. žice ali folije. Običajne vrednosti so med 1 in 200, pri čemer velja, da višji faktor pomeni boljšo kvaliteto.

23 Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd.



Slika 4.5: Shematski prikaz trojnega merilnega lističa.

Os 1 = ε_1 ; Os 2, pod kotom 90° glede na prvo os = ε_2 ; Os 3, pod kotom 45° glede na prvo in drugo os = ε_3 .

Glavne deformacije so izračunane na osnovi enačb:

$$\varepsilon_{max} = \frac{1}{2} [\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \sqrt{2\{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2\}}],$$

$$\varepsilon_{min} = \frac{1}{2} [\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \sqrt{2\{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2\}}],$$

$$\gamma = \sqrt{2\{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2\}}.$$

Usmerjenost glavnih deformacij je mogoče pridobiti z izračunom kota $\emptyset$, ki predstavlja kot med osjo 1 in osjo glavne deformacije:

$$\emptyset = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left\{ \frac{2\varepsilon_3 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \right\}.$$

Če je $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$, je kot maksimalne glavne deformacije obrnjen za $\emptyset$ v smeri urinega kazalca glede na os 1 (ε_1). Minimalna glavna deformacija je na $\emptyset + 90^\circ$. Če je $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$, je kot maksimalne glavne deformacije obrnjen v smeri urinega kazalca za $\emptyset + 90^\circ$ glede na os 1 (ε_1), minimalna glavna deformacija pa je na $\emptyset$.

Ob poznavanju deformacij, modula elastičnosti in Poissonovega količnika je mogoče izračunati tudi glavne napetosti:

$$\sigma_{max} = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_{max} + \nu\varepsilon_{min}) = \frac{E}{2} \left[\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{1-\nu} + \frac{1}{1+\nu} \sqrt{2\{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2\}} \right],$$

$$\sigma_{min} = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_{min} + \nu\varepsilon_{max}) = \frac{E}{2} \left[\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{1-\nu} - \frac{1}{1+\nu} \sqrt{2\{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2\}} \right],$$

$$\tau = \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{max} = \frac{E}{2(1+\nu)} \sqrt{2\{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2\}}.$$

5 Izvedba porušnih preiskav

Laboratorijske porušne preiskave smo izvedli z več vrstami obremenjevanja. Osnova so bili preizkusi (P1–P9) obremenjevanja preizkuševališča. Posebej smo izvedli manjši preizkus (P 10), v katerem smo obremenili sodobno kost in kost iz arheološkega konteksta ter sodobno keramiko in keramiko iz arheoloških kontekstov. Za določitev modulov elastičnosti materialov, ki so bili uporabljeni v preizkusih, so bile ob glavnih izvedene še spremljajoče porušne preiskave (Priloga K).

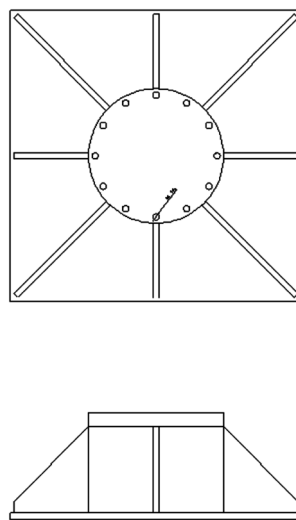
5.1 Postavitev preizkuševališča

Za izvedbo porušnih preiskav smo izdelali »arheološko najdišče« oz. preizkuševališče, na katerem smo izvajali nadzorovano obremenjevanje s servohidravličnim batom. Preizkuševališče je bilo ustvarjeno iz dveh različnih tipov zemljin, peščenega proda in melja, v katerih so bili zakopani preizkušanci (predmeti iz različnih materialov, ki so simulirali arheološke najdbe). Izvedli smo devet preizkusov, pri čemer smo spreminjali pogoje v preizkuševališču, sestav preizkušancev oz. način obremenjevanja. Beležili smo podatke o debelini, vlažnosti, temperaturi in modulu stisljivosti tal, premikih preizkušancev ter napetostih in deformacijah na preizkušancih.

Za potrebe naše raziskave smo oblikovali metodologijo obremenjevanja preizkuševališča, ki je vključevala bistvene elemente gradbenih in arheoloških postopkov, ključnih za razumevanje sprememb na arheoloških ostankih. Glavne elemente pri izvedbi preizkusov so tvorili:

- preizkuševališče, sestavljeno iz:
 - jeklene celice – okvir preizkuševališča,
 - zemljenih plasti peščenega proda in melja – zemljenih plasti,
 - izbranih predmetov iz različnih materialov – preizkušancev,
 - uporovnih merilnih lističev s pretvornikom, sistemom za zajemanje podatkov in računalniško opremo,
 - merilcev vlažnosti in temperature,
 - zaščitnega sloja iz geotekstila in gramoza,
- dilatometrsko sonda s pripadajočo opremo za določanje modula stisljivosti tal,
- servohidravlični bat s pripadajočo opremo za izvedbo obremenjevanja.

Preizkuševališče smo ustvarili v posebej izdelani jekleni celici, sestavljeni iz štirih prilegajočih se delov z 0,85 m dolgo in 0,4 m visoko stranico. Vsak izmed štirih delov je bil po sredini dodatno ojačan z jekleno prečnico ter opremljen z ročaji za lažje rokovanje. Dno celice je bila jeklena plošča z enakomerno razporejenimi odprtlinami za odtekanje vode. Za obremenjevanje je bila uporabljena obremenilna kvadratna plošča s stranico dolžine 0,8 m, posebej prilagojena namestitvi na servohidravlični bat (**Slika 5.1**).



Slika 5.1: Obremenilna kvadratna plošča, prilagojena za namestitev na servohidravlični bat.

Zemljene plasti v preizkuševališču sta tvorila peščen prod in melj. Ta izbira je temeljila na njuni raznolikosti, pogosti pojavnosti v arheoloških kontekstih ter na možnosti vsaj delne konsolidacije.²⁴ ki s pomočjo meritev dielektrične konstante merijo volumsko vsebnost vode.²⁵ Prod je bil plast 1 preizkuševališča, medtem ko je melj tvoril zgornjo plast 2 (Slika 5.2).



Slika 5.2: Celica, zapolnjena s prodom (levo) ter prodom in meljem (desno).

V plast melja so bili na dve mesti nameščeni merilci vlažnosti in temperature (Slika 5.3). Vlažnost smo merili z merilci Decagon 10HS Large Volume VWC,²⁶ Za meritve temperature smo uporabili merilce Decagon RT-1. Merilci so podatke beležili vsako sekundo, od priprave in med obremenjevanjem do izkopavanja preizkuševališča. Merilcev nismo namestili v plast proda, saj ima prod nizko sposobnost zadrževanja vode ter je hkrati precej grob, tako da bi se lahko merilci med obremenjevanjem poškodovali.

²⁴ Konsolidacija porušene strukture zemljine je pomenila veliko težavo. Predvsem drobnozrnate zemljine je izredno težko konsolidirati oz. je za konsolidacijo potrebnega veliko časa. Posledično je bila izločena uporaba glinenih plasti, melj pa je bil kompromis med interesi in praktičnostjo raziskave.

²⁵ Velik obseg meritev volumna vode.

²⁶ <http://www.decagon.com/products/soils/volumetric-water-content-sensors/10hs-soil-moisture-large-area-of-influence/>



Slika 5.3: Nameščanje merilcev v plast melja.

Za potrebe zaščitnega sloja je bil uporabljen enoslojni geotekstil, prekrit s 25 cm debelo plastjo drobljenega kamenja (Slika 5.4).



Slika 5.4: Namestitev zaščitnega sloja iz geotekstila in drobljenega kamenja.

Kot preizkušanci so služili posamezni predmeti iz različnih materialov, ki so najpogosteje prisotni na arheoloških najdiščih: keramika, kost, steklo, železo, bron in les. Večinoma smo uporabili sodobne predmete, ki pa so bili namensko izdelani na tradicionalen način: na lončarskem kolesu izdelano keramično posodje, pihano steklo, kositrni bron in kovano železo. Da bi se izognili etičnim pomislekom, smo uporabili zgolj živalske kosti. Za uporabo sodobnih predmetov smo se odločili zaradi nedostopnosti edinstvenih in dragocenih arheoloških najdb ter njihove dolgoletne izpostavljenosti vplivom okolja, ki so spremenili njihove lastnosti. Za primerjavo je bilo vendarle uporabljenih tudi nekaj odlomkov keramike in živalskih kosti iz arheoloških kontekstov. Izjema je bil les, saj je bil zaradi razmeroma lahke dostopnosti uporabljen les iz arheoloških kontekstov.

Keramični preizkušanci so vključevali lončenino in gradbeni material. Lončenina so bili na lončarskem kolesu izdelani, enkrat žgani lončki (KE-LO) in skodelice (KE-SK) (Slika 5.5). Kot gradbeni material smo uporabili odlomke novoveških pečnic (KE-PE) in rimskodobne tegule (KE-TE) (Slika 5.6).



Slika 5.5: Keramični lonček (KE-LO) in keramična skleda (KE-SK).



Slika 5.6: Pečnica (KE-PE) in tegula (KE-TE).

Za koščene preizkušance smo uporabili sveže in očiščene kosti divjega prašiča, dolge kosti – stegenice (KO-ST) (Slika 5.7), ploščate kosti – lopatice (KO-LO) (Slika 5.8) in sestavljene kosti – lobanje (KO-LOB) (Slika 5.9). Dodatno smo uporabili tudi rimske živalske cevaste kosti (KO-GO) (Slika 5.10).



Slika 5.7: Steglenica (KO-ST).



Slika 5.8: Lopatica (KO-LO).



Slika 5.9: Lobanja (KO-LOB).



Slika 5.10: Arheološka cevasta kost (KO-GO).

Pri kovinskih preizkušancih smo se omejili na predmete iz železa in brona. Uporabili smo ploščice iz kositrnega brona (BR-PR) (Slika 5.11), del železne kose (ZE-KO) (Slika 5.12) in železne tečaje (ZE-TE) (Slika 5.13).



Slika 5.11: Kos brona (BR-PR).



Slika 5.12: Del kose iz kovanega železa (ZE-KO).



Slika 5.13: Kos tečaja iz kovanega železa (ZE-TE).

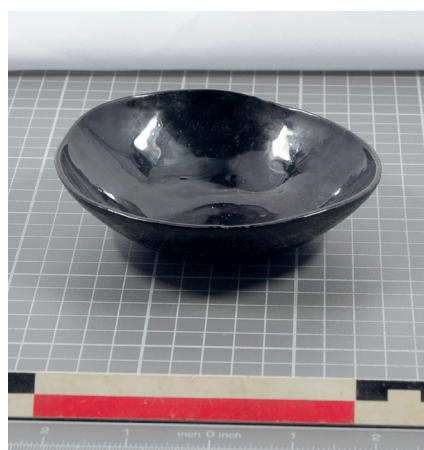
Stekleni preizkušanci – visoki kozarci (ST-VK) (Slika 5.14), nizki kozarci (ST-KO) (Slika 5.15) in skodelice s tankimi stenami (ST-SK) (Slika 5.16) – so bili izdelani iz pihanega stekla.



Slika 5.14: Visok steklen kozarec (ST-VK).



Slika 5.15: Nizek steklen kozarec (ST-KO).



Slika 5.16: Steklена skodelica (ST-SK).

Za lesene preizkušance smo uporabili mokre in dobro ohranjene kole (LE-KO) (Slika 5.17) in deske (LE-DE) (Slika 5.18) iz novoveških arheoloških kontekstov.



Slika 5.17: Kos lesenega kola (LE-KO) iz arheološkega konteksta.



Slika 5.18: Kos lesene deske (LE-DE) iz arheološkega konteksta.

Vsak preizkušanelec je bil poimenovan, opisan, izmerjen in fotografiran. Nato so bili izbrani preizkušanci opremljeni z merilnimi lističi, ki smo jih s sekundnim lepilom namestili na predhodno rahlo zbrušeno in očiščeno površino preizkušanca. Lističe smo pritrdili na predvideno najbolj občutljive točke preizkušancev oz. na mesta, kjer je bila pritrditev praktično izvedljiva. Za pritrditev lističa je namreč potrebna dovolj velika, razmeroma ravna površina. Merilni lističi so bili pritrjeni na osrednji del preizkušancev, s prvo osjo (ϵ_1) usmerjeno pravokotno na silo obremenjevanja. Ker smo lističe zakopali v zemljino, smo, da bi se izognili poškodbam, žice dodatno zaščitili z gumijasto cevko, same lističe pa prekrili s tanjšo plastjo plastelina.

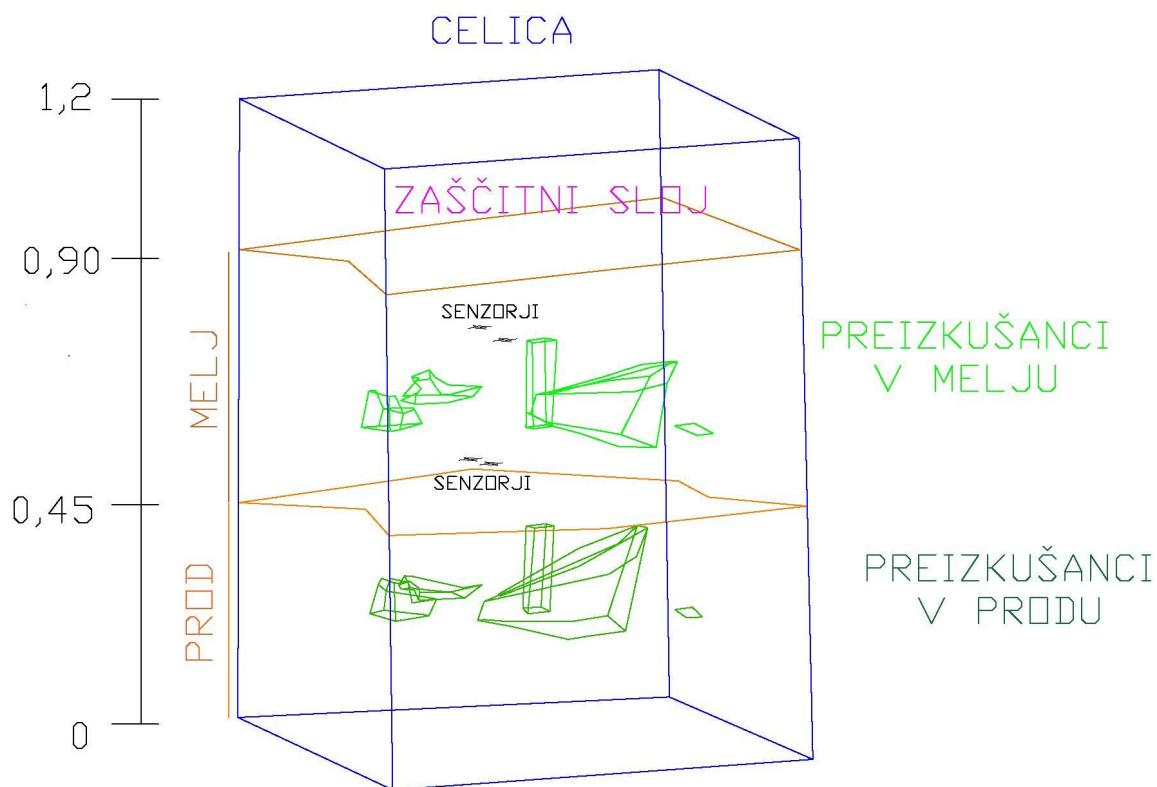
Za meritve deformacij in izračun napetosti na preizkušancih so bili uporabljeni vodoodporni enojni in trojni oz. rozeta merilni lističi Tokyo Sokki Kenkyujo (WFLA-6-11-5L). Enojni lističi so bili nameščeni zgolj na kovinske predmete. Predpostavljali smo, da se bodo zaradi svojih lastnosti in ploščate oblike kovinski predmeti deformirali le v eni smeri. V preostalih primerih smo uporabili rozetne merilne lističe. Zaradi prevelikih stroškov ali neprimernosti materiala vseh preizkušancev ni bilo mogoče opremiti z merilnimi lističi. Te smo namestili na sodobne preizkušance, ki smo jih znotraj istega materiala razumeli kot primerljive. Zaradi slojevitosti in visoke vlažnosti leseni predmeti niso bili opremljeni z merilnimi lističi.

Preizkuševališče (Slika 5.19) je bilo za potrebe vsakega preizkusa pripravljeno po sledečem postopku:

- geodetska izmera okvirja za zamejitev preizkuševališča,
- položitev spodnje plasti proda,
- namestitev pripravljenih preizkušancev,²⁷
- fotografsko in geodetsko dokumentiranje nameščenih preizkušancev,
- položitev zgornjega dela plasti proda in s tem prekritje preizkušancev,
- geodetsko dokumentiranje zgornje ravni proda,
- položitev spodnjega dela plasti melja na prodnato plast,
- namestitev merilcev vlažnosti in temperature v spodnji del meljaste plasti,
- namestitev pripravljenih preizkušancev,
- fotografsko in geodetsko dokumentiranje nameščenih preizkušancev,
- namestitev merilcev vlažnosti in temperature v zgornji del meljaste plasti,
- položitev zgornjega dela plasti melja in s tem prekritje preizkušancev,
- geodetsko dokumentiranje zgornje ravni melja,
- namestitev zaščitnega sloja.²⁸

²⁷ Pri preizkusih 4–8 in 1–3 so bili preizkušanci nameščeni le v plast melja.

²⁸ Preizkusi 1–6 in 7–9 so bili izvedeni brez zaščitnega sloja.



Slika 5.19: Shematski prikaz postavitve preizkuševališča.

Pred vzpostavitev preizkuševališča smo izmerili jekleni okvir. S tem je bilo definirano in zamejeno polje preizkuševališča. Sledilo je polaganje zemljin, preizkušancev in merilcev. Polaganje zemljin je potekalo postopno, naenkrat smo polagali 5–10 cm debele plasti zemljine. Da bi zemljino vsaj delno konsolidirali, smo vsako na novo položeno 5–10 cm plast zalili z vodo in poteptali.

V preizkusih 1–3 smo uporabili lesene preizkušance. Ti so bili nameščeni zgolj v plast melja,²⁹ štirje leseni preizkušanci (dva kola ter dve deski) so bili nameščeni v navpični legi, šest (desk) pa v vodoravni legi. Celoten sestav je bil fotografsko in geodetsko dokumentiran (Slika 5.20).



Slika 5.20: Namestitev lesenih preizkušancev v melj.

²⁹ Predpostavljeno je bilo, da se v realni situaciji les v vodoprepustni prodnati zemljini ne bi ohranil.

V preizkusih 4–9 smo uporabili preizkušance iz preostalih materialov (keramika, steklo, kost, bron in železo). Te smo postavili v prod in melj, pri čemer smo pazili, da sta bila material in lega preizkušancev čim bolj podobna v vsaki plasti. Celoten sestav obeh plasti je bil fotografsko in geodetsko dokumentiran (Slika 5.21).



Slika 5.21: Namestitev preizkušancev v prod (levo) in melj (desno).

Na dveh globinah melja, približno 10 cm pod in 10 cm nad preizkušanci, smo namestili merilce vlažnosti in temperature (Slika 5.22).



Slika 5.22: Namestitev merilcev vlažnosti in temperature v melj.

Pri preizkusih 5–9 smo dodatno določili delež vode v melju.³⁰ Ob izkopavanju je bil vzorec vlažne zemljine stehšan (m_{vl}) in postavljen v peč na 105–110 °C. Vzorec se je v peči sušil, dokler se njegova teža pri vmesnih tehtanjih ni več spreminjala. Končna teža je bila teža suhe snovi (m_s), na podlagi katere je bil izračunan delež vode:

$$H = \frac{m_{vl} - m_s}{m_s} \times 100 \, \%.$$

30 Rezultat je bil dodaten podatek o vlažnosti, saj sta merilca kazala precej majhne spremembe, četudi je bilo uporabljene manj vode za konsolidacijo in/ali je bila zemljina pred vgraditvijo posušena oz. je preizkuševališče pred obremenjevanjem dlje časa stalo na soncu.

Pred obremenjevanjem smo pri preizkusih 1–6 preizkuševališče prekrili z zaščitnim slojem iz geotekstila in drobljenega kamenja (Slika 5.4).

Pred in po obremenjevanju preizkuševališča smo izvedli tudi dilatometrsko preiskavo, vsakokrat na istem delu preizkuševališča, približno 25 cm od označenega vogala jeklene celice. Pri vtiskovanju dilatometrskе sonde smo si pomagali z laboratorijskim dvigalom in dvotonskim betonskim kvadrom, s čimer smo zagotovili razmeroma enakomerno in kontinuirano potiskanje sonde v preizkuševališče. Meritve smo opravili v melju, na vsakih 5–10 cm globine, vse do proda. V prod dilatometrskih preiskav nismo izvajali, saj prod zaradi grobe peščeno prodnate sestave za to ni primeren.

Za izvedbo obremenjevanja smo uporabili servohidravlični bat, ki omogoča nadzorovano vsiljevanje statične ali dinamične vertikalne obtežbe v obsegu ± 250 kN. Bat je bil podprt s sistemom jeklenih prečk in stebrov, ki so bili pritrjeni v 80 cm debelo armiranobetonsko ploščo (»strong floor«) laboratorija KPL³¹ (Slika 5.23). Obremenjevanje preizkuševališča smo izvajali potem, ko je to nekaj dni mirovalo in je za konsolidacijo uporabljena voda vsaj delno odtekla. Izjema je bil preizkus 9, pri katerem smo obremenjevanje izvedli po štirih mesecih mirovanja, s čimer smo dvignili stopnjo konsolidacije (Preglednica 5.1).



Slika 5.23: Servohidravlični bat laboratorija KPL.

Prvi preizkus je služil predvsem temu, da smo preverili opremo in metodološke postopke. Zato je bil preizkus 1 edini preizkus z monotonim zveznim obremenjevanjem. Preizkuševališče je bilo zvezno obremenjeno s silo od 0 do 200 kN, in sicer z nadzorom pomika, ki je znašal 0,1 mm/s.

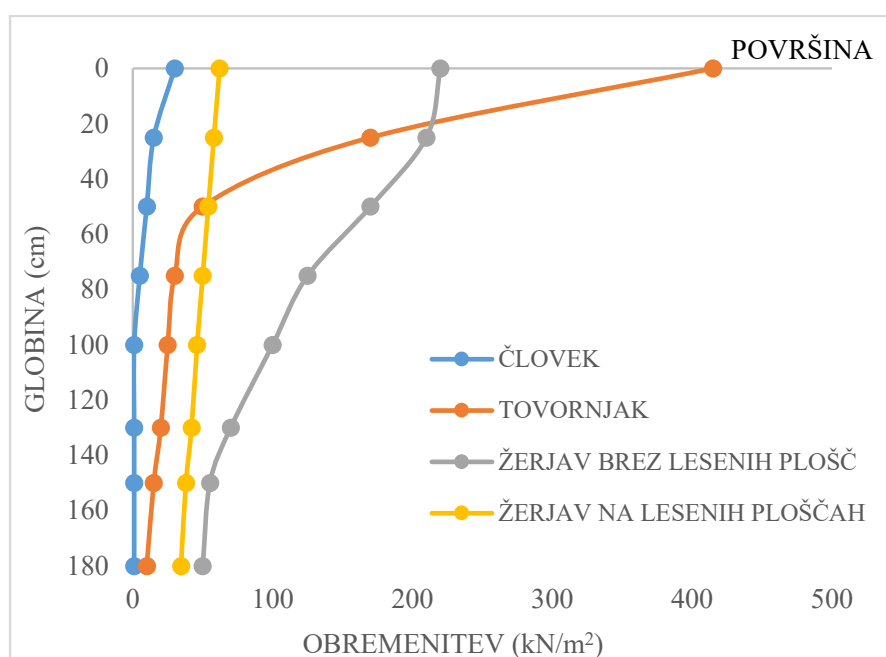
Pri preizkusih 2, 4, 5, 7 in 9 smo izvedli monotono stopenjsko obremenjevanje. Vsiljeno silo smo povečevali za 20 kN in ob vsakokratnem povečanju obremenitev ohranjali 300 s. Prehodi med posameznimi stopnjami obremenjevanja so bili izvedeni s hitrostjo 0,2 kN/s, stopnje pa so se gale od 20 kN do 140 oz. 160 kN.³²

31 Konstrukcijsko-prometni laboratorij Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani.

32 Pri preizkusu 4 je bilo zaradi velikega pomika in omejitve opreme obremenjevanje zaključeno pri 140 kN. Pri preizkusih 5 in 7 težav z velikim pomikom ni bilo, obremenjevanje pa je bilo zaključeno pri 160 kN.

Preizkusi 3, 6 in 8 so bili dinamični, saj smo vertikalnemu obremenjevanju dodali vibracije. Tudi pri dinamičnem obremenjevanju je bilo preizkuševališče obremenjeno stopenjsko. Ob vsakokratnem povečanju sile za 20 kN smo obremenitev ohranjali 100 s, pri čemer so bile dodane vibracije hitrosti 5 Hz. Prehodi med posameznimi stopnjami so bili izvedeni s hitrostjo 0,2 kN/s, stopnje pa so segale od 15 kN do 95 kN.³³

Glede na površino obremenilne plošče (0,64 m²) so obremenitve površine pri monotonem obremenjevanju znašale od 20 kN/m² do 220–250 kN/m² pri dinamičnem obremenjevanju pa 150 kN/m² z vibracijami 5 Hz. Obremenitve so tako primerljive z obremenitvami v realnih situacijah. Pretekle raziskave so namreč pokazale, da človek povzroči približno 30 kN/m² veliko statično obremenitev površine, žerjav na lesenih ploščah približno 60 kN/m², žerjav neposredno na površini (brez lesenih plošč) 220 kN/m² in tovornjak približno 415 kN/m² (Slika 5.24) (Mathewson, Gonzalez in Eblen 1992, 80), medtem ko traktorji z različnimi pnevmatikami povzročijo površinsko obremenitev med 50 kN/m² in 350 kN/m² (Misiewicz et al. 2008). Vibracije s frekvenco 5 Hz predstavljajo nekoliko nižje oz. spodnjo mejo vrednosti frekvenc pri gradnji ali prometu. Te sicer močno nihajo, denimo pri gradnji cest običajno med 8 Hz in 100 Hz, medtem ko cestni promet povzroča vibracije med 5 Hz in 25 Hz (Hunaidi 2000; Tawfiq, Mtenga in Sobanjo 2010).



Slika 5.24: Napetosti v zemljini ob različnih obremenitvah površine (prirejeno po Mathewson, Gonzalez in Eblen 1992, 80, Slika 28).

Med obremenjevanjem smo beležili silo obremenjevanja, pomik bata in posedanje celotnega preizkuševališča. Z uporavnimi merilnimi lističi smo ves čas obremenjevanja beležili deformacije na preizkušancih.

³³ Pri dinamičnem obremenjevanju je bilo zaradi vpeljave vibracij in s tem premikov bata ter zaradi sočasnega posedanja preizkuševališča enakomerno vzdrževanje velikosti sile nemogoče in je sila močno preskakovala.

Preglednica 5.1: Povzetek glavnih značilnosti posameznih preizkusov.

#	PLAST S PREIZKUŠANCI	PREIZKUŠANCI	VLAŽNOST	ZAŠČITA	MIROVANJE	OBREMENJEVANJE
1	melj	les		da	sedem dni	monotono zvezno
2	melj	les		da	štirje dnevi	monotono stopenjsko
3	melj	les		da	šest dni	dinamično
4	prod in melj	keramika, kost, steklo, kovina	21,4 %	da	dva dneva	monotono stopenjsko
5	prod in melj	keramika, kost, steklo, kovina	20,9 %	da	dvanajst dni	monotono stopenjsko
6	prod in melj	keramika, kost, steklo, kovina	18,7 %	da	pet dni	dinamično
7	prod in melj	keramika, kost, steklo, kovina	19,2 %	ne	pet dni	monotono stopenjsko
8	prod in melj	keramika, kost, steklo, kovina	19,4 %	ne	pet dni	dinamično
9	prod in melj	keramika, kost, steklo, kovina	17,8 %	ne	štirje meseci	monotono stopenjsko

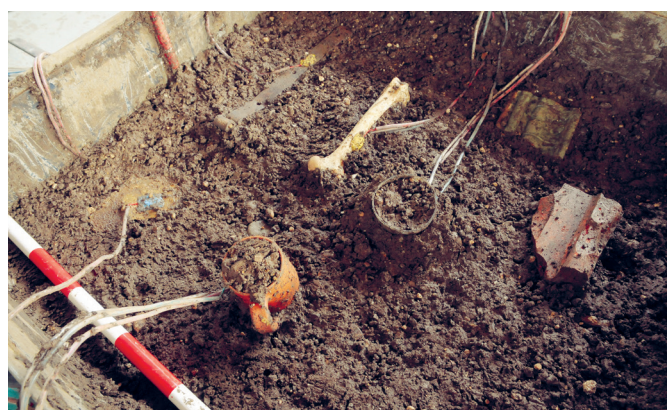
Po zaključenem obremenjevanju smo na način, čim bolj podoben arheološkim izkopavanjem, odstranili zemljine in dokumentirali stanje preizkušancev. Najprej smo odstranili zaščitni sloj, čemur je sledila geodetska izmera površine plasti melja. Nato smo odstranili melj do višine preizkušancev. Te smo očistili, fotografirali in natančno izmerili njihov prostorski položaj. Na koncu smo preizkušance vzeli iz preizkuševališča in odstranili preostalo plast melja. Nato je bil odstranjen preostanek melja. Enak postopek smo ponovili za prodnato plast (Slike 5.25–5.28).



Slika 5.25: Vrhnja plast melja po obremenjevanju, zaščitni sloj in geotekstil sta že odstranjena.



Slika 5.26: Odtisi že odstranjenih vodoravno nameščenih lesenih preizkušancev.



Slika 5.27: Izkopavanje preizkušancev v melju.



Slika 5.28: Izkopavanje preizkušancev v produ.

Dodatno smo izvedli preizkus 10, s katerim smo želeli primerjati odziv sodobnih in arheoloških preizkušancev na dodatne mehanske obremenitve. Preizkus smo izvedli v dveh delih, v prvem delu smo uporabili odlomke keramike, v drugem pa živalske cevaste kosti.

Za preizkus smo uporabili zabojnik velikosti 40 x 30 x 50 cm, v katerega smo položili plast peščenega melja. Na globino 20 cm smo položili preizkušance. Pri keramičnih preizkušancih je šlo za odlomek sodobne keramike (KE-MOD), odlomek rimske keramike (KE-ANT) ter odlomek prazgodovinske keramike (KE-PRZG). V preizkusu s kostjo smo uporabili rimsko cevasto kost (KO-GO) in sodobno dolgo kost (KO-ST). Vsi preizkušanci so bili predhodno fotografirani in opremljeni z merilnimi lističi. Nato smo preizkušance prekrili z 20 cm debelo plastjo peščenega melja. Na površino meljaste zemljine smo položili leseno desko, ki je služila za enakomerno razporeditev obremenitev po celotni površini. Tako pripravljeno preizkuševališče je bilo postavljeno pod laboratorijsko prešo (**Slika 5.29**). Pri obremenjevanju smo beležili velikosti vertikalno vsiljene sile in deformacije na preizkušancih. Po končanem obremenjevanju smo preizkuševališče raziskali na arheološki način in preizkušance vzeli iz zemljine.



Slika 5.29: Postavitev in obremenjevanje preizkuševališča v preizkusu 10.

5.2 Spremljajoče porušne preiskave

Za ustrezno interpretacijo podatkov so bile potrebne spremljajoče porušne preiskave preizkušancev. Vrsta spremljajoče porušne preiskave je bila izbrana glede na material in obliko preizkušanca. Za preiskave kovinskih materialov smo izvedli natezni preizkus, medtem ko smo za preiskave kosti in keramike izvedli tritočkovni upogibni preizkus. Porušne preiskave stekla nismo izvedli, saj je priprava ustreznih vzorcev stekla izredno težavna. Ker so nihanja modula elastičnosti stekla tako majhna, da to ne bi bistveno vplivalo na rezultate,³⁴ smo upoštevali podatke o modulu elastičnosti stekla iz literature.

34 Za posvet in nasvet se zahvaljujem dr. Davidu Antolincu s Katedre za preizkušanje materialov in konstrukcij Fakultete za gradbeništvo in geodezijo.

5.2.1 Natezni preizkusi

Za potrebe nateznega preizkusa so bili iz kositrnega brona in kovanega železa izrezani pravilno oblikovani trakasti preizkušanci z zoženim osrednjim delom. Sestava in način izdelave preizkušancev sta bila enaka kot pri preizkušancih, uporabljenih v obremenilnih preizkusih. Preizkušanci so bili predhodno izmerjeni in fotografirani (Preglednica 5.2, Slika 5.30). V osrednji, ožji del vsakega preizkušanca smo vzdolž daljše osi namestili uporovni merilni listič. Po en bronast in železni preizkušanec smo opremili z dvema, nasproti si ležečima merilnima lističema. Nato smo preizkušanec vstavili v trgalni stroj (Slika 5.31), ki omogoča enakomerno enosno obremenjevanje. Manometer na napravi je beležil vsiljeno silo in pomik, medtem ko je merilni listič beležil spremembo upora ter s tem deformacije. Obremenjevanje je potekalo do porušitve preizkušanca.

Preglednica 5.2: Povzetek lastnosti kovinskih preizkušancev.

PREIZKUŠANEC	CELOTNA DOLŽINA	DOLŽINA ZOŽANEGA DELA	ŠIRINA ZOŽANEGA DELA	DEBELINA
BRON 1	198 mm	65,5 mm	12,6 mm	3,8 mm
BRON 2	198,5 mm	59 mm	11,9 mm	3,9 mm
ŽELEZO 1	141 mm	24,1 mm	11,9 mm	4,5 mm
ŽELEZO 2	142,5 mm	24,8 mm	11,3 mm	4,3 mm

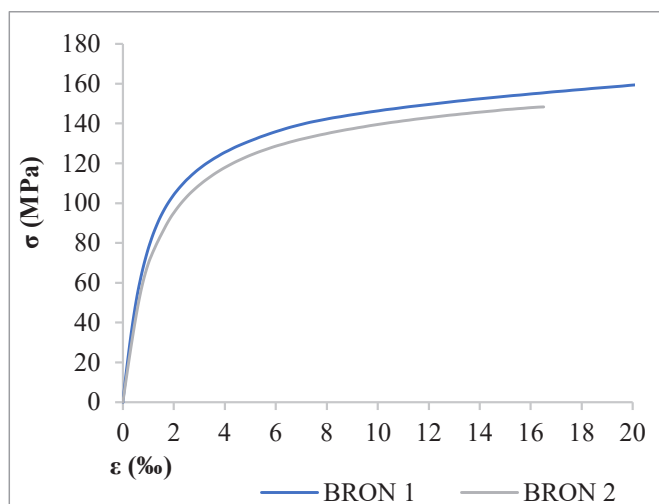


Slika 5.30: Bronasti (zgoraj) in železni (spodaj) preizkušanci za spremljajoče porušne preiskave.

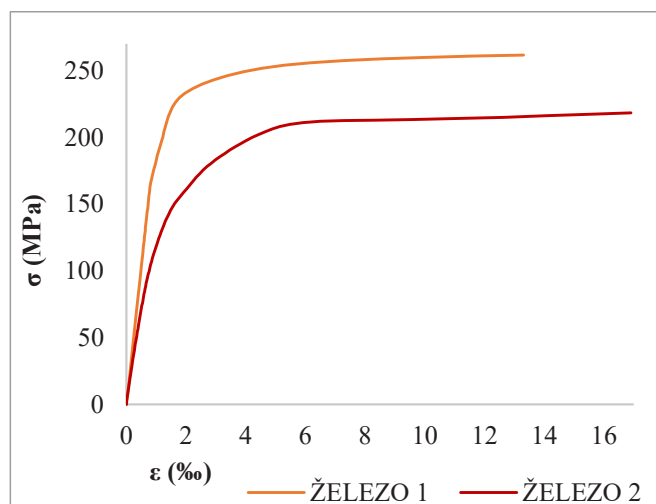


Slika 5.31: Izvedba nateznega preizkusa bronastega preizkušanca.

Grafa napetosti in deformacij brona (Slika 5.32) in železa (Slika 5.33) kažeta duktilnost obeh materialov. Opazimo večjo razteznost in manjšo natezno trdnost brona v primerjavi z železom.



Slika 5.32: Graf nateznih napetosti in nateznih deformacij bronastih preizkušancev.



Slika 5.33: Graf nateznih napetosti in nateznih deformacij železnih preizkušancev.

Na osnovi izmerjenih podatkov in izračunov je bil povprečni elastični modul brona 87,9 GPa in železa 171,5 GPa (**Preglednica 5.3**).

Preglednica 5.3: Moduli elastičnosti (E) kovinskih preizkušancev.

PREIZKUŠANEC	E (GPa)	POVPREČNI E (GPa)
BRON 1	97,6	87,9
BRON 2	78,3	
ŽELEZO 1	132,8	171,5
ŽELEZO 2	209,3	

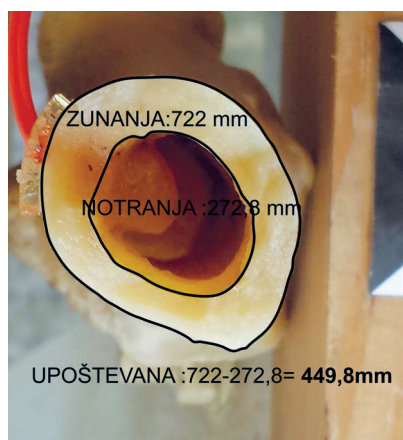
5.2.2 Upogibni preizkusi

Porušne preiskave keramike in kosti smo izvedli s tritočkovnim upogibnim preizkusom. Keramični preizkušanci so bili podolgovati kvadri premera 4,5 cm in dolžine 20 cm. Glina in način izdelave sta bila enaka kot pri preizkušancih, uporabljenih v obremenilnih preizkusih. Pri porušnih preiskavah kosti smo kot preizkušance uporabili prašičje stegenice. Vsi preizkušanci so bili pred in po izvedbi preizkusa izmerjeni (**Preglednica 5.4**) in fotografirani. Ker ima stegenica v notranjosti mozgovno votlino, smo za njeno površino uporabili le obod oz. kompakto, brez votle notranjosti (**Slika 5.34**). Zato smo izmere za izračun površine kosti opravili na v preizkusih prelomljenih preizkušancih.

Na sredino preizkušancev smo vzporedno z najdaljšo osjo namestili uporabne merilne lističe. Nato smo preizkušance postavili na dva polkrožno oblikovana kovinska nosilca, med seboj oddaljena 10 cm za keramične preizkušance oz. 12 cm za koščene preizkušance (**Slika 5.35**). Obremenjevanje je potekalo z enakomerno naraščajočim vsiljevanjem sile od zgoraj, in sicer v sredinski točki med obema nosilcema. Beležili smo vsiljeno silo in pomik v sredinski točki, merilni lističi pa so beležili upor in s tem deformacijo. Obremenjevanje je potekalo do porušitve preizkušanca.

Preglednica 5.4: Povzetek lastnosti koščenih preizkušancev.

PREIZKUŠANEC	RAZDALJA MED PODPORAMA	ŠIRINA	VIŠINA	DEBELINA STENE	POVRŠINA
STEGNENICA 1	120 mm	33 mm	35 mm	5 mm	412,7 mm ²
STEGNENICA 2	120 mm	28 mm	32 mm	4 mm	449,3 mm ²

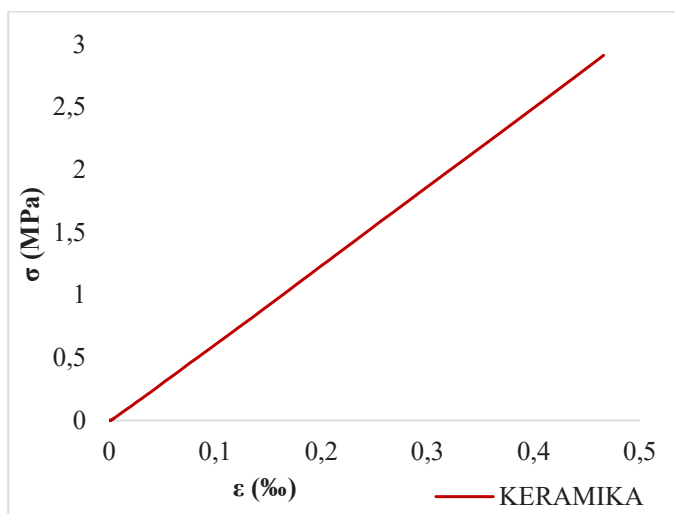


Slika 5.34: Izmera površine koščenega preizkušanca.

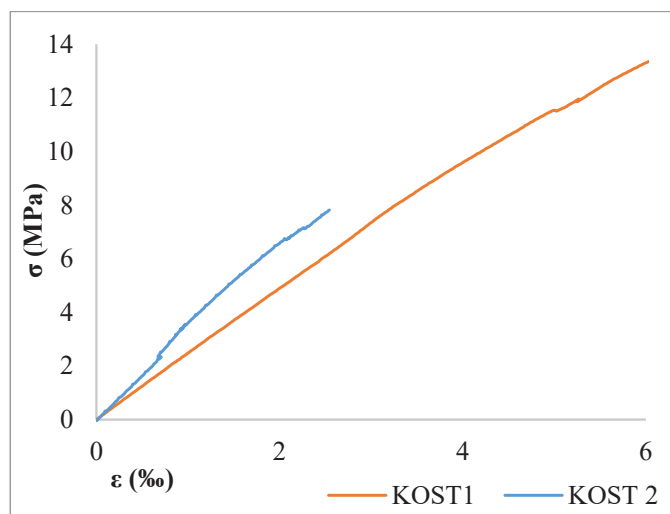


Slika 5.35: Izvedba tritočkovnega upogibnega preizkusa na koščenem preizkušancu (stegenici).

Graf napetosti in deformacij keramike (Slika 5.36) in kosti (Slika 5.37) kaže na krhkost obeh materialov. Opazimo bistveno večjo razteznost in upogibno trdnost kosti v primerjavi s keramiko.



Slika 5.36: Graf upogibnih napetosti in nateznih deformacij keramičnega preizkušanca.



Slika 5.37: Graf upogibnih napetosti in nateznih deformacij koščenih preizkušancev.

Na osnovi izmerjenih podatkov in izračunov je bil elastični modul sodobne keramike 81,6 GPa in kosti 11,7 GPa. Za keramiko iz arheoloških kontekstov je bil uporabljen modul 15 GPa, ki predstavlja povprečno vrednost v literaturi navedenih rezultatov (Kilikoglou et al. 1998, 271) (Preglednica 5.5).

Preglednica 5.5: Moduli elastičnosti (E) keramičnih in koščenih preizkušancev.

PREIZKUŠANEC	E (GPa)	POVPREČNI E (GPa)
KERAMIKA	81,6	
ARHEOLOŠKA KERAMIKA	15	
KOST 1	11,5	11,7
KOST 2	11,9	

5.3 Analiza preizkušancev in podatkov

Na osnovi vsiljenih sil (F) ter velikosti obremenilne plošče (OP) smo izračunali napetosti na površini preizkuševališča:

$$\sigma = \frac{F \text{ (kN)}}{OP \text{ (m}^2\text{)}}.$$

Na podlagi pridobljenih geodetskih podatkov smo izmerili posedanje posamezne plasti med obremenjevanjem. Nadalje smo določili in izrisali smeri ter velikosti premikov posameznih preizkušancev.

Preizkušance smo po obremenjevanju očistili in ponovno fotografirali. Na podlagi makroskopskega vizualnega pregleda preizkušancev in fotografij smo s stopnjami poškodovanosti od 1 do 5 ovrednotili poškodbe, ki so jih posamezni preizkušanci utrpeli (**Preglednica 5.6**).

Preglednica 5.6: Ovrednotenje poškodb preizkušancev.

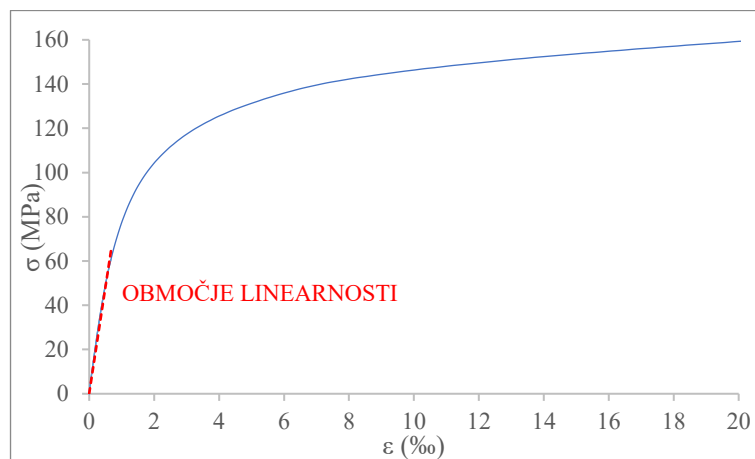
STOPNJA POŠKODOVANOSTI	VRSTA POŠKODBE
1	odrgnina, odkrušen rob, luščenje vrhnje plasti
2	plitve razpoke, povečanje obstoječih razpok
3	globoke razpoke
4	globoke razpoke in razlom dela preizkušanca
5	popoln razlom preizkušanca na več delov

Podatke iz porušnih preiskav smo uporabili za izračun modula elastičnosti (E) materialov. Modul elastičnosti kovinskih preizkušancev smo izračunali na osnovi dimenzij preizkušanca oz. njegovega začetnega prereza (A) in vsiljenih sil (F). Najprej smo izračunali napetosti na preizkušancu:

$$\sigma = \frac{F \text{ (kN)}}{A \text{ (mm}^2\text{)}}.$$

Izračunane napetosti (σ) ter z merilnimi lističi neposredno izmerjene deformacije (ϵ) smo uporabili za izris grafov. Na osnovi slednjih ter z upoštevanjem konstante med napetostmi in deformacijami (σ - ϵ) smo določili območje linearnosti (**Slika 5.38**). V tem območju sta bili izbrani dve točki, pri 40 % (σ_1 in ϵ_1) ter 80 % (σ_2 in ϵ_2) linearnosti. Nato smo za izbrani točki izračunane napetosti in izmerjene deformacije uporabili za izračun modula elastičnosti (E):

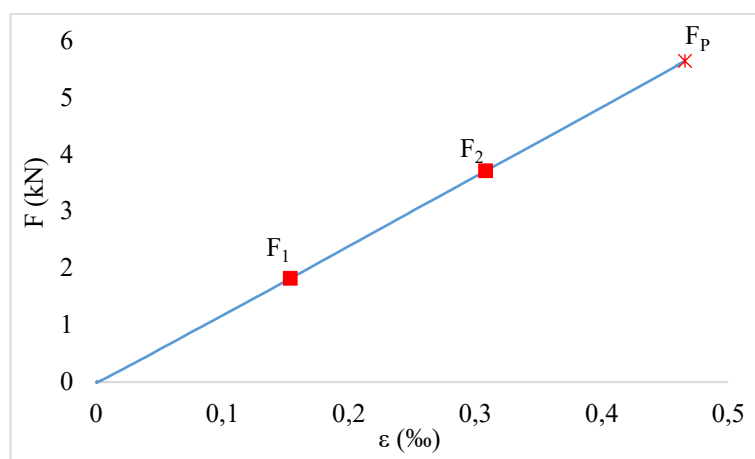
$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1}.$$



Slika 5.38: Graf napetosti in deformacij pri nateznem preizkusu kovinskih materialov z označenim območjem linearnosti.

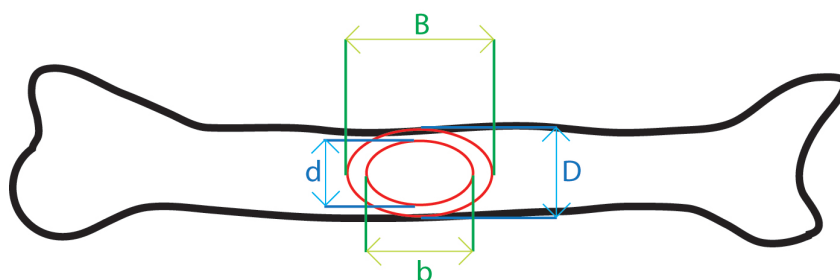
Za izračun modula elastičnosti (E) keramičnih preizkušancev smo na osnovi sile (F) in deformacij (ε) določili silo porušitve (F_p). Sledila sta izračun 1/3 in 2/3 vrednosti sile porušitve (F_1 in F_2) ter izpis deformacij pri F_1 (ε_1) in F_2 (ε_2) (Slika 5.39). Nato smo z uporabo razdalje med nosilcema pri izvedbi porušne preiskave (L) ter širine (w) in višine (h) preizkušanca izračunali modul elastičnosti:³⁵

$$E = \frac{L^3 (F_2 - F_1)}{4wh^3 (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}.$$



Slika 5.39: Graf deformacij v odvisnosti od vsiljene sile z določenimi silo porušitve (F_p), silo pri 1/3 (F_1) in 2/3 (F_2) porušitve keramičnega preizkušanca.

Za izračun modula elastičnosti kosti smo upoštevali zgolj kortikalni del kosti debela, katerega prečni pre rez smo poenostavili v elipso (Slika 5.40).



Slika 5.40: Poenostavitev prečnega prereza kosti v elipso.

³⁵ <http://imechanica.org/files/handout10.pdf>.

Izmerili smo notranji (b) in zunanji (B) premer, pravokotno na silo obremenjevanja (F), ter notranji (d) in zunanji (D) premer, vzporedno s silo obremenjevanja (F). Izmere smo uporabili za izračun ploščine polnega preseka preizkušanca (s). Nato smo napetosti na preizkušancu izračunali z uporabo ploščine (s) in vsiljene sile (F):

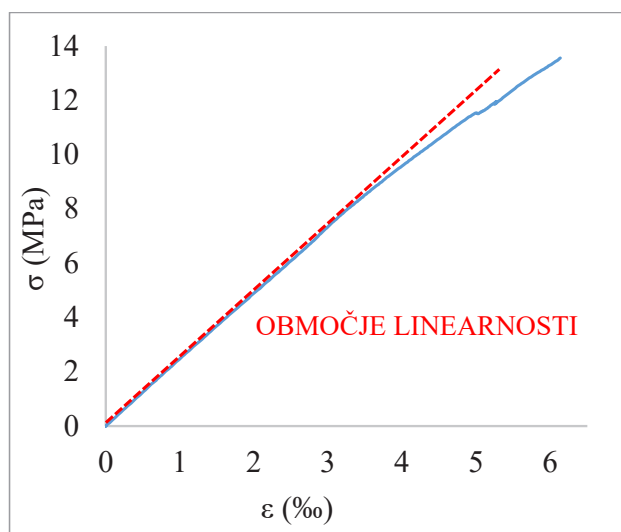
$$\sigma = \frac{F \text{ (kN)}}{s \text{ (mm}^2\text{)}}.$$

Nadalje smo izračunali vztrajnostni moment (J):

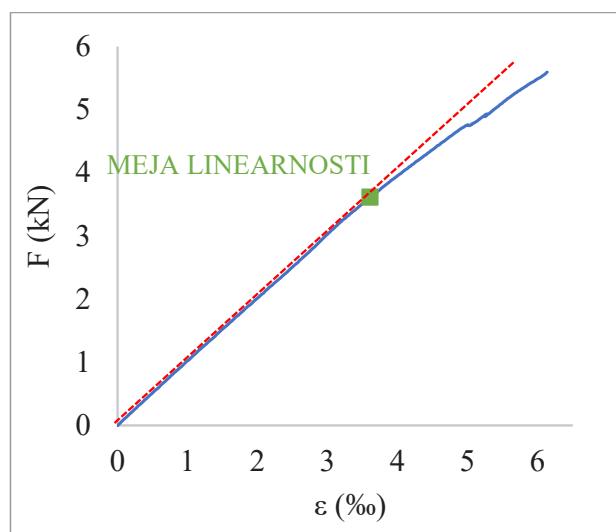
$$J = \frac{\pi}{64} (BD^3 - bd^3).$$

Z izračunanimi napetostmi (σ) in posledičnimi deformacijami (ϵ) preizkušanca smo izdelali graf (σ - ϵ) (Slika 5.41). Na grafu smo določili območje linearnosti, sil na njegovi meji (F_1) ter pri sili (F_1) izmerjene deformacije (ϵ_1) (Slika 5.42). Nato smo z uporabo razdalje med nosilcema pri izvedbi porušne preiskave (L), določenih sil (F_1) in deformacij (ϵ_1) ter izračunanega vztrajnostnega momenta (J) izračunali modul elastičnosti (E):

$$E = \frac{F_1 L^3}{48 J \epsilon_1}.$$



Slika 5.41: Graf napetosti in deformacij kosti z označenim območjem linearnosti.



Slika 5.42: Graf deformacij v odvisnosti od vsiljene sile z določeno mejo linearnosti za kost.

Na osnovi enačb smo za preizkušance, opremljene z merilnimi lističi, pridobili oz. izračunali glavne minimalne in maksimalne normalne napetosti ($\sigma_{\min}$, $\sigma_{\max}$) in deformacije ($\epsilon_{\min}$, $\epsilon_{\max}$).³⁶ Zaradi meritev v zgolj eni smeri enojni lističi ne zahtevajo dodatnih izračunov, tako da meritve že predstavljajo deformacije posameznih preizkušancev. Napetosti na preizkušancih smo izračunali na osnovi deformacij, s porušnimi preiskavami pridobljenega modula elastičnosti in iz literature pridobljenega Poissonovega količnika:

$$\sigma = \frac{E \epsilon}{1 - \nu}.$$

³⁶ Glej poglavje 5.5.

Pri rozetnih merilnih lističih smo izračunali glavne minimalne in maksimalne deformacije na posameznih preizkušancih, in sicer z enačbami:

$$\varepsilon_{max} = \frac{1}{2} [\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \sqrt{2\{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2\}}];$$

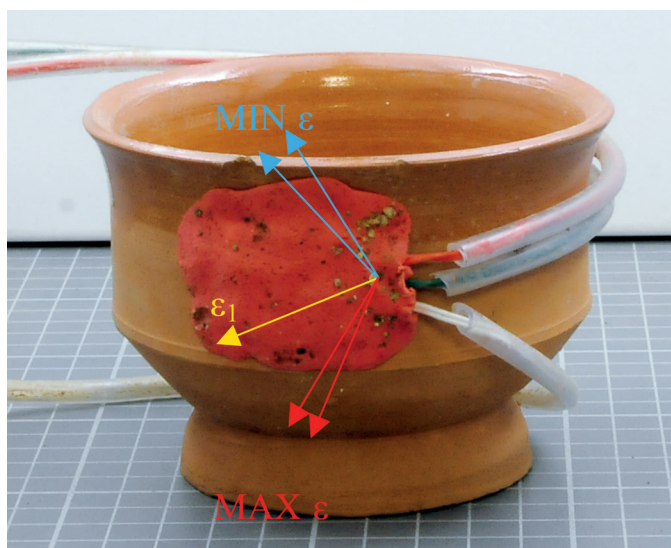
$$\varepsilon_{min} = \frac{1}{2} [\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \sqrt{2\{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2\}}].$$

Usmeritev glavnih deformacij je bila izračunana z enačbo:

$$\varnothing = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left\{ \frac{2\varepsilon_3 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \right\},$$

Če je $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$ je usmeritev glavnih maksimalnih deformacij obrnjena v smeri urinega kazalca za $\varnothing$ glede na os 1 (ε_1), medtem ko je usmeritev glavnih minimalnih deformacij obrnjena za $\varnothing + 90^\circ$ glede na os 1 (ε_1). Če je $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$ je usmeritev glavnih maksimalnih deformacij obrnjena v smeri urinega kazalca za $\varnothing + 90^\circ$ glede na os 1 (ε_1), medtem ko je usmeritev glavnih minimalnih deformacij obrnjena za $\varnothing$ glede na os 1 (ε_1).

Za boljšo predstavo usmeritev deformacij smo usmeritve izrisali na fotografijo preizkušanca (Slika 5.43). Za pravilno razumevanje izrisa je treba omeniti, da so smeri deformacije izrisane v ravnini (dvodimenzionalno) in ne v prostoru (tridimenzionalno).



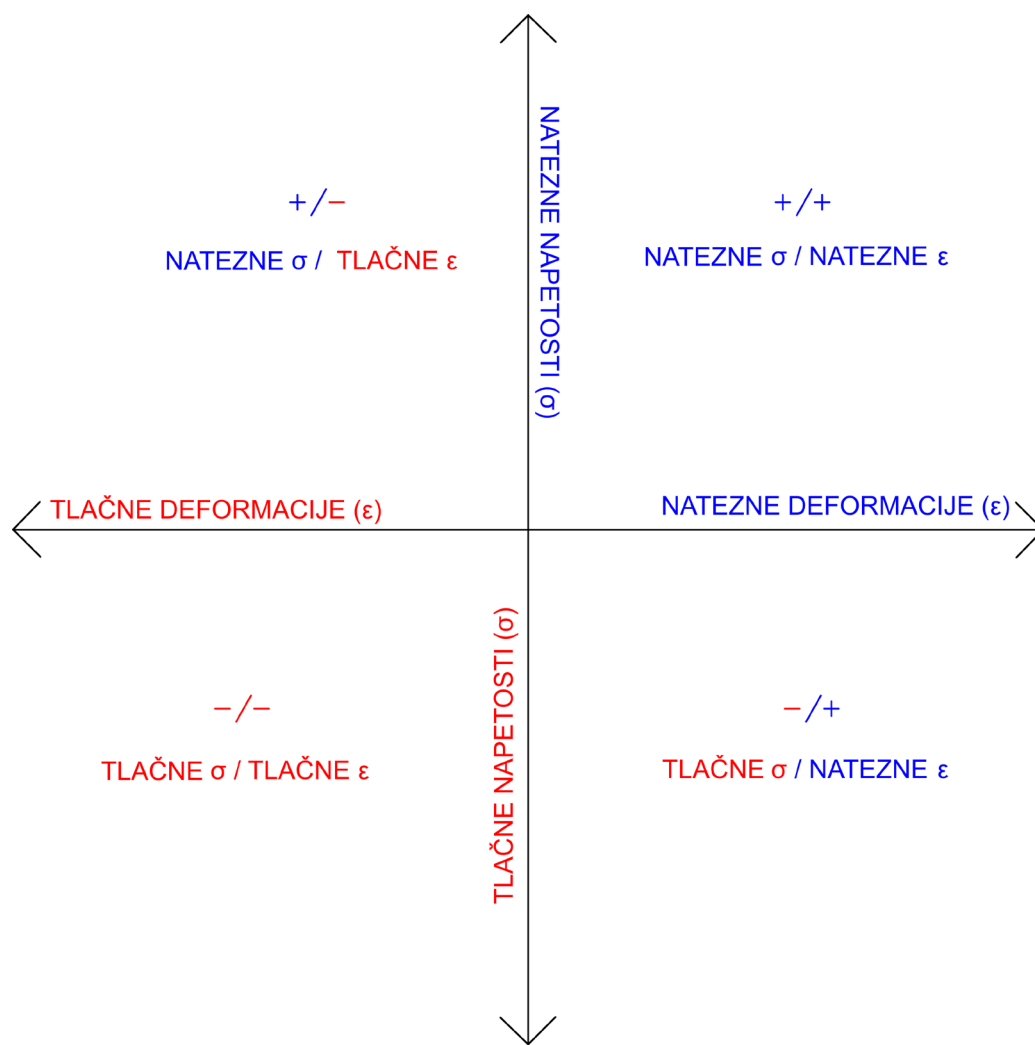
Slika 5.43: Primer izrisa smeri minimalnih in maksimalnih glavnih deformacij na keramični skodelici.

Glavne maksimalne in minimalne napetosti na posameznem preizkušancu so bile izračunane z uporabo glavnih deformacij, s porušnimi preiskavami pridobljenega modula elastičnosti ter Poissonovega količnika:

$$\sigma_{max} = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_{max} + \nu \varepsilon_{min}) = \frac{E}{2} \left[\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{1-\nu} + \frac{1}{1+\nu} \sqrt{2\{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2\}} \right];$$

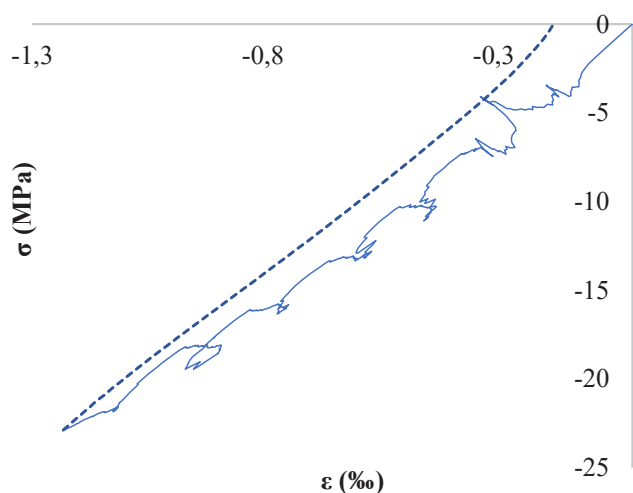
$$\sigma_{min} = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_{min} + \nu \varepsilon_{max}) = \frac{E}{2} \left[\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{1-\nu} - \frac{1}{1+\nu} \sqrt{2\{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2\}} \right].$$

Rezultate merilnih lističev smo ponazorili z grafom napetosti in deformacij (σ - ε) posameznega preizkušanca, kjer pozitivne vrednosti predstavljajo nateg, negativne pa tlak (Slika 5.44).

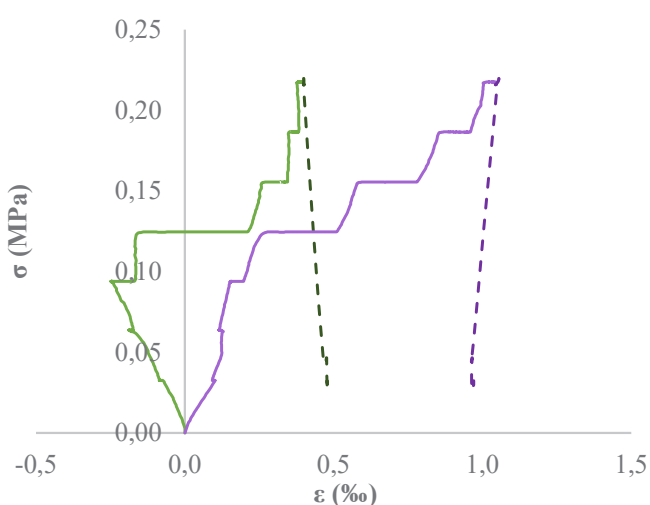


Slika 5.44: Prikaz grafa nateznih (+) in tlačnih (-) napetosti (σ) in deformacij (ϵ).

Pri tem smo upoštevali splošne lastnosti posameznega materiala oz. njegov odziv na obremenitve ter način obremenjevanja. Za boljše razumevanje dogajanja v zemljini smo po potrebi dodatno izdelali grafe deformacij v odvisnosti od obremenjevanja površine preizkuševališča ($\sigma_{\text{pov}}-\epsilon$). Ti bi morali v idealnih okoliščinah slediti jasni, od obremenjevanja odvisni rasti napetosti in deformacij. Stopničasti preskoki so bili tako odraz načina obremenjevanja s postopnim naraščanjem in vzdrževanjem sile (Sliki 5.45–5.46).

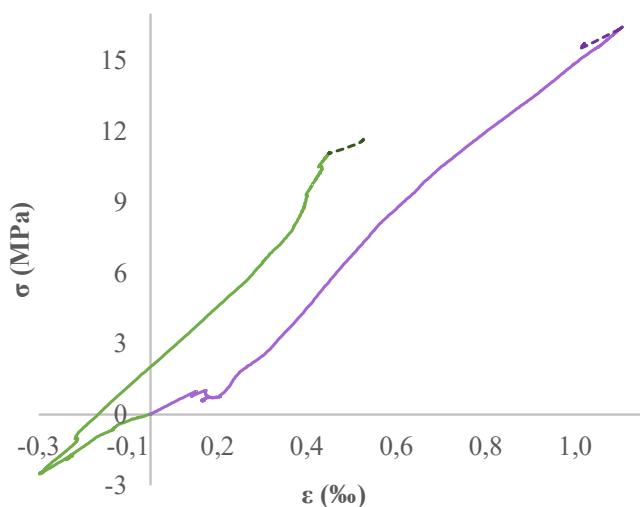


Slika 5.45: Preskoki na grafu napetosti in deformacij preizkušanca ($\sigma-\epsilon$) – odraz stopenjskega obremenjevanja.

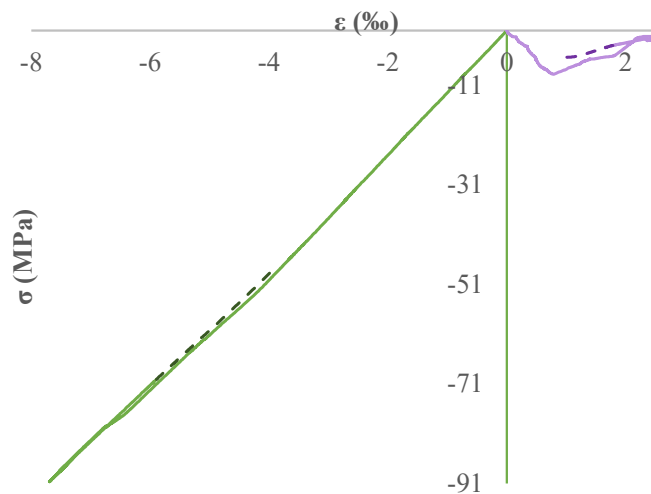


Slika 5.46: Preskoki na grafu deformacij preizkušanca v odvisnosti od obremenjevanja površine ($\sigma_{\text{pov}}-\epsilon$).

Ostra sprememba vrste napetosti in deformacij na grafih σ - ϵ je kazala prehode iz raztezanja v krčenje preizkušanca ali obratno (Slika 5.47). Neskladje med vrsto napetosti in vrsto deformacije, denimo tlačne napetosti in natezne deformacije, je bilo razumljeno kot upogib preizkušanca (Slika 5.48).

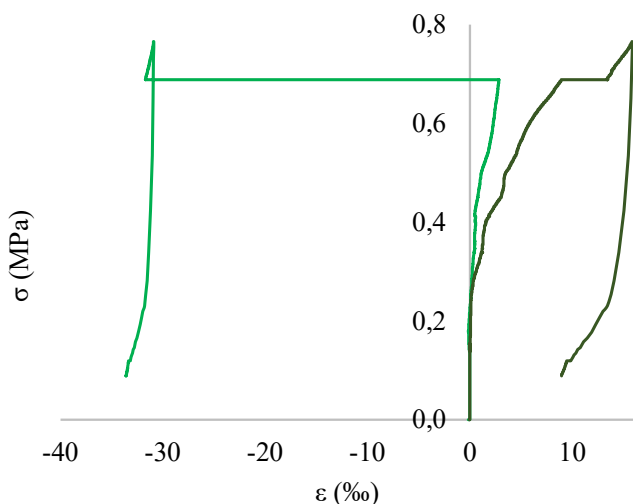


Slika 5.47: Primer ostrega preskoka iz tlačnih v natezne deformacije preizkušanca.

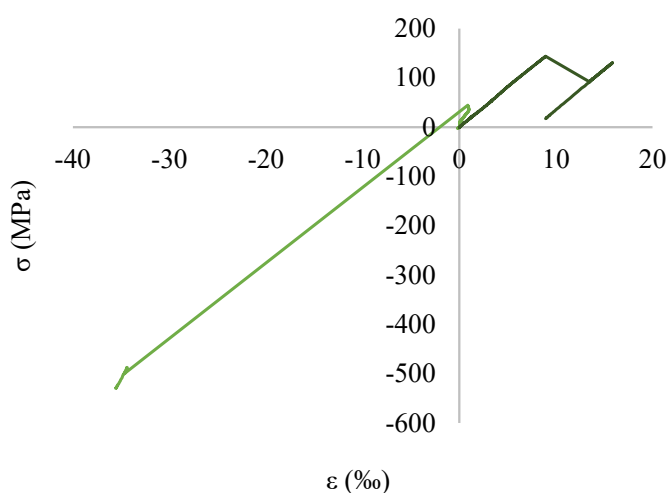


Slika 5.48: Primer tlačnih maksimalnih napetosti z nateznimi maksimalnimi deformacijami preizkušanca.

Pri sunkoviti rasti deformacij brez rasti napetosti je bila interpretirana izrazita poškodba oz. nastanek razpok (Sliki 5.49–5.50).



Slika 5.49: Primer sunkovite rasti deformacij brez rasti napetosti na grafu deformacij preizkušanca v odvisnosti od obremenjevanja površine (σ_{pov} - ϵ).



Slika 5.50: Primer sunkovite rasti deformacij brez dviga napetosti na grafu napetosti in deformacij preizkušanca (σ - ϵ).

Za vse globine (z), na katere so bili nameščeni preizkušanci (Preglednica 5.7), smo izračunali napetosti (σ) v zemljini pred in po obremenjevanju.

Preglednica 5.7: Opazovane globine za izračun napetosti v zemljini.

	MELJ BREZ ZAŠČITE	MELJ Z ZAŠČITO	PROD BREZ ZAŠČITE	PROD Z ZAŠČITO
z	0,225 m	0,475 m	0,675 m	0,925 m

Pri produ smo zaradi njegove grobozrnatosti in visokega hidravličnega potenciala predpostavili specifično gostoto (γ v kN/m^3) suhe zemljine. Pred položitvijo proda v preizkuševališče smo zabeležili njegovo težo (W), ki je znašala 646,25 kg (6,34 kN), in izračunali njegov volumen (V), ki je znašal $0,325 \text{ m}^3$.

Specifično gostoto proda γ_{prod} (kN/m^3) smo izračunali z enačbo:

$$\gamma_{\text{prod}} = \frac{W_{\text{prod}}}{V_{\text{prod}}} = 19,49 \text{ kN/m}^3.$$

Specifično gostoto melja γ_{melj} (kN/m^3) smo za vsak preizkus posebej izračunali na podlagi dilatometrične preiskave – znašala je med 14,7 in 17 kN/m^3 .

Na podlagi specifične gostote melja in proda smo izračunali totalne napetosti na opazovanih globinah (z) preizkuševališča.

Pri izračunavanju napetosti v melju v preizkusih brez zaščitnega sloja (σ_{meljBZ}) smo upoštevali globino $z_{\text{melj225}} = 0,225 \text{ m}$:

$$\sigma_{\text{meljBZ}} = \gamma_{\text{melj}} * z_{\text{melj225}}.$$

Ob uporabi zaščitnega sloja smo napetostim v melju (σ_{meljBZ}) prišteli napetosti 0,25 m debelega ($z_z = 0,25 \text{ m}$) prodnatega sloja (σ_z):

$$\sigma_z = \gamma_{\text{prod}} * z_z,$$

$$\sigma_{\text{meljZZ}} = \sigma_{\text{meljBZ}} + \sigma_z.$$

Za napetosti v produ v preizkusih brez zaščitnega sloja (σ_{prodBZ}) smo najprej izračunali napetosti na globini 0,225 m (z_{prod225}) proda (σ_{prod225}):

$$\sigma_{\text{prod225}} = \gamma_{\text{prod}} * z_{\text{prod225}}.$$

Ker je bil prod prekrit z 0,45 m melja, smo izračunali še napetosti pod globino 0,45 m melja ter jih prišteli napetostim na globini pod 0,225 m proda (σ_{prod225}):

$$\sigma_{\text{melj45}} = \gamma_{\text{melj}} * z_{\text{melj45}},$$

$$\sigma_{\text{prodBZ}} = \sigma_{\text{melj45}} + \sigma_{\text{prod225}}.$$

Ob uporabi zaščitnega sloja so napetosti v produ (σ_{prodZZ}) predstavljale vsoto napetosti brez zaščitnega sloja (σ_{prodBZ}) in napetosti zaščitnega sloja (σ_z):

$$\sigma_{\text{prodZZ}} = \sigma_{\text{prodBZ}} + \sigma_z.$$

Glede na obremenjevanje s pravokotno vertikalno obtežbo q (kN/m^2) smo na podlagi podane teorije o mehaniki tal izračunali prirastek napetosti ($\Delta\sigma$) med obremenjevanjem. Z upoštevanjem dimenzij obremenilne plošče in opazovanih globin smo najprej izračunali vplivni dejavnik oz. koeficient I_3 (Das in Sobhan 2013, 337). Dimenzije obremenilne plošče so znašale $0,8 \times 0,8 \text{ m}$, zato sta bili upoštevani širina (B) in dolžina (L) enaki:

$$B = L = 0,8 \text{ m}.$$

Za določitev koeficienta I_3 potrebne vrednosti m in n smo za posamezno opazovano globino (z) pridobili z enačbo:

$$m = n = \frac{B}{z}.$$

Nato smo vrednosti m in n uporabili za izračun koeficienta I_3 (Das in Sobhan 2013, 337).

Spremembo napetosti ($\Delta\sigma$) smo izračunali z enačbo:

$$\Delta\sigma = q * I_3.$$

Na podlagi totalnih napetosti ter njihovega prirastka smo izračunali dosežene napetosti na opazovanih globinah med obremenjevanjem (σ_{OBR}):

$$\sigma_{OBR} = \sigma + \Delta\sigma.$$

Izračuni so bili sicer opravljeni v kN/m^2 , vendar so bili rezultati zaradi boljše primerljivosti z drugimi podatki in raziskavami pretvorjeni v kPa ($1 \text{ kN/m}^2 = 1 \text{ kPa}$).

6 Rezultati

Na osnovi pred, med in po izvedbi preizkusov zbranih podatkov (Priloge A–J) smo primerjali in interpretirali spremembe, ki jih je povzročilo obremenjevanje (Priloga M).

6.1 Spremembe vlažnosti

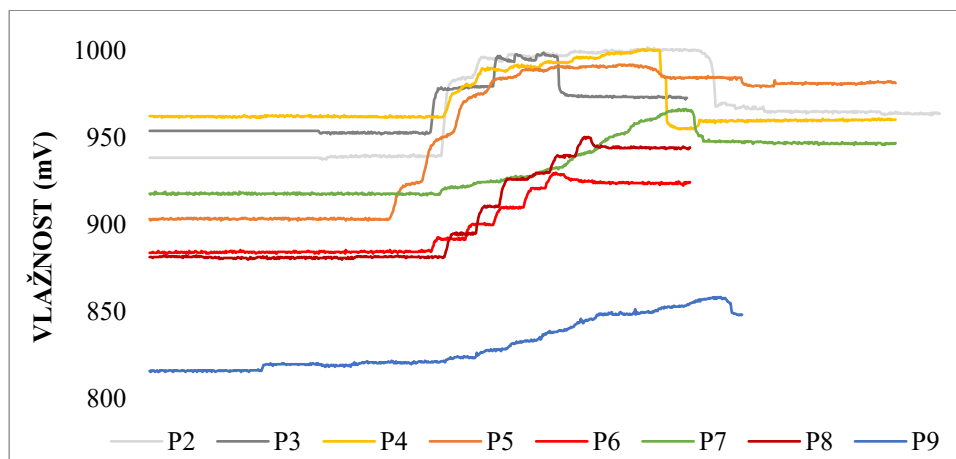
Povečevanje vlažnosti ob obremenjevanju je posledica zgoščevanja zemljine zaradi iztiskanja zraka iz por med trdnimi delci. Med obremenjevanjem je sicer prišlo tudi do iztiskanja vode iz por, vendar je to potekalo zelo počasi, saj je bila zemljina omejena z nepropustno kovinsko celico. Ker so pore v zemljini zapolnjene z zrakom in/ali vodo, manjši delež zraka pomeni večji delež vode in tako višjo vlažnost.

Spremembe vlažnosti (**Slika 6.1**) so bile največje v preizkusu 5 in najmanjše v preizkusu 9. Velike spremembe v preizkusu 5 so verjetno posledica uporabe zaščitnega sloja in velikih vsiljenih sil, ki so povzročile visoko rast napetosti v melju, iztiskanje zraka, zgoščevanje zemljine in naraščanje vlažnosti. Poleg tega je tudi zaščitni sloj vseboval nekaj vode, ki je zaradi vsiljenih sil in visokega hidravličnega potenciala grobozrnatega sloja (Briaud 2013, 382) med obremenjevanjem prodrla v melj in dodatno povečala vlažnost. To je mogoče utemeljiti tudi s preizkusom 7, ki se je od preizkusa 5 razlikoval zgolj po odsotnosti zaščitnega sloja, a so razlike v spremembi vlažnosti pri teh dveh preizkusih izrazite.

Manjše spremembe vlažnosti v preizkusu 4 so posledica višje začetne vlažnosti melja ter manjše vsiljene sile med obremenjevanjem. Zato je bilo zgoščevanje zemljine manjše, s tem pa so bile manjše tudi spremembe vlažnosti. Podoben vpliv višje začetne vlažnosti je viden tudi pri rezultatih preizkusov 2 in 3.

Najmanjše spremembe vlažnosti v preizkusu 9 so posledica nižje začetne vlažnosti melja in njegove dlje trajajoče konsolidacije ter tako manjšega zgoščevanja med obremenjevanjem.

Dinamična preizkusa 6 in 8 kažeta podoben vzorec sprememb, ki pa je bil vendarle bolj izrazit pri obremenjevanju brez zaščitnega sloja v preizkusu 8. Zaradi odsotnosti zaščitnega sloja so bile napetosti v melju med obremenjevanjem večje, s tem pa je bilo večje tudi zgoščevanje zemljine in spremembe vlažnosti. Primerjava med monotonim in dinamičnim obremenjevanjem kaže bolj ostro, stopničasto rast pri slednjem. Spremembe vlažnosti so tako pogojene predvsem s povečevanjem vsiljene sile (hitra rast s povečevanjem sile) in manj z vibracijami (odsotnost dodatnih sprememb ob dodatku vibracij).

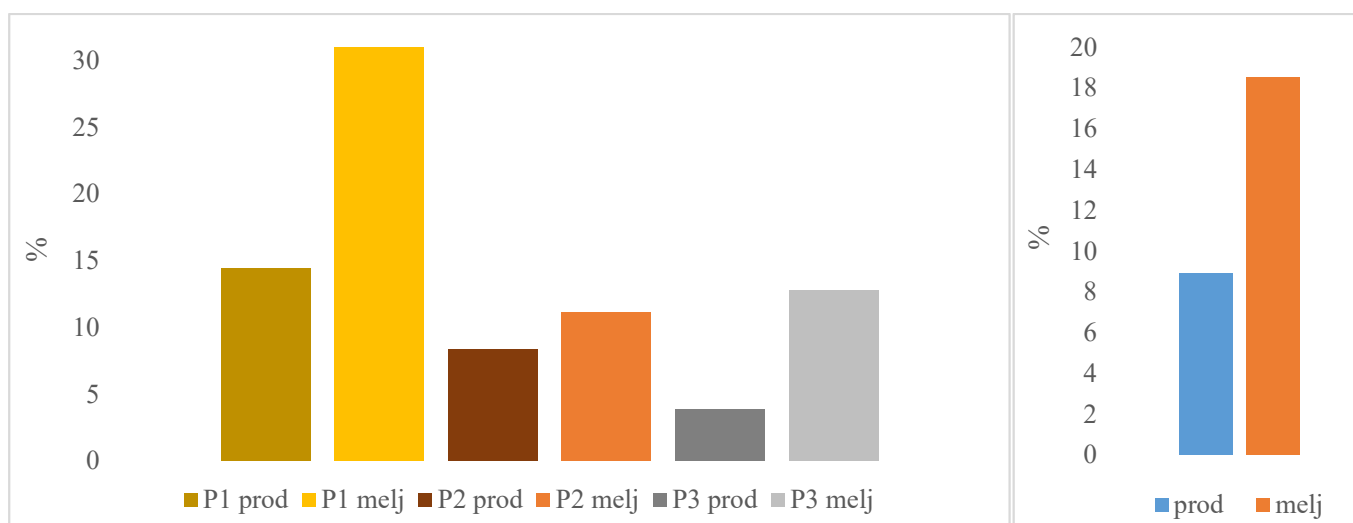


Slika 6.1: Graf sprememb vlažnosti med obremenjevanjem v preizkusih (P) 2–9.

6.2 Zgoščevanje zemljin

Med obremenjevanjem so se zemljine zgostile zaradi iztiskanja zraka in s časom tudi vode iz por ter prerazporeditve delcev v gostejšo strukturo. Pri tem je treba upoštevati razlike med stisljivostjo proda in melja, saj je prvi zaradi grobozrnate strukture slabše stisljiv kot drugi. Vpliv na zgoščevanje ima tudi vlažnost, predvsem na fino zrnati in zato slabše prepusten melj. Zaradi slabe prepustnosti voda ne more dovolj hitro odteči iz zemljine, tako da obremenitve prevzame nase. Ker je voda nestisljiva, se pritisk vode v porah poveča in nastane presežni porni tlak. Z odtekanjem vode iz zemljine se porni tlak znižuje, obremenitve pa se prenešajo na trdne delce. Delci se premaknejo v gostejšo strukturo, zemljina pa se zgosti. Hitreje kot lahko voda odteče, hitreje se bo zemljina zgostila (Das in Sobhan 2013, 364, 365). V pričujoči raziskavi je do odtekanja vode sicer prišlo, a je bilo zaradi obremenjevanja zemljine znotraj kovinske celice upočasnjeno.

V preizkusih 1–3 je bilo zgoščevanje zemljin ([Preglednica M.1](#)) najbolj izrazito v preizkusu 1, kjer so bile vsiljene sile največje. Vendar je bilo zgoščevanje melja mogoče jasno opaziti tudi v preizkusu 3, kjer so bile sile za polovico manjše ([Slika 6.2](#)), dodane pa so bile vibracije. Vibracije, ki jih v preizkusu 1 in 2 ni bilo, so pripomogle k hitrejši prerazporeditvi delcev v gostejšo strukturo in s tem k hitrejšemu zgoščevanju zemljine.



Slika 6.2: Povprečno zgoščevanje proda in melja v preizkusih (P) 1–3.

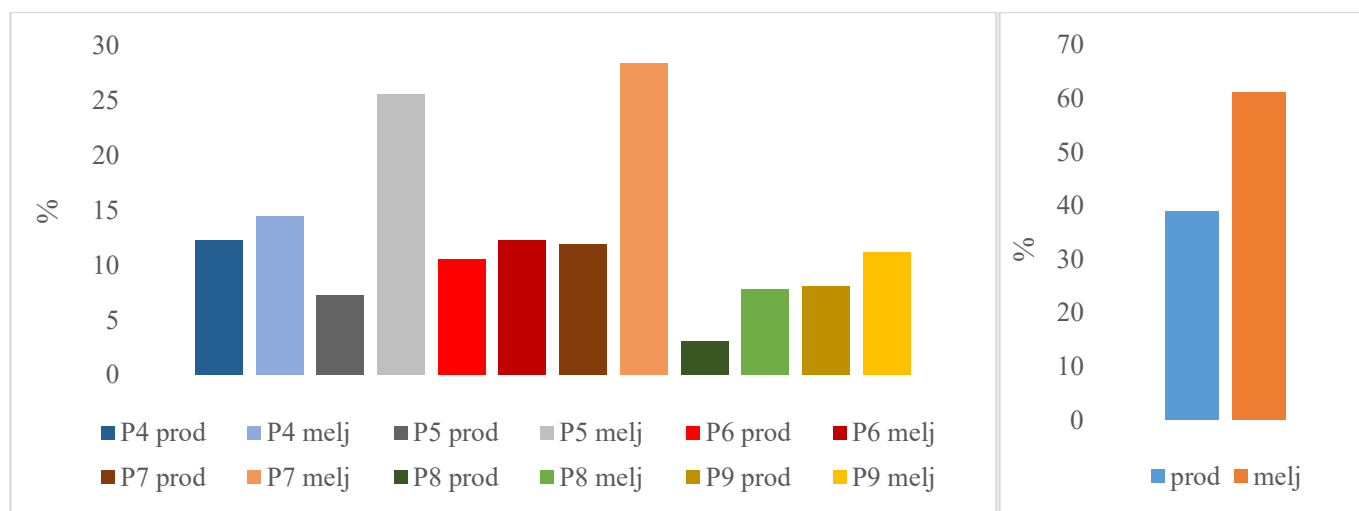
Spremembe debeline zemljin v preizkusih 4–9 ([Preglednica M.2](#); [Slika 6.3](#)) kažejo 22 % večjo zgostitev melja v primerjavi s prodom. Razlika je bila najočitnejša v preizkusih 5 in 7, najmanjša pa v preizkusih 6

in 8. Rezultat kaže razlike v stisljivosti prodra in melja ter razlike med monotonim (preizkusa 5 in 7) in dinamičnim (preizkusa 6 in 8) obremenjevanjem. Slednje je posledica večje vsiljene sile pri monotonem obremenjevanju, kar je posebej vidno v večji zgostitvi melja. Pri dinamičnem obremenjevanju z uporabo zaščitnega sloja je bilo mogoče opaziti izrazito zgoščevanje prodra, verjetno zaradi dodatne teže zaščitnega sloja in vibracij, ki so pripomogle k hitrejši prerazporeditvi delcev v gostejšo strukturo. Velikost sile je imela tako večji vpliv na zgoščevanje finoziarnatega melja, medtem ko so vibracije močnejše vplivale na zgoščevanje groboziarnatega prodra. Zgoščevanje groboziarnate zemljine je namreč optimalno v primeru kombiniranja pritiska in vibracij. Pritisk sam pri groboziarnatih zemljinah zgolj poveča efektivne napetosti in s tem trenje med trdnimi delci zemljine, kar oteži njihove premike. Vibracije zmanjšajo trenje med delci ter olajšajo njihove premike in zdrs v gostejšo strukturo. Pri finoziarnatih zemljinah je stiskanje pogojeno s pritiski in gnetenjem, medtem ko vibracije zgolj povečajo vodni porni tlak (Briaud 2013, 701).

Po rezultatih stiskanja zemljin izstopa preizkus 4, pri katerem je bilo zgoščevanje prodra in melja enakomerno ter manj izrazito kot v preostalih preizkusih. Tak rezultat je deloma posledica 20 kN nižjih vsiljenih sil, večji vpliv pa je imela večja vlažnost melja v tem preizkusu.³⁷ Večja vlažnost namreč pomeni večji delež porne vode, ki zaradi finoziarnate strukture melja in omejenosti s kovinsko celico ni mogla dovolj hitro odteči. Tako je večja vlažnost botrovala razvoju in dlje vzdrževanemu presežnemu pornemu tlaku.

Največje zgostitve plasti so bile vidne pri preizkusu 7, v katerem je obremenjevanje potekalo brez zaščitnega sloja. Ker vpliv obremenitev površine na rast napetosti v zemljini z globino upada, so bile zaradi odsotnosti zaščitnega sloja spremembe napetosti večje. To je dobro vidno pri primerjavi preizkusov 5 in 7, ki sta se razlikovala zgolj po tem, da v slednjem zaščitni sloj ni bil uporabljen, tako da je bilo zgoščevanje zemljin v preizkusu izrazitejše. Primerjava med dinamičnima preizkusoma 6, z zaščitnim slojem, in 8, brez zaščitnega sloja, kaže izrazitejšo zgostitev zemljin pri preizkusu 6. Rezultat je posledica učinka vibracij, pri katerih je zaščitni sloj oz. njegova dodatna teža povzročila izrazitejše zgoščevanje zemljin.

Pri monotonem preizkusu 9 je bilo zgoščevanje obeh zemljin izrazito manjše kot pri ostalih monotonihih preizkusih. Za boljše razumevanje je preizkus 9 ustrezno primerjati s preizkusom 7. Glavna razlika med preizkusoma 7 in 9 je štirimesečna konsolidacija zemljin v preizkusu 9, medtem ko so bili ostali pogoji podobni. Razlike v zgoščevanju zemljin so tako posledica veliko daljše konsolidacije, do katere je prišlo zaradi lastne teže zemljin, gravitacije in vode.



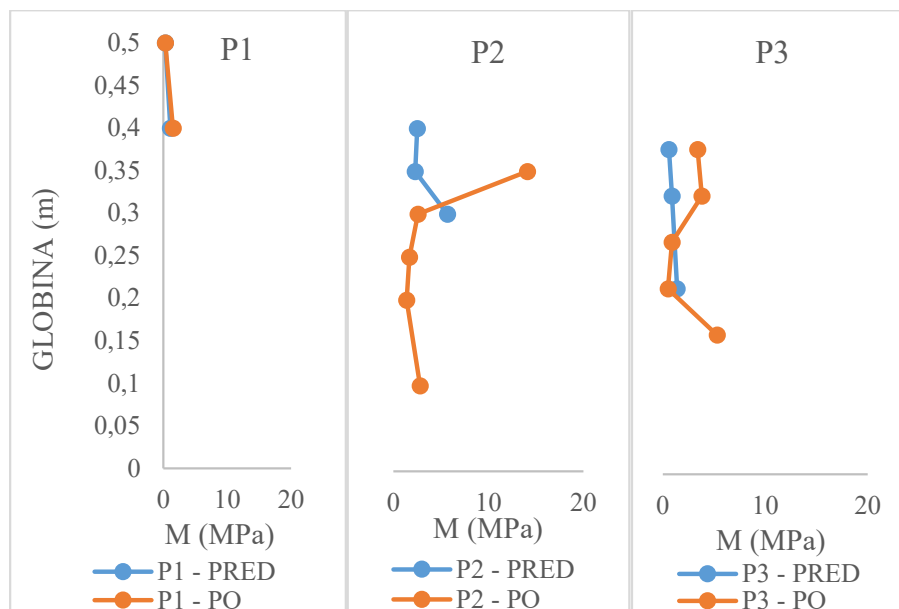
Slika 6.3: Povprečno zgoščevanje prodra in melja v preizkusih (P) 4–9.

³⁷ Preizkus 4 je bil izveden že 2 dni po pripravi preizkuševališča (Preglednica 6.1), kar je omejilo čas za odtekanje vode in sušenje melja. Zaradi groboziarnate strukture in minimalne sposobnosti zadrževanja vlage predpostavljamo, da vlažnost ni imela izrazitega vpliva na prodra.

6.3 Spremembe modula stisljivosti tal

Ker modul stisljivosti tal (M) odraža odpor snovi na stiskanje ter je definiran z razmerjem med spremembo tlaka in prostornine, je bilo mogoče z zgoščevanjem zemljine zaradi obremenjevanja pričakovati njegovo povečanje.

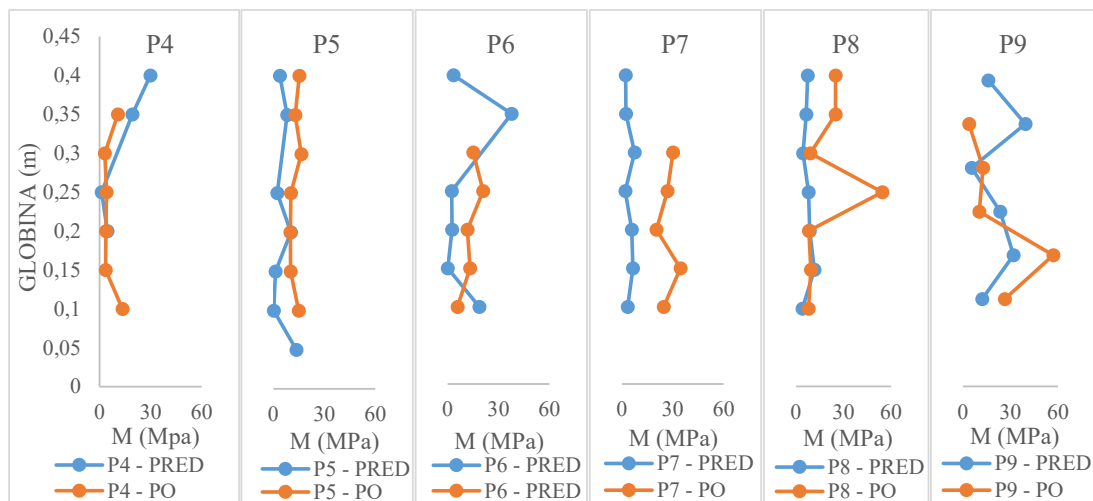
V preizkusih 1–3 je bil modul stisljivosti po obremenjevanju večji kot pred obremenjevanjem, najočitneje na globinah med 0,3 in 0,4 m (Slika 6.4).



Slika 6.4: Modul stisljivosti (M) pred (modra) in po (oranžna) obremenjevanju v preizkusih (P) 1–3.

Prav tako je bil modul stisljivosti večji po obremenjevanju v preizkusih 5–9 (Slika 6.5). Izjema je preizkus 4, pri katerem je bil modul pred in po obremenjevanju podoben, v globljih delih plasti celo nekoliko nižji po obremenjevanju. Odstopanje je verjetno posledica večje vlažnosti in manjšega zgoščevanja zemljin v preizkusu 4. Za primerjavo je ustrezen preizkus 5, kjer je bila vlažnost melja nižja, modul stisljivosti po obremenjevanju pa višji. Še višji kot v preizkusu 5 je bil modul stisljivosti po obremenjevanju v preizkusu 7, kar je posledica odsotnosti zaščitnega sloja in zato višjih napetosti v melju v preizkusu 7. Primerjava med dinamičnima preizkusoma 6 in 8 kaže večji vpliv obremenitev ter povečanje modula stisljivosti v zgornjem delu melja, ko je bil zaščitni sloj uporabljen (preizkus 6), medtem ko je bil v spodnjem delu melja vpliv obremenitev večji, ko zaščitni sloj ni bil uporabljen (preizkus 8).

Modul stisljivosti preizkusa 9 je bil zaradi daljše predhodne konsolidacije (štirje meseci) in s tem manjšega volumna zemljine že pred obremenjevanjem višji kot pri ostalih preizkusih. Primerjava med modulom pred in po obremenjevanju pa kaže, da je bil modul stisljivosti v zgornjem delu melja višji po obremenjevanju, medtem ko je bil v spodnjem delu melja modul višji pred obremenjevanjem. Pri daljši konsolidaciji zemljine je tako vpliv obremenjevanja z naraščanjem globine izrazito upadel. Ta upad je razumljiv, saj je bil zaradi daljše konsolidacije spodnji del zemljine že pred obremenjevanjem bolj zgoščen. Pri preizkusu 7, kjer konsolidacija zemljine ni potekala tako dolgo kot v preizkusu 9, medtem ko so bili ostali pogoji podobni, tovrstnega upada z naraščanjem globine ni bilo mogoče opaziti.



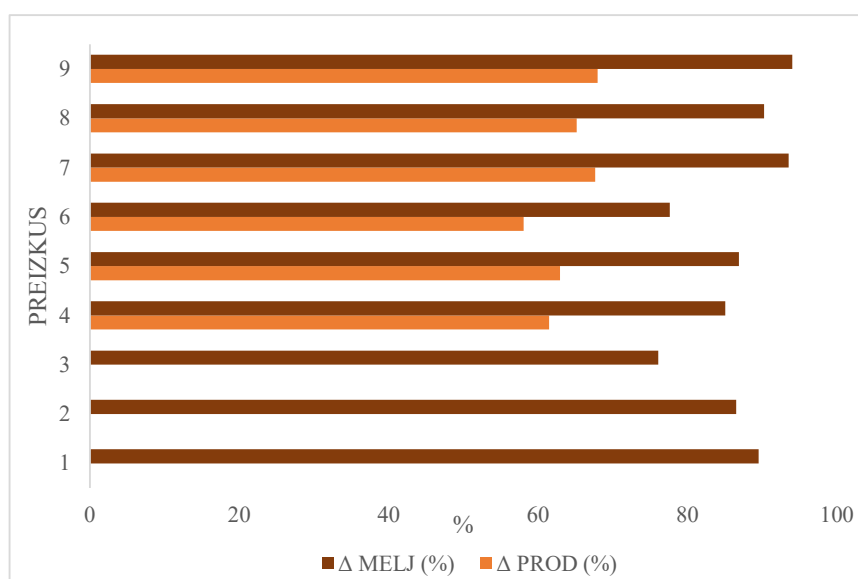
Slika 6.5: Modul stisljivosti (M) na različnih globinah plasti melja v preizkusih (P) 4–9 pred (modra) in po (oranžna) obremenjevanju.

6.4 Spremembe napetosti v zemljini

Totalne napetosti na opazovanih globinah pred obremenjevanjem (σ) (**Preglednica M.3**) so bile v prvih treh preizkusih, kjer preizkušancev v produ ni bilo, izračunane zgolj za melj ter so znašale med 8,2 kPa in 8,7 kPa. V preizkusih 4–6 so totalne napetosti v produ znašale 16,8–17,7 kPa, v melju pa 8,4–8,7 kPa. Zaradi odsotnosti zaščitnega sloja v preizkusih 7–9 so bile totalne napetosti v produ med 11,5 kPa in 12,0 kPa ter v melju med 3,5 kPa in 3,8 kPa.

Z obremenjevanjem so napetosti v zemljinah naraščale. Izračunane največje napetosti (σ_{MAX}) na opazovanih globinah (**Preglednica M.4**) so podane za zadnjo stopnjo obremenjevanja, ko so napetosti pri monotoni preizkusih dosegle 140 kN (preizkus 4), 160 kN (preizkusi 2, 3, 5, 7, 9) in 200 kN (preizkus 1), pri dinamičnih pa 85 kN–95 kN. Med obremenjevanjem so totalne napetosti v melju v preizkusih 1–3 znašale med 36,4 kPa in 78 kPa, v preizkusih 4–6 med 39,5 kPa in 58 kPa v produ ter med 38,9 kPa in 64,1 kPa v melju, v preizkusih 7–9 pa med 35,1 kPa in 52,3 kPa v produ ter med 36,3 kPa in 59,5 kPa v melju.

Spremembe ($\Delta\sigma$) med totalnimi napetostmi pred obremenjevanjem in največjimi doseženimi napetostmi med obremenjevanjem (**Slika 6.6**) so podane v **Preglednici M.5**. V preizkusih 1–3 so bile spremembe v melju 76,1 %–89,5 %. V preizkusih 4–9 so bile spremembe v produ 58,1 %–68 % in v melju 77,6 %–94 %.



Slika 6.6: Spremembe napetosti ($\Delta\sigma$) med obremenjevanjem na opazovanih globinah v melju (rjava) in produ (oranžna).

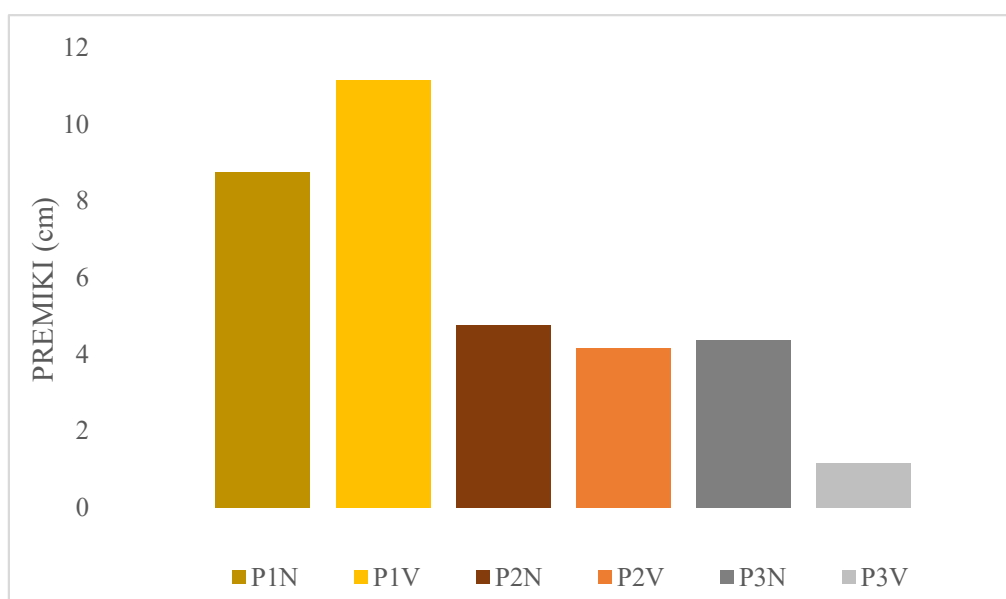
Razlike so skladne z velikostjo vsiljene sile, ki je bila najmanjša pri dinamičnem obremenjevanju (preizkusi 3, 6 in 8), največja pa pri monotonem zveznem obremenjevanju (preizkus 1) ter pri monotonem stopenjskem obremenjevanju z uporabo zaščitnega sloja (preizkusi 1–6). Razlika med preizkusoma 4 in 5 odraža 20 kN manjšo vsiljeno silo pri preizkusu 4. Spremembe napetosti v preizkusih 7–9 so v primerjavi s spremembami v preizkusih 5 in 6 večje, kar je posledica zaščitnega sloja, uporabljenega pri preizkusih 5 in 6. Delež spremembe je v preizkusih 7–9 večji, medtem ko so končne napetosti v zemljini podobne v vseh preizkusih. Opaženo manjšo rast napetosti v produ je mogoče pripisati predvsem zmanjšanju vpliva obremenjevanja z naraščanjem globine (Soehne 1958, Das in Sobhan 2013, 166).

Ugotovljene rezultate lahko primerjamo z rezultati raziskave Godwina in sodelavcev (2009, Priloga 1). Izračunane totalne napetosti med obremenjevanjem so namreč podobne napetostim, ki jih na globini 0,25 m povzročijo rigolni plug in težki valjar (25 kPa–30 kPa) ter pettonski kombajn na gosenicah ali s pnevmatikami z zračnim tlakom 1 bar (50 kPa–80 kPa). Na večjih globinah, med 0,55 m in 0,65 m, podobno visoke napetosti (50 kPa–80 kPa) povzročijo dvotonski traktor ter pet- in desettonski kombajn s pnevmatikami z zračnim tlakom 1–2 bara (Godwin et al. 2009, Priloga 1, 16–19).

6.5 Premiki preizkušancev

Z geodetskim inštrumentom izvedene meritve preizkušancev so omogočile spremljanje premikov, do katerih je prihajalo med obremenjevanjem (Prilogi M in L).

Pri preizkusih 1–3 so bili največji povprečni premiki preizkušancev (**Preglednica M.6; Slika 6.7**) ugotovljeni v preizkusu 1. Premiki so bili izrazitejši pri vodoravno nameščenih preizkušancih in manj izraziti pri navpično nameščenih. Večji premiki v preizkusu 1 kot v preizkusih 2 in 3 so posledica večjih obremenitev oz. vsiljenih sil v preizkusu 1. Premiki navpičnih preizkušancev v preizkusu 2 in 3 so podobni, medtem ko so bili pri vodoravnih preizkušancih preizkusa 2 premiki 60 % večji. V preizkusu 3 so vibracije povzročile večje premike navpičnih preizkušancev, medtem ko so imele na premike vodoravnih preizkušancev minimalen vpliv. Rezultati vseh treh preizkusov kažejo, da so premiki vodoravno nameščenih preizkušancev bolj odvisni od velikosti vsiljene sile ter manj od vibracij, medtem ko je pri premikih navpično nameščenih preizkušancev obratno.



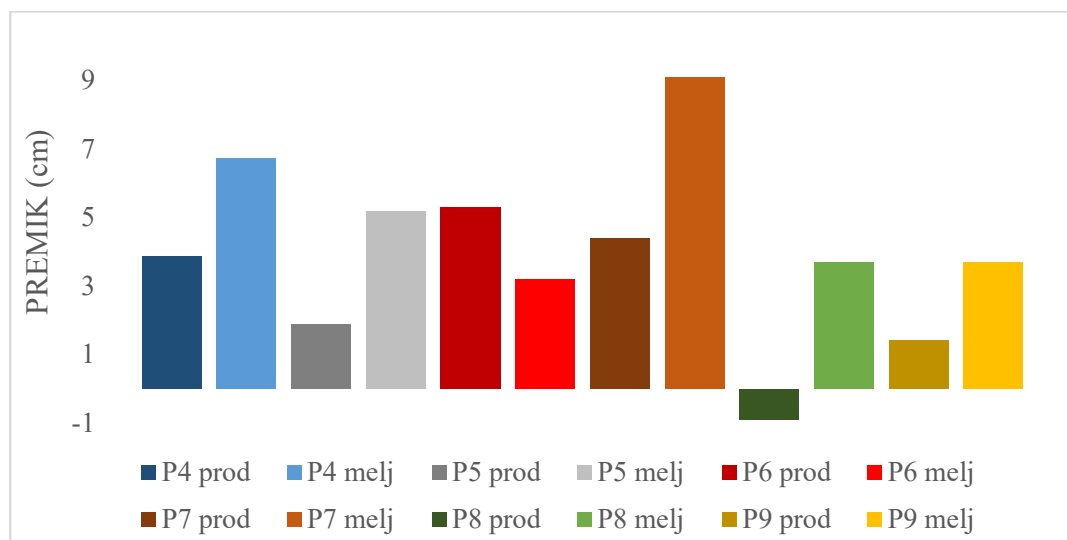
Slika 6.7: Premiki navpično (N) in vodoravno (V) nameščenih preizkušancev v preizkusih (P) 1–3.

V preizkusih 4, 5 in 7–9 so bili povprečni premiki preizkušancev (Preglednica M.7; Slika 6.8) v melju približno dvakrat večji kot v produ. Izstopa preizkus 6, kjer so bili povprečni premiki preizkušancev večji v produ.

Največji premiki so bili opaženi v preizkusu 7, kar je mogoče pripisati velikim vsiljenim silam ter odsotnosti zaščitnega sloja. Pomembno vlogo zaščitnega sloja pri premikih kaže primerjava med preizkusoma 5 (z zaščitnim slojem) in 7 (brez zaščitnega sloja), saj so bili premiki v preizkusu 5 manjši. Iz primerjave s preizkusom 4, v katerem je bila zemljina bolj vlažna kot pri preizkusih 5 in 7, je mogoče sklepati, da je večja vlažnost dodatno prispevala k premikom preizkušancev. Premiki v preizkusu 4 so bili namreč večji kot premiki v preizkusu 5, četudi je bil pri obeh preizkusih uporabljen zaščitni sloj in je bila vsiljena sila v preizkusu 4 za 20 kN manjša. Vpliv večje vlažnosti na večje premike je razločljiv z delovanjem presežnih pornih tlakov, ki so v bolj vlažni zemljini preizkusa 4 delovali kot protiutež silam obremenjevanja, medtem ko so bili preizkušanci trdna snov z razmeroma veliko površino in so bili tako podvrženi visokim tlačnim obremenitvam.

Najmanj so se premaknili preizkušanci v preizkusu 8, kjer so bili v produ ugotovljeni celo rahli premiki navzgor, kar je verjetno posledica vibracij. Nepredvidljiv vpliv vibracij je viden tudi v primerjavi med dinamičnima preizkusoma 6 in 8. Kljub uporabi zaščitnega sloja v preizkusu 6 so bili premiki preizkušancev večji kot pri preizkusu 8, kjer zaščitnega sloja ni bilo.

V preizkusu 9 je mogoče opaziti manj premikov preizkušancev v primerjavi s preostalimi preizkusi z monotonim obremenjevanjem (preizkusi 4, 5 in 7). Manj premikov, podobno kot manjše zgoščevanje zemljin, je verjetno posledica nižje vlažnosti ter dlje trajajoče konsolidacije zemljine. Vpliv vlažnosti na zgoščevanje zemljine in premike preizkušancev je bil že prikazan s primerjavo preizkusov 4 in 5. Vpliv dlje trajajoče konsolidacije zemljine je mogoče razumeti kot učinek manjšega deleža por in gostejše strukture trdnih delcev zemljine, kar je otežilo premike preizkušancev.



Slika 6.8: Povprečni premiki preizkušancev v produ in melju preizkusov (P) 4–9.

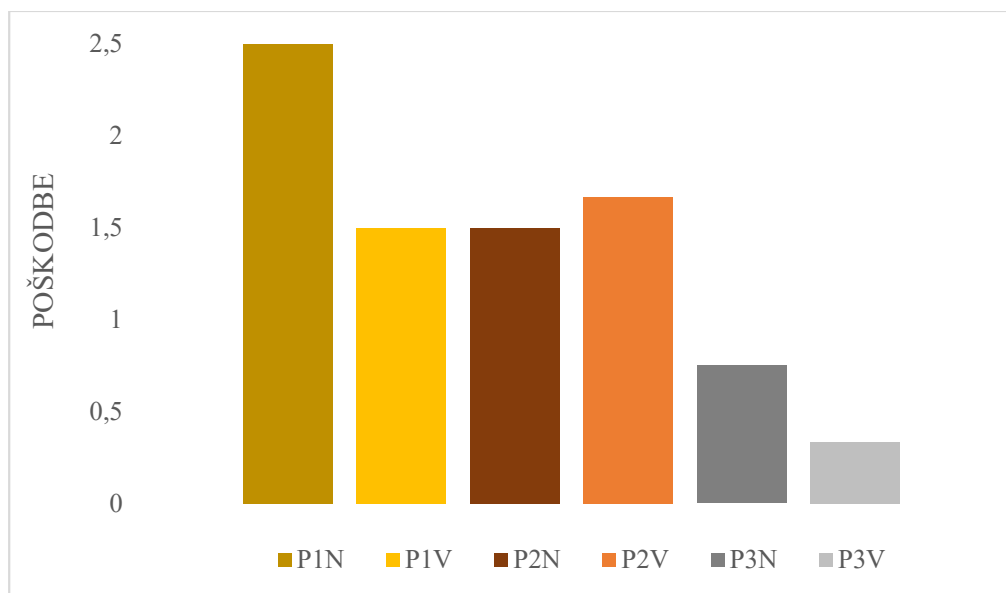
Primerjava med povprečnimi premiki preizkušancev in zgoščevanjem zemljine kaže, da je pri večji zgostitvi prišlo do več in pri manjši do manj premikov. Odstopa dinamični preizkus 6, kjer so bili povprečni premiki v manj zgoščenem produ večji kot v bolj zgoščenem melju.

6.6 Poškodbe preizkušancev

Pri poškodbah lesa je treba vedeti, da je bilo stanje ohranjenosti preizkušancev že pred preizkusi različno, saj je bil uporabljen les z novoveških arheoloških najdišč, ki je bil izpostavljen različnim dejavnikom. Poleg tega je treba upoštevati proces nameščanja in »izkopavanja« lesa v oz. z preizkuševališča, pri katerem se lahko moker les hitro poškoduje. Kljub temu so rezultati preizkusov pokazali nekaj razlik v poškodbah, ki so jih preizkušanci utrpeli v različnih preizkusih.

Preizkušanci se v nobenem preizkusu niso bistveno poškodovali (Slika 6.9). Najopaznejše razlike so bile vidne na že načetih preizkušancih, npr. odlomljenih delih kolov in desk ter na površinah, ki so se že pred preizkusom luščile. Na preizkušancih se je zaradi obremenjevanja redko pojavila nova poškodba. Opazne so bile predvsem odrgnine, v posameznih primerih pa je prišlo do povečanja že obstoječih razpok. Tak primer je navpično postavljena lesena deska (LE-DE-2), katere manjši del se je zaradi močno povečane predhodne razpoke odlomil.

Povprečne poškodbe so bile največje v monotonem preizkusu 1, medtem ko je bilo najmanj poškodb v dinamičnem preizkusu 3. Pri obeh preizkusih, 1 in 3, je več poškodb nastalo na navpično nameščenih preizkušancih. Ti so bili podvrženi večjim poškodbam ne glede na način (monotono ali dinamično) obremenjevanja, obenem pa je imela velikost sile večji vpliv od vibracij.

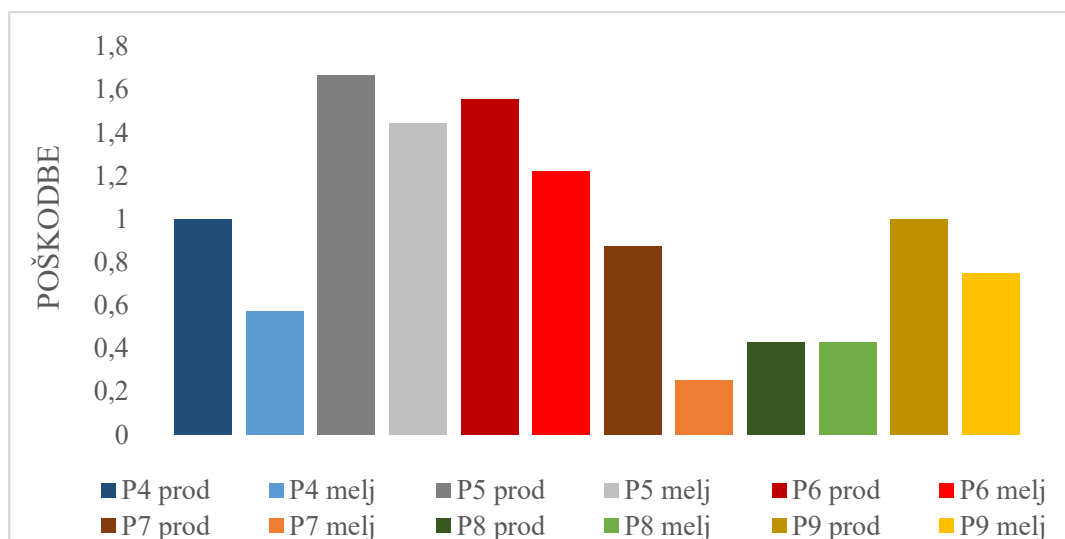


Slika 6.9: Poškodbe navpično (N) in vodoravno (V) nameščenih preizkušancev v preizkusih (P) 1–3.

Manjše poškodbe vodoravno nameščenih preizkušancev v primerjavi z navpično nameščenimi so razložljive z lego preizkušancev in načinom obremenjevanja. Največja površina vodoravno nameščenih preizkušancev je bila vzporedna obremenilni plošči, zaradi česar so se obremenitve bolj enakomerno razporedile po preizkušancu. Poleg tega so navpično namešчени preizkušanci ob premikanju navzdol prišli v stik z grobo plastjo proda, ki je omejila njihovo nadaljnje premikanje in povečala poškodbe.

Podatki (Priloga L) o povprečnih poškodbah preizkušancev v preizkusih 4–7 in 9 kažejo več poškodb v produ in manj v melju. Izjema je preizkus 8, kjer so bile poškodbe v obeh zemljinah podobne (Slika 6.10). Več poškodb v produ je posledica njegove manjše stisljivosti, grobozrnatosti in nizke vlažnosti. Omenjene lastnosti namreč ustvarjajo dobre pogoje za prenos napetosti iz zemljine na preizkušance (Sidell et al. 2004, Booth in Spandl 2009). Primerjava preizkusov z monotonim obremenjevanjem (4, 5, 7 in 9) kaže blažilen vpliv vlažnosti zemljine na poškodbe preizkušancev, saj je bilo najmanj poškodb v najbolj vlažnih pogojih preizkusa 4. V preizkusih z zaščitnim slojem (preizkusi 4–6) so se preizkušanci močneje poškodovali kot v

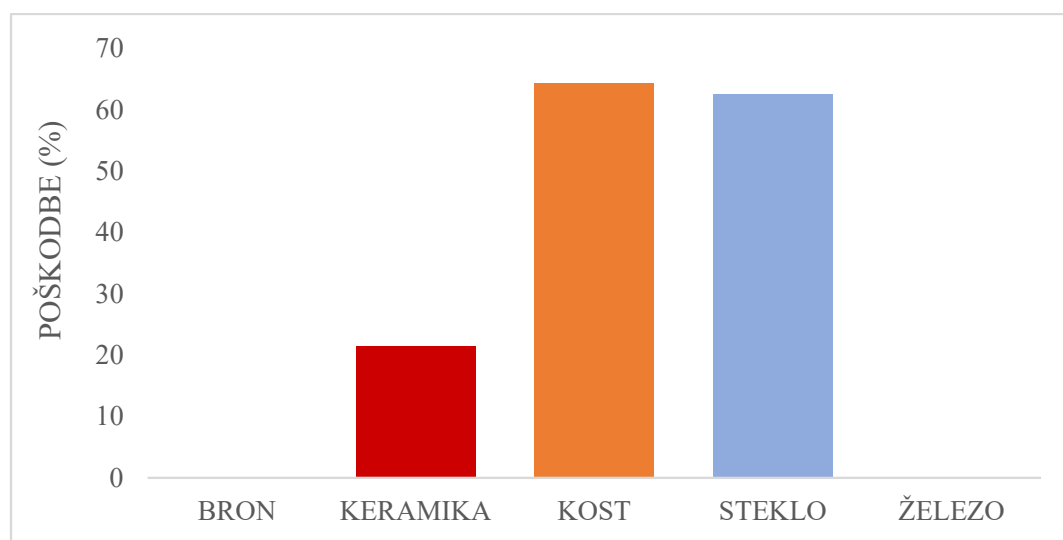
preizkusih brez zaščitnega sloja (preizkusi 7–9), posebej v kombinaciji z vibracijami (preizkus 6), saj je razlika med dinamičnima preizkusoma 6 (z zaščitnim slojem) in 8 (brez zaščitnega sloja) izrazitejša. Primerjava preizkusov 7 in 9 kaže več poškodb v preizkusu 9, pri katerem je imela zemljina več časa za konsolidacijo.



Slika 6.10: Poškodbe preizkušancev v produ in melju preizkusov (P) 4–9.

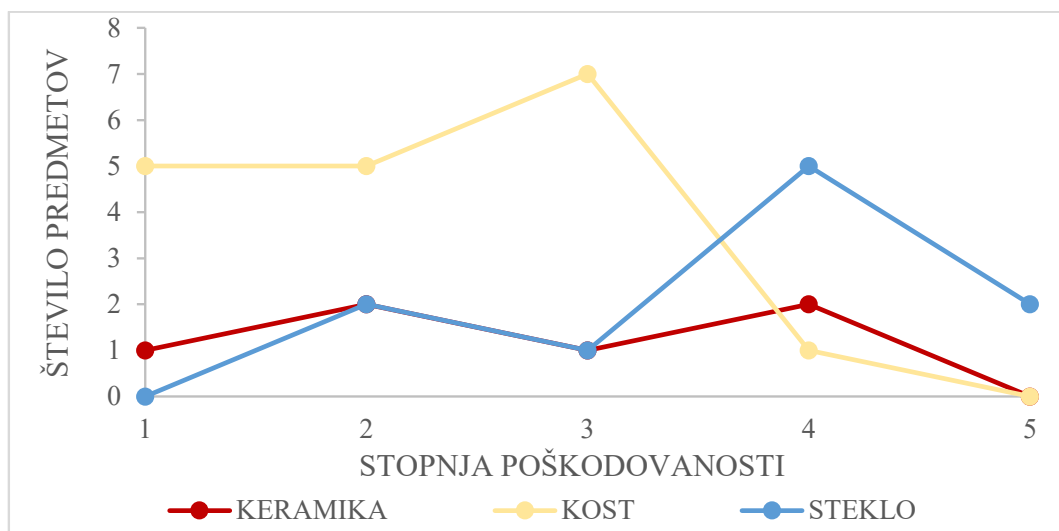
Rezultati kažejo obratno razmerje med premiki in poškodbami preizkušancev. Manjši kot so bili premiki, več poškodb je nastalo na preizkušanih. Izjema je preizkus 6, kjer omenjenega razmerja ni mogoče opaziti.

Pri poškodbah preizkušancev je treba omeniti tudi razlike med posameznimi materiali. Kovinski preizkušanci se v nobenem preizkusu niso poškodovali, medtem ko je 6 od 28 (21,4 %) keramičnih, 10 od 16 (62,5 %) steklenih in 18 od 28 (64,3 %) koščenih preizkušancev utrpelo bolj ali manj izrazite poškodbe (Slika 6.11).



Slika 6.11: Poškodbe preizkušancev glede na material v preizkusih 4–9.

Pri koščenih preizkušanih večina poškodb sodi med manjše in srednje poškodbe (stopnje 1–3), medtem ko je pri steklu več večjih poškodb (stopnji 4 in 5). Pri keramičnih preizkušanih so enakomerno zastopane vse stopnje poškodb, razen največje (stopnja 5) (Slika 6.12).



Slika 6.12: Stopnje poškodb keramičnih, steklenih in koščenih preizkušancev v preizkusih 4–9.

Poškodbe preizkušancev so skladne z mehanskimi lastnostmi materialov. Kovina je izredno odporna in žilava, kar pomeni, da so za nastanek deformacij potrebne visoke napetosti. Tudi sveža kost velja za odporen in žilav material, tako da so za mehanske poškodbe potrebne visoke napetosti. Toda kost, kot biološki in nepravilno oblikovan preizkušane, v zemljini hitro utrpí manjše poškodbe. To velja predvsem za sestavljeno, izrazito 3D oblikovano in votlo lobanjo, ki je utrpela največ poškodb. Večje število izrazitejših poškodb stekla in keramike kaže njuno krhkost ter nagnjenost k pokanju in lomljenju ob izpostavitvi obremenitvam.

Pri razumevanju poškodb velja upoštevati tudi rezultate preizkusa 10, s katerim je bila izvedena primerjava med odzivi sodobne in iz arheoloških kontekstov pridobljene keramike in kosti. Rezultati jasno kažejo večjo občutljivost preizkušancev iz arheoloških kontekstov. Ti so bili pred uporabo v preizkusih daljše časovno obdobje izpostavljeni vplivom okolja, zaradi česar so utrpeli spremembe, ki so oslabile njihove mehanske lastnosti. Pri keramičnih preizkušancih je pomembna predvsem njihova poroznost.³⁸ Ta je bila pri preizkušancih arheološkega izvora zaradi drugačnega načina izdelave ter predhodne izpostavljenosti vplivom okolja večja kot pri sodobnih preizkušancih. Pri kosti je razliko mogoče pripisati kolagenu oz. njegovi slabši ohranjenosti v kosteh arheološkega izvora. Izguba kolagena zmanjša elastičnost in s tem trdnost kosti, ki postane krhka (Boskey et al., 1999, van der Meulen et al., 2001, Tuukkanen et al., 2000). Oslabljenе mehanske lastnosti so tako razlog za večjo občutljivost in poškodbe preizkušancev iz arheoloških kontekstov.

6.7 Rezultati merilnih lističev

Zaradi različnih lastnosti se posamezni materiali na obremenitve odzivajo povsem drugače, zato so bili rezultati merilnih lističev interpretirani po skupinah materialov.

Pri železu so bile napetosti in deformacije natezne in tlačne, kar pomeni, da so se preizkušanci med obremenjevanjem raztezali in krčili. Natezne deformacije ob nateznih napetostih in tlačne deformacije ob tlačnih napetostih kažejo, da se preizkušanci med obremenjevanjem niso upogibali. Največje napetosti in deformacije (Sliki 6.13–6.14) so nastale pri preizkušancih v produ v preizkusu 5, najmanjše pa v produ v preizkusu 8. Rezultati monotonih preizkusov 5 (z zaščitnim slojem) in 7 (brez zaščitnega sloja) kažejo izrazito večje vrednosti pri železu v produ v preizkusu 7. Rezultati dinamičnih preizkusov 6 (z zaščitnim slojem) in 8 (brez zaščitnega sloja) kažejo nižje vrednosti pri železu v melju in višje pri železu v produ v preizkusu 8. Primerjava med monotonim

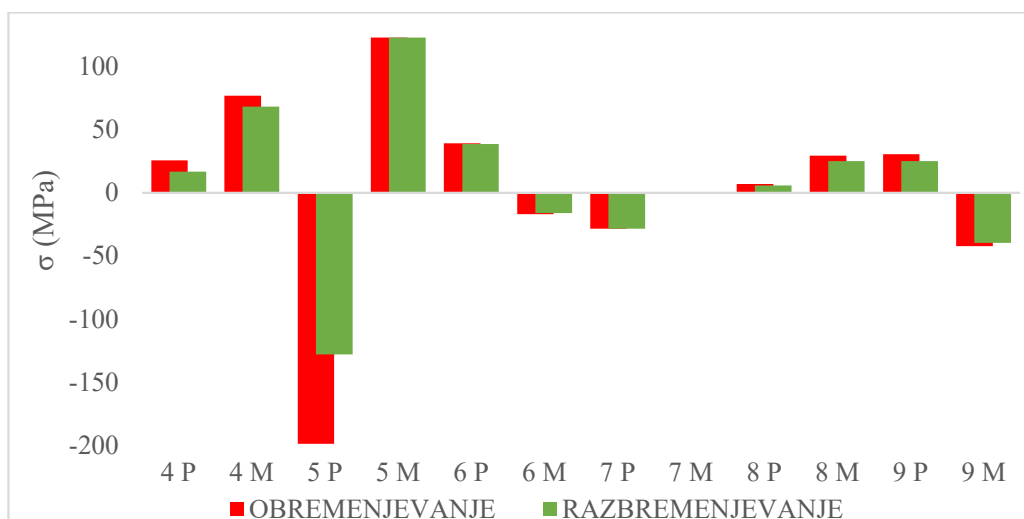
³⁸ Pri keramičnih preizkušancih je treba zaradi različne sestave mase ter procesa izdelave opozoriti na raznoliko strukturo keramike, bodisi med sodobno in staro bodisi med njenimi različnimi vrstami. Ker kompleksnost razlik presega okvir pričujoče raziskave, je bilo predpostavljeno, da je starejša keramika bolj porozna kot sodobna ter ima zato slabše mehanske lastnosti.

obremenjevanjem v preizkusih 5 in 7 ter dinamičnim v preizkusih 6 in 8 kaže jasno nižje napetosti in deformacije pri železu v dinamičnih preizkusih. Pri monotoni preizkusih brez zaščitnega sloja 7 in 9 so bile napetosti in deformacije višje v preizkusu 9, pri katerem je imela zemljina pred obremenjevanjem več časa za konsolidacijo. Ob primerjavi preizkusov 7 in 9 z monotonim preizkusom 5, pri katerem je bil uporabljen zaščitni sloj, so v produ in melju preizkusa 5 vidne izrazito višje napetosti in deformacije.

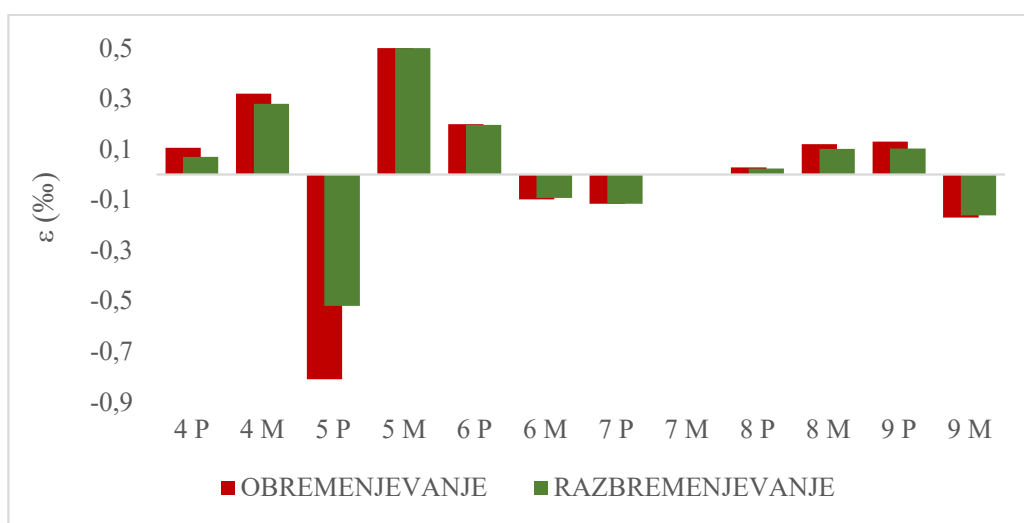
Na vseh železnih preizkušancih so bile ugotovljene linearne deformacije brez prehoda v tečenje ali porušitve. Edino pri preizkušancu v preizkusu 5 so se napetosti (-198 MPa v produ in 123 MPa v melju) približale natezni trdnosti kovanega železa, ki je podana v literaturi (150 MPa–448 MPa), in natezni trdnosti, ki smo jo pridobili s spremljajočimi porušnimi preiskavami (220 MPa). Deformacije, ki so pri tem nastale (-0,8 ‰ v produ in 0,5 ‰ v melju), močno odstopajo od mejnih deformacij železa, navedenih v literaturi (40 ‰–370 ‰) in pridobljenih v spremljajočih porušnih preiskavah (13,3 ‰–16,9 ‰) (Preglednica 6.1).

Preglednica 6.1: Podatki o natezni trdnosti kovanega železa.

ŽELEZO	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	ε_1 (‰)	ε_2 (‰)
NATEZNE PORUŠNE PREISKAVE	220	260	13,3	16,9
LITERATURA	150	448	40	370

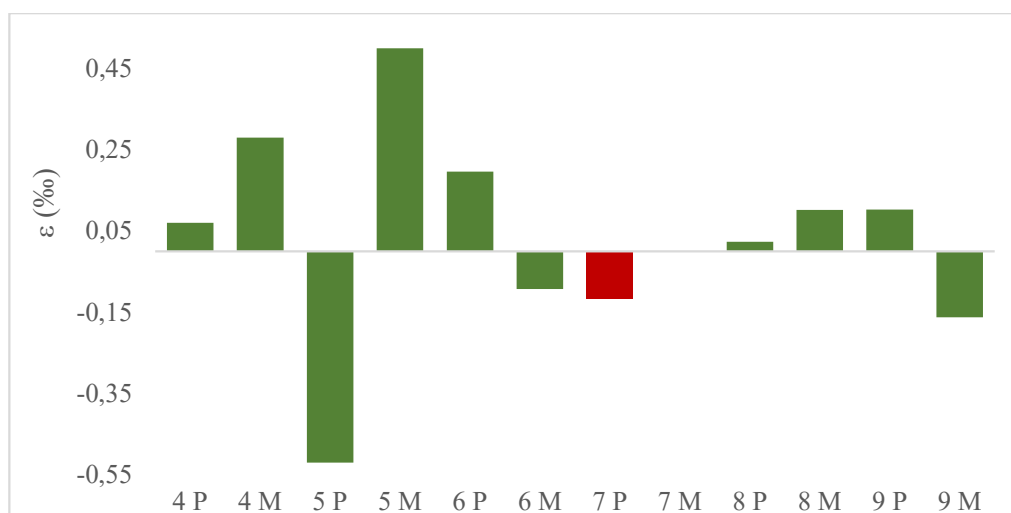


Slika 6.13: Največje napetosti (σ) železnih preizkušancev v produ (P) in melju (M) preizkusov 4–9 med obremenjevanjem (rdeča) in razbremenjevanjem (zelena).



Slika 6.14: Največje deformacije (ε) železnih preizkušancev v produ (P) in melju (M) preizkusov 4–9 med obremenjevanjem (rdeča) in razbremenjevanjem (zelena).

Kljub temu, da so bile ugotovljene deformacije linearne in se preizkušanci niso vidno poškodovali, so v železu ostale deformacije tudi po koncu razbremenjevanja (Preglednica M.8; Slika 6.15). Preostale deformacije so bile predvsem tlačne, le v manjši meri natezne. Največje tlačne deformacije so ostale pri železu v produ v preizkusu 5, največje natezne deformacije pa pri železu v melju v preizkusu 5. Najmanjše tlačne deformacije so ostale pri železu v melju v preizkusu 6 in najmanjše natezne deformacije pri železu v produ v preizkusu 8. Največ deformacij je po razbremenitvi ostalo v preizkušancih, ki so bili izpostavljeni monotonemu obremenjevanju z uporabo zaščitnega sloja. Primerjava med monotonimi in dinamičnimi preizkusi kaže, da so večje sile brez vibracij botrovale večjim ostankom deformacij v preizkušancih kot vibracije ob manjših silah. V povprečju je bil preostanek deformacij večji v preizkušancih, ki so bili izpostavljeni obremenjevanju z uporabo zaščitnega sloja, kot v preizkušancih, pri obremenjevanju katerih zaščitni sloj ni bil uporabljen.



Slika 6.15: Ostanek deformacij (ϵ) v železnih preizkušancih po koncu razbremenjevanja v produ (P) in melju (M) preizkusov 4–9.

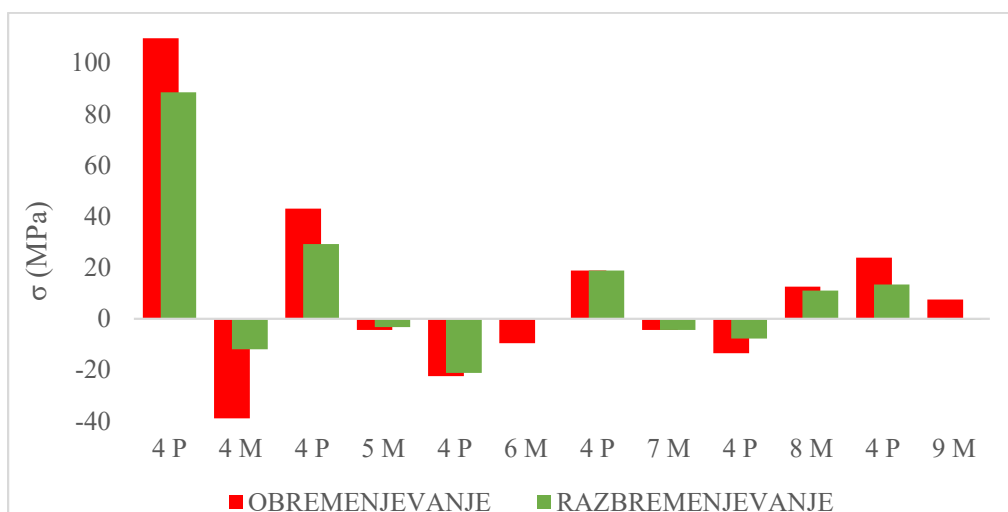
Pri bronu so bile napetosti in deformacije natezne in tlačne, kar pomeni, da so se preizkušanci med obremenjevanjem raztezali in krčili. Natezne deformacije ob nateznih napetostih in tlačne deformacije ob tlačnih napetostih kažejo, da se preizkušanci med obremenjevanjem niso upogibali.

Največje napetosti in deformacije (Sliki 6.16–6.17) so nastale pri bronu v produ v preizkusu 4, najmanjše pa v melju v preizkusih 5 in 7. Rezultati monotonih preizkusov 5 (z zaščitnim slojem) in 7 (brez zaščitnega sloja) kažejo večje vrednosti pri bronu v produ v preizkusu 7 in podobne vrednosti pri bronu v melju v obeh preizkusih. Rezultati dinamičnih preizkusov 6 (z zaščitnim slojem) in 8 (brez zaščitnega sloja) kažejo nižje vrednosti pri bronu v melju in višje pri bronu v produ v preizkusu 8. Primerjava med monotonima preizkusoma 5 in 7 ter dinamičnima preizkusoma 6 in 8 kaže nižje vrednosti pri bronu v produ dinamičnih preizkusov in nižje vrednosti pri bronu v melju monotonih preizkusov. Pri primerjavi med monotonima preizkusoma brez zaščitnega sloja 7 in 9 so bile ugotovljene višje napetosti in deformacije v preizkusu 9, pri katerem je imela zemljina pred obremenjevanjem več časa za konsolidacijo. Primerjava preizkusov 7 in 9 z monotonim preizkusom 5, pri katerem je bil uporabljen zaščitni sloj, kaže izrazito večje napetosti in deformacij pri preizkušancih v produ v preizkusu 5.

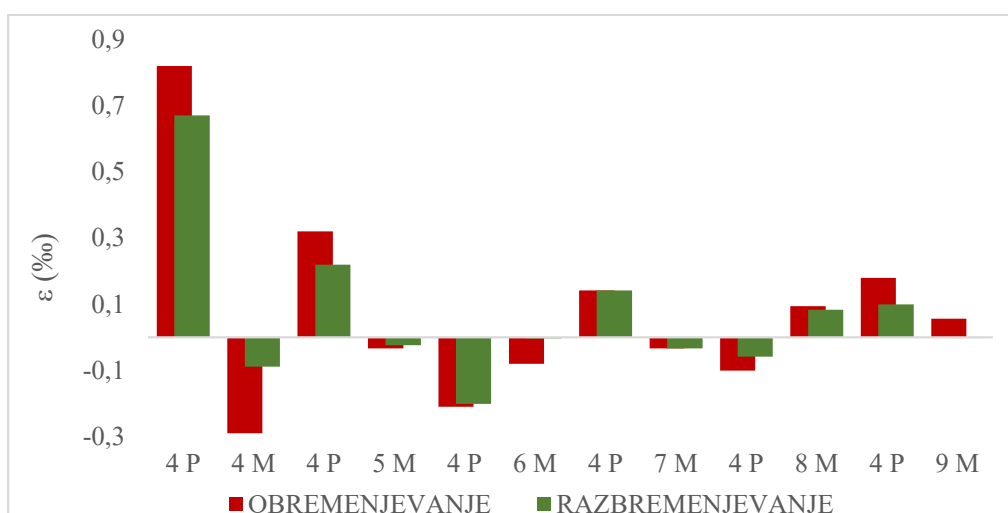
Na vseh preizkušancih so bile ugotovljene linearne deformacije brez prehoda v tečenje ali porušitve materiala. Noben preizkušanec se ni približal natezni trdnosti in mejnim deformacijam kositrnega bronu, ki so podane v literaturi (210 MPa–310 MPa; ~ 59 ‰), ali vrednostim, ki so bile pridobljene s spremljajočimi porušnimi preiskavami (160 MPa; 16,51 ‰–20,35 ‰) (Preglednica 6.2).

Preglednica 6.2: Podatki o natezni trdnosti bronu

BRON	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	ϵ_1 (‰)	ϵ_2 (‰)
NATEZNE PORUŠNE PREISKAVE	160	150	20,35	16,51
LITERATURA	210	310	~ 59	

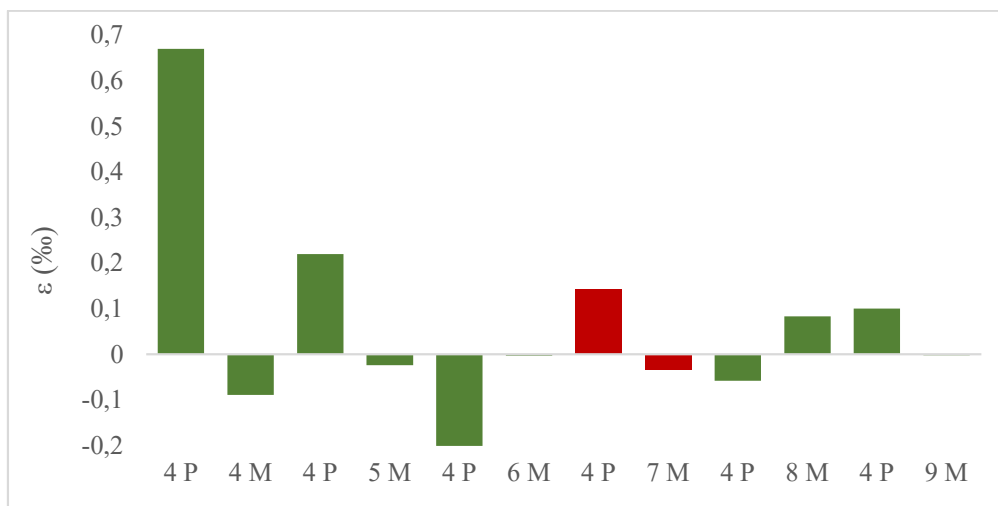


Slika 6.16: Največje napetosti (σ) bronastih preizkušancev v prod (P) in melju (M) med obremenjevanjem (rdeča) in razbremenjevanjem (zelena) v preizkusih 4–9.



Slika 6.17: Največje deformacije (ϵ) v bronastih preizkušancih v prod (P) in melju (M) med obremenjevanjem (rdeča) in razbremenjevanjem (zelena) v preizkusih 4–9.

Kljub temu, da so bile deformacije linearne in se preizkušanci niso vidno poškodovali, so po koncu razbremenjevanja v preizkušancih ostale deformacije ([Preglednica M.9](#); [Slika 6.18](#)). Preostale deformacije so bile natezne in tlačne, pri čemer opazimo nekoliko več slednjih. Največje tlačne deformacije so ostale pri bronu v prod v preizkusu 6, največje natezne pa pri bronu v prod v preizkusu 4. Najmanjše preostale tlačne deformacije so bile pri bronu v melju v preizkusu 9, najmanjše natezne pri bronu v melju pa v preizkusu 8. Pri vseh preizkušancih je bil ostanek deformacije v prod večji kot v melju. Uporaba zaščitnega sloja in vibracije so povečale napetosti in deformacije na bronu v prod, medtem ko je uporaba zaščitnega sloja v melju pripomogla k manjšemu preostanku deformacij po razbremenitvi. Manjše deformacij po razbremenitvi so ostale tudi v preizkušancih preizkusa 9, pri katerem je imela zemljina več časa za konsolidacijo.

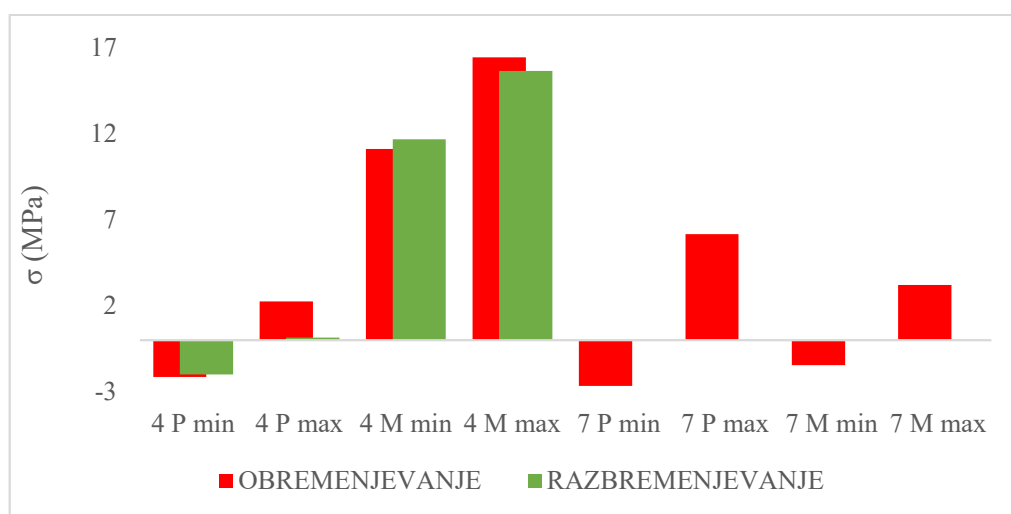


Slika 6.18: Ostanek deformacij v bronastih preizkušancih po koncu razbremenjevanja v produ (P) in melju (M) preizkusov 4–9.

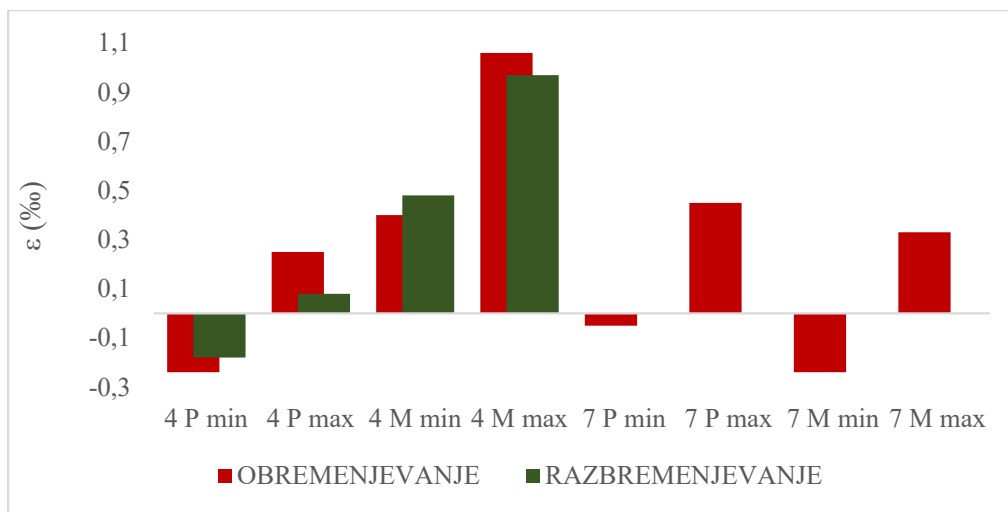
Različne morfološke značilnosti kosti ne omogočajo neposredne primerjave med stegnenico, lopatico in lobanjo, zato smo rezultate za posamezen skeletni element (stegnenica, lopatica, lobanja) obravnavali ločeno.

Stegnenica je bila uporabljena zgolj v preizkusih 4 in 7. Napetosti in deformacije so bile natezne in tlačne, kar pomeni, da so se stegnenice med obremenjevanjem raztezale in krčile. Natezne deformacije ob nateznih napetostih in tlačne deformacije ob tlačnih napetostih kažejo, da se stegnenice med obremenjevanjem niso upogibale.

Pri stegnenicah (Sliki 6.19–6.20) v produ so bile minimalne napetosti v obeh preizkusih, 4 in 7, podobne, medtem ko so bile maksimalne napetosti izrazito višje v preizkusu 7. V produ so bile minimalne deformacije višje pri stegnenicah v preizkusu 4, maksimalne deformacije pa pri stegnenicah v preizkusu 7. Pri stegnenicah v melju so bile minimalne in maksimalne napetosti in deformacije izrazito višje v preizkusu 4. Pri stegnenici v melju v preizkusu 4 so bile minimalne napetosti in deformacije natezne, medtem ko so bile pri stegnenici v melju v preizkusu 7 tlačne. V produ so bile minimalne napetosti pri vseh stegnenicah tlačne, medtem ko so minimalne deformacije pri stegnenicah preizkusa 7 prešle iz tlačnih v natezne. Maksimalne napetosti in deformacije so bile v vseh primerih natezne.



Slika 6.19: Največje minimalne (min) in maksimalne (max) napetosti (σ) stegnenic v produ (P) in melju (M) preizkusov 4–9 med obremenjevanjem (rdeča) in razbremenjevanjem (zelena).



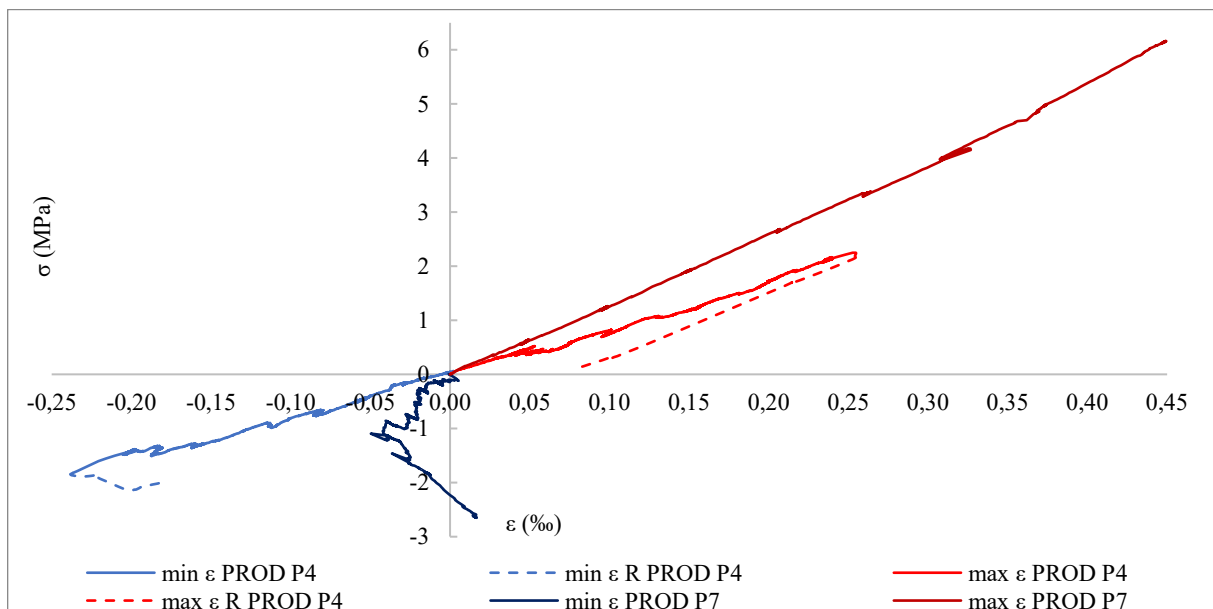
Slika 6.20: Največje minimalne (min) in maksimalne (max) deformacije (ε) stegenic vPRODU (P) in melju (M) preizkusov 4–9 med obremenjevanjem (rdeča) in razbremenjevanjem (zelena).

Deformacije vseh stegenic so bile linearne, brez prehoda v nelinearne deformacije ali porušitve materiala (Sliki 6.21–6.22). Največje napetosti in deformacije se pri nobeni stegenici niso približale natezni trdnosti (~ 88 MPa), tlačni trdnosti (~ 100 MPa), mejnim nateznim deformacijam ($\sim 6,8$ ‰) ali mejnim tlačnim deformacijam (~ 19 ‰) kosti, ki so navedene v literaturi (Preglednica 6.3). Natezne napetosti pri stegenici v melju v preizkusu 4 so bile sicer večje od upogibne trdnosti, ki smo jo pridobili s spremljajočimi porušnimi preiskavami (7,81 MPa–13,5 MPa), a so deformacije ostale pod ugotovljenimi mejnimi deformacijami (2,54 ‰ in 6,13 ‰).

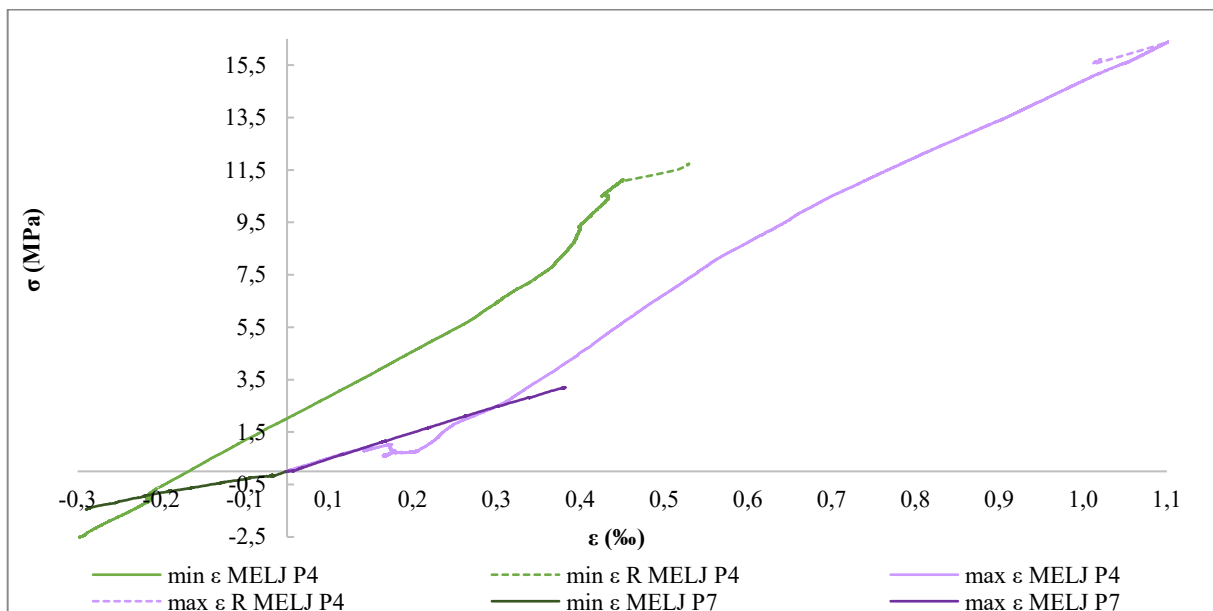
Preglednica 6.3: Podatki o natezni in tlačni trdnosti prašičje kosti.

KOST	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	ε_1 (‰)	ε_2 (‰)
LITERATURA	88	100	6,8	19
UPOGIBNE PORUŠNE PREISKAVE	7,8	13,5	2,5	6,1

Četudi so bile deformacije izključno linearne in se preizkušanci niso vidno poškodovali, po razbremenitvi ni prišlo do povrnitve deformacij v prvotno stanje. Ker nam pri preizkusu 7 ni uspelo pridobiti podatkov o napetostih in deformacijah preizkušancev med razbremenjevanjem, neposredna primerjava s preizkusom 4 ni mogoča. V preizkusu 4 je večji ostanek deformacij viden pri preizkušancih v melju, kjer so se minimalne natezne deformacije med razbremenjevanjem celo povečale.



Slika 6.21: Primerjava grafov napetosti in deformacij (σ - ϵ) stegnenic v produ v preizkusih (P) 4 in 7 med obremenjevanjem (polna črta) in razbremenjevanjem (R; prekinjena črta).

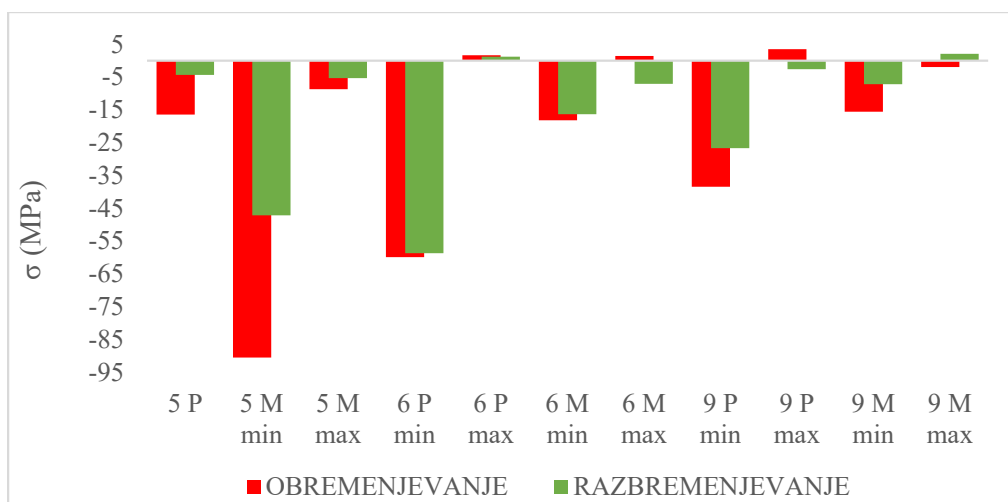


Slika 6.22: Primerjava grafov napetosti in deformacij (σ - ϵ) stegnenic v melju v preizkusih (P) 4 in 7 med obremenjevanjem (polna črta) in razbremenjevanjem (R; prekinjena črta).

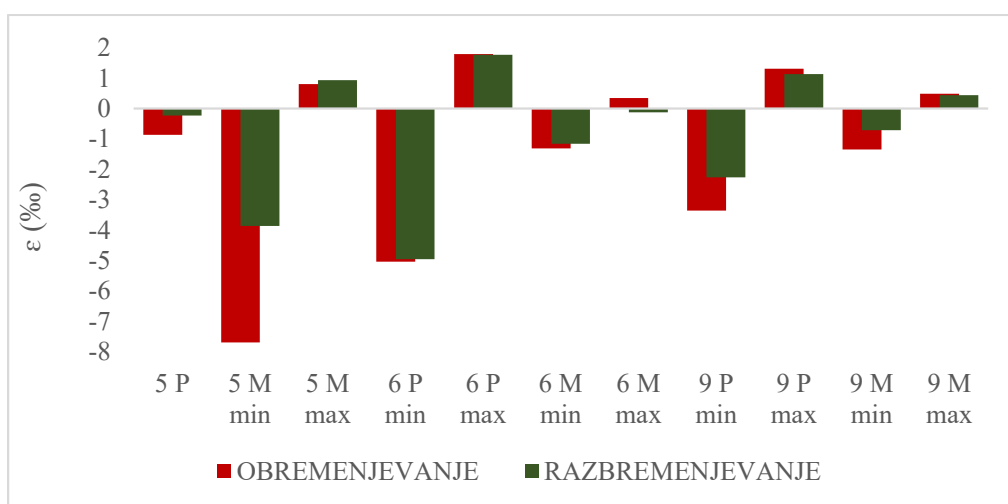
Lobanje so bile kot preizkušanci uporabljene v preizkusih 5, 6 in 9. Pri vseh lobanjah so prevladovala tlačna napetosti in natezne deformacije. V začetku obremenjevanja so se lobanjske kosti krčile, z naraščanjem tlačnih napetosti pa so se tanke lobanjske kosti pričele upogibati v votlo notranjost in s tem raztezati.

Največje minimalne in maksimalne napetosti ter minimalne deformacije so nastale pri lobanjah v melju v preizkusu 5, največje maksimalne deformacije pa pri lobanji v produ v preizkusu 6 (Sliki 6.23–6.24). Ob primerjavi med preizkusom 5 (monotono obremenjevanje) in preizkusom 6 (dinamično obremenjevanje) so vidni različni odzivi lobanj v produ in melju. V preizkusu 5 so bile minimalne napetosti in deformacije večje pri lobanji v melju, medtem ko so bile v preizkusu 6 večje pri lobanji v produ. Vrednosti maksimalnih napetosti in deformacij so bile pri vseh lobanjah podobne, vendar so tlačne napetosti povzročile natezne deformacije, kar je posebej izrazito pri preizkušancih v melju. V preizkusu 9 so bile pri lobanji v produ minimalne napetosti in deformacije manjše kot pri lobanjah v preizkusih 5 in 6, medtem ko so bile vrednosti maksimalnih napetosti in deformacij med vrednostmi iz preizkusov 5 in 6. Minimalne, maksimalne napetosti in

deformacije pri lobanjah v melju v preizkusu 9 pa so bile veliko manjše kot pri lobanjah v melju v preizkusu 5 in podobne kot pri lobanjah v melju v preizkusu 6. Razlika med rezultati v preizkusih 6 in 9 je opazna v vrsti maksimalnih napetosti med obremenjevanjem, te so bile v preizkusu 6 natezne, v preizkusu 9 pa tlačne.



Slika 6.23: Največje minimalne (min) in maksimalne (max) napetosti (σ) lobanj v produ (P) in melju (M) preizkusov 4–9 med obremenjevanjem (rdeča) in razbremenjevanjem (zelena).



Slika 6.24: Največje minimalne (min) in maksimalne (max) deformacije (ϵ) lobanj v produ (P) in melju (M) preizkusov 4–9 med obremenjevanjem (rdeča) in razbremenjevanjem (zelena).

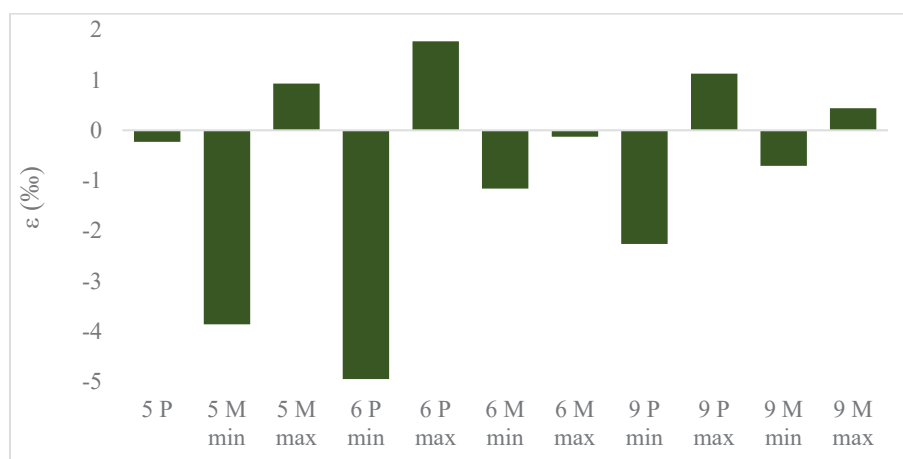
Pri lobanjah v produ so bile v vseh preizkusih minimalne in maksimalne deformacije linearne elastične, razen pri lobanji v produ v preizkusu 9, kjer so bile maksimalne deformacije nelinearne (Slika 6.26). Pri lobanjah v melju so bile minimalne deformacije linearne in maksimalne nelinearne (Slika 6.27). Deformacije so pri lobanjah v produ prešle iz linearnih v nelinearne med obremenjevanjem površine s 120 kN/m^2 , pri 0,27 % in napetostih 3,11 MPa. Pri lobanjah v melju so deformacije prešle iz linearnih v nelinearne med obremenjevanjem površine z 80 kN/m^2 – 155 kN/m^2 , pri 0,10 %–0,82 % in napetostih 0,93 MPa–8,65 MPa. Nelinearne deformacije so bile v vseh primerih maksimalne in natezne, neodvisne od največjih napetosti ter največkrat dosežene pri preizkušancih v melju (Preglednica 6.4).

Preglednica 6.4: Vrednosti napetosti in deformacij pri lobjanjah ob doseženi meji plastičnosti.

PREIZKUS/PLAST	σ (MPa)	ε (‰)	σ_{POV} (kN/m ²)
P9 PROD maksimalne na meji plastičnosti	3,11	0,27	120
P5 MELJ maksimalne na meji plastičnosti	-8,65	0,82	155
P6 MELJ maksimalne na meji plastičnosti	0,93	0,23	80
P9 MELJ maksimalne na meji plastičnosti	-1,8	0,10	80

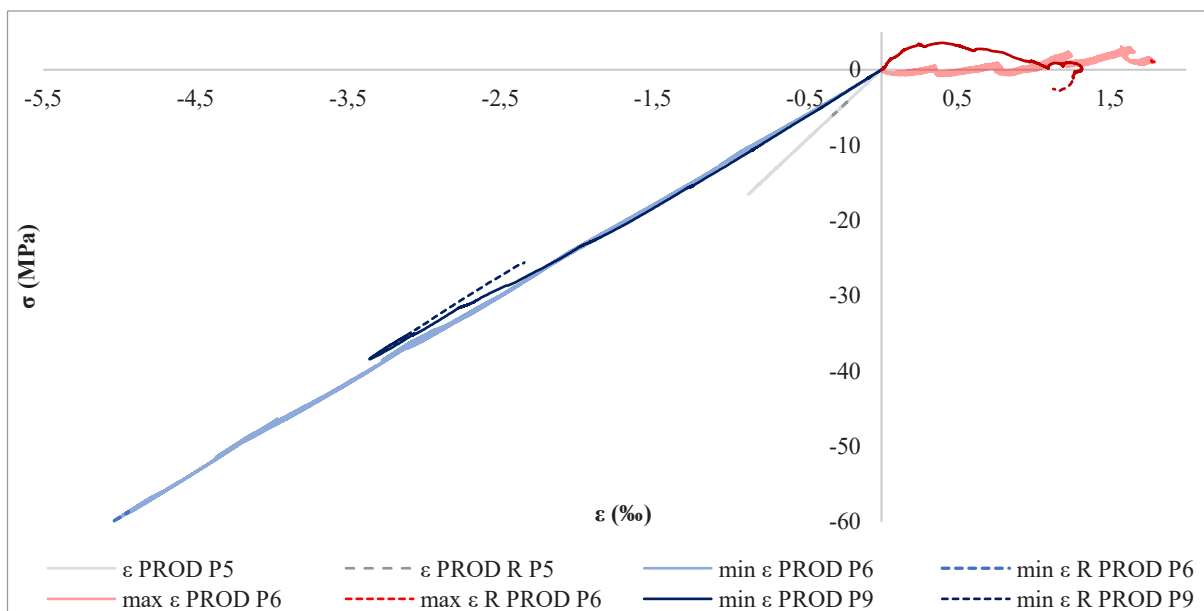
Največje napetosti in deformacije pri nobeni lobjanji niso dosegle vrednosti, ki so v literaturi navedene za natezno trdnost (~88 MPa), tlačno trdnost (~100 MPa), mejne natezne deformacije (~6,8 ‰) in mejne tlačne deformacije (~19 ‰) prašičje kosti, niti niso dosegle natezne trdnosti in nateznih deformacij kosti, ki smo jih pridobili s spremljajočimi porušnimi preiskavami (7,81 MPa–13,5 MPa; 2,54 ‰–6,13 ‰). Tlačne napetosti pri lobjanji v melju v preizkusu 5 (-90,55 MPa) so se sicer približale tlačni trdnosti prašičje kosti (~100 MPa), vendar so tlačne deformacije (-7,69 ‰) ostale močno pod mejnimi tlačnimi deformacijami (~19 ‰). Pri preizkušancih v produ v preizkusih 6 in 9 so se natezne deformacije (1,77 ‰; 1,31 ‰) približale mejnim nateznim deformacijam prašičje kosti, ki smo jih pridobili s spremljajočimi porušnimi preiskavami (2,54 ‰).

Četudi se preizkušanci niso vidno poškodovali, po razbremenitvi ni prišlo do povrnitve deformacij v prvotno stanje. V lobjanjah so ostale natezne in tlačne deformacije, pri čemer so slednje prevladovala. Največji ostanek tlačnih deformacij je bil pri lobjanji v produ v preizkusu 6, največji ostanek nateznih deformacij pa pri lobjanji v melju v preizkusu 6. Najmanjši ostanek tlačnih deformacij je bil pri lobjanji v produ v preizkusu 5, najmanjši ostanek nateznih pa pri lobjanji v melju v preizkusu 9 (Preglednica M.10; Slike 6.25–6.27).

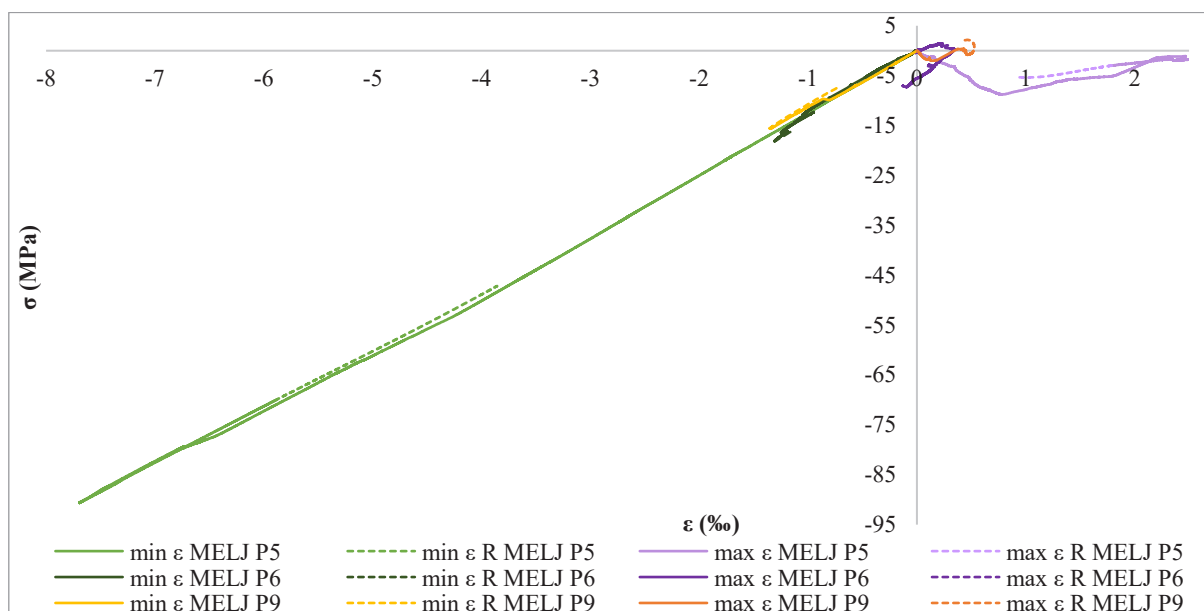


Slika 6.25: Ostanek minimalnih (min) in maksimalnih (max) deformacij (ε) v lobjanjah v produ (P) in melju (M) po koncu razbremenjevanja v preizkusih 5,³⁹ 6 in 9.

³⁹ Pri lobjanji v produ v preizkusu 5 so bile zaradi nepravilnega delovanja merilnega lističa deformacije izmerjene le v eni smeri, zato glavnih minimalnih in maksimalnih deformacij ni bilo mogoče izračunati.



Slika 6.26: Primerjava grafov napetosti in deformacij (σ - ϵ) lobanj v produ v preizkusih (P) 5, 6 in 9 med obremenjevanjem (polna črta) in razbremenjevanjem (R; prekinjena črta).



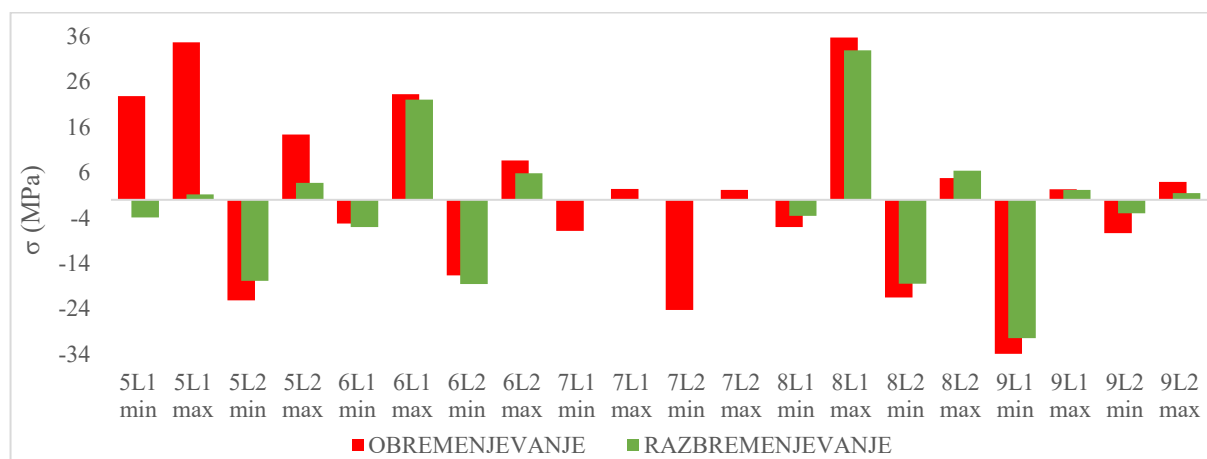
Slika 6.27: Primerjava grafov napetosti in deformacij (σ - ϵ) lobanj v melju v preizkusih (P) 5, 6 in 9 med obremenjevanjem (polna črta) in razbremenjevanjem (R; prekinjena črta).

Lopatica je bila kot preizkušaneč uporabljen v preizkusih 6–9. Napetosti in deformacije so bile natezne in tlačne, kar pomeni, da so se lopatice med obremenjevanjem krčile in raztezale. Natezne deformacije ob nateznih napetostih in tlačne deformacije ob tlačnih napetostih kažejo, da se lopatice med obremenjevanjem niso upogibale.

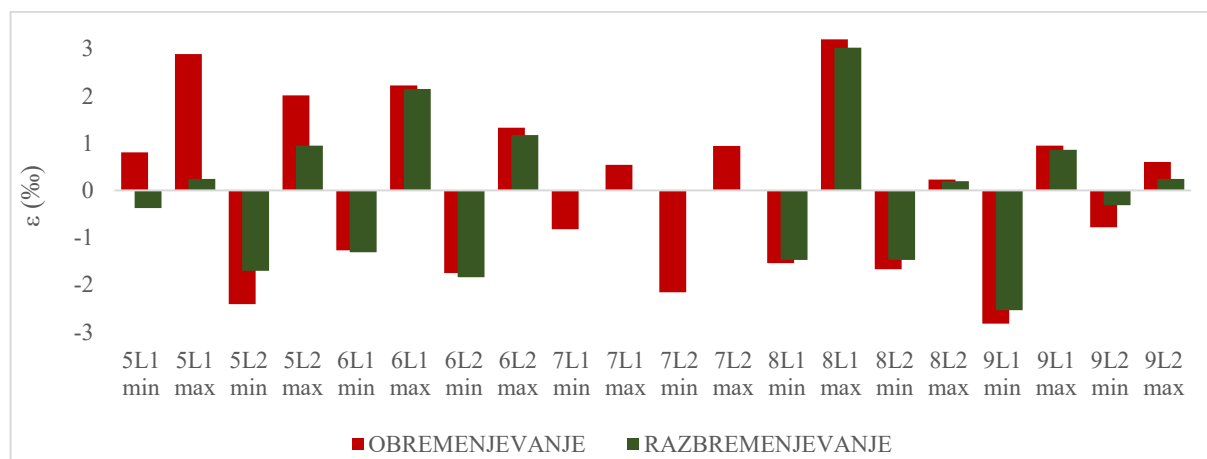
Največje minimalne napetosti in deformacije so nastale pri lopatici v produ v preizkusu 9, največje maksimalne pa pri lopatici v produ v preizkusu 8. Pri vseh lopaticah so bile minimalne napetosti in deformacije tlačne in maksimalne natezne. Izjema je lopatica v produ preizkusa 5, kjer so bile minimalne napetosti in deformacije natezne (Sliki 6.28–6.29).

Primerjava rezultatov preizkusov 5 (monotono obremenjevanje z zaščitnim slojem) in 7 (monotono obremenjevanje brez zaščitnega sloja) kaže več razlik med odzivi preizkušancev na obremenjevanje. Pri lopaticah v produ so bile minimalne in maksimalne napetosti v preizkusu 5 večje kot v preizkusu 7, poleg tega so bile minimalne napetosti pri lopaticah v preizkusu 5 natezne, medtem ko so bile v produ preizkusa 7 tlačne. Pri

lopaticah v melju so bile minimalne napetosti v obeh preizkusih podobne, medtem ko so bile maksimalne izrazito večje v preizkusu 5. Minimalne deformacije pri lopaticah v produ in melju so bile v obeh preizkusih podobne, medtem ko so bile maksimalne deformacije izrazito višje pri lopaticah v preizkusu 5. Primerjava rezultatov preizkusov 5 in 7 s preizkusom 9 (monotono obremenjevanje brez zaščitnega sloja in z več časa za konsolidacijo zemljin) kaže najvišje minimalne in najnižje maksimalne napetosti in deformacije pri lopaticah v produ v preizkusu 9 ter najnižje minimalne napetosti in deformacije in najnižje maksimalne deformacije pri lopaticah v melju v preizkusu 9. Primerjava med dinamičnima preizkusoma 6 (z zaščitnim slojem) in 8 (brez zaščitnega sloja) kaže podobne minimalne napetosti in deformacije, medtem ko so bile maksimalne napetosti in deformacije v produ višje in v melju nižje v preizkusu 8. Primerjava med monotonimi in dinamičnimi preizkusi kaže rahlo nižje napetosti in deformacije pri preizkušancih dinamičnega obremenjevanja. Izjema so maksimalne napetosti in deformacije v produ v dinamičnem preizkusu 8, ki so bile najvišje.



Slika 6.28: Največje minimalne (min) in maksimalne (max) napetosti (σ) lopatic v produ (P) in melju (M) preizkusov 4–9 med obremenjevanjem (rdeča) in razbremenjevanjem (zeleni).



Slika 6.29: Največje minimalne (min) in maksimalne (max) deformacije (ϵ) lopatic v produ (P) in melju (M) preizkusov 4–9 med obremenjevanjem (rdeča) in razbremenjevanjem (zeleni).

Pri preizkušancih so bile minimalne in maksimalne deformacije linearne elastične. Izjema so lopatice v produ v preizkusih 8 in 9 ter v melju v preizkusih 7 in 9, kjer so deformacije prešle iz linearnih v nelinearne (Slike 6.30–6.34). Pri lopatici v produ v preizkusu 8 so minimalne deformacije prešle v nelinearne med obremenjevanjem površine s 155 kN/m^2 , pri $-1,31 \text{ ‰}$ in napetostih -6 MPa . Pri lopatici v melju v preizkusu 7 so maksimalne deformacije prešle v nelinearne med obremenjevanjem površine s 190 kN/m^2 , pri $0,25 \text{ ‰}$ in napetostih $1,1 \text{ MPa}$. Pri lopatici v produ v preizkusu 9 so maksimalne deformacije prešle v nelinearne med obremenjevanjem površine s 190 kN/m^2 , pri $0,21 \text{ ‰}$ in napetostih $1,33 \text{ MPa}$. Pri lopatici v melju v preizkusu 9 so maksimalne deformacije prešle v nelinearne med obremenjevanjem površine s 140 kN/m^2 , pri

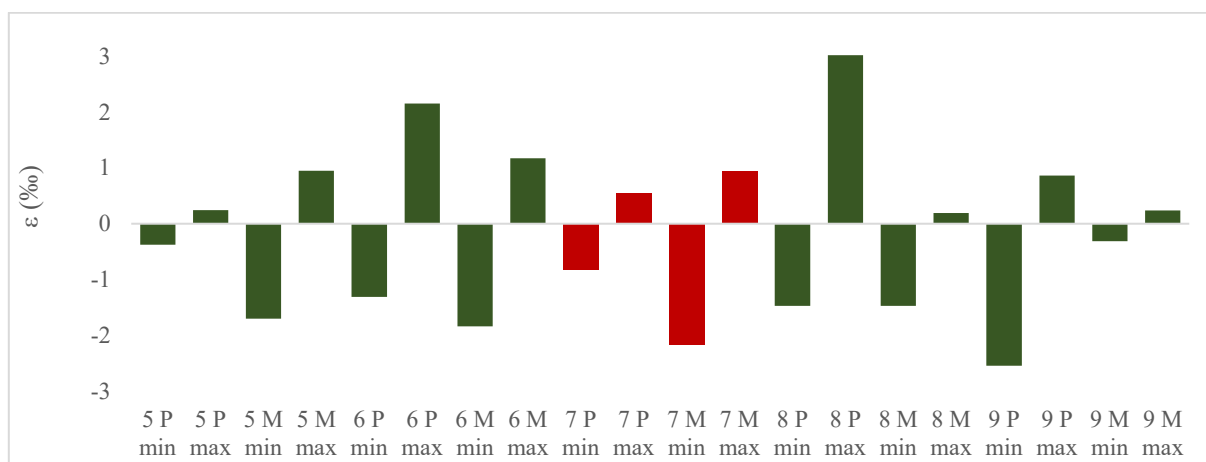
0,29 ‰ in napetostih 2,66 MPa (**Preglednica 6.5**). Iz podatkov je razvidno, da je pri minimalnih deformacijah do prehoda v nelinearne prišlo pri nižjih vrednostih kot pri maksimalnih deformacijah. Poleg tega so bile pri lopaticah v produ za prehod potrebne večje obremenitve površine kot pri lopaticah v melju, najmanjše obremenitve površine za prehod deformacij v nelinearne pa so bile potrebne pri lopaticah v melju z najdaljšo predhodno konsolidacijo.

Preglednica 6.5: Vrednosti napetosti in deformacij pri lopaticah ob doseženi meji plastičnosti.

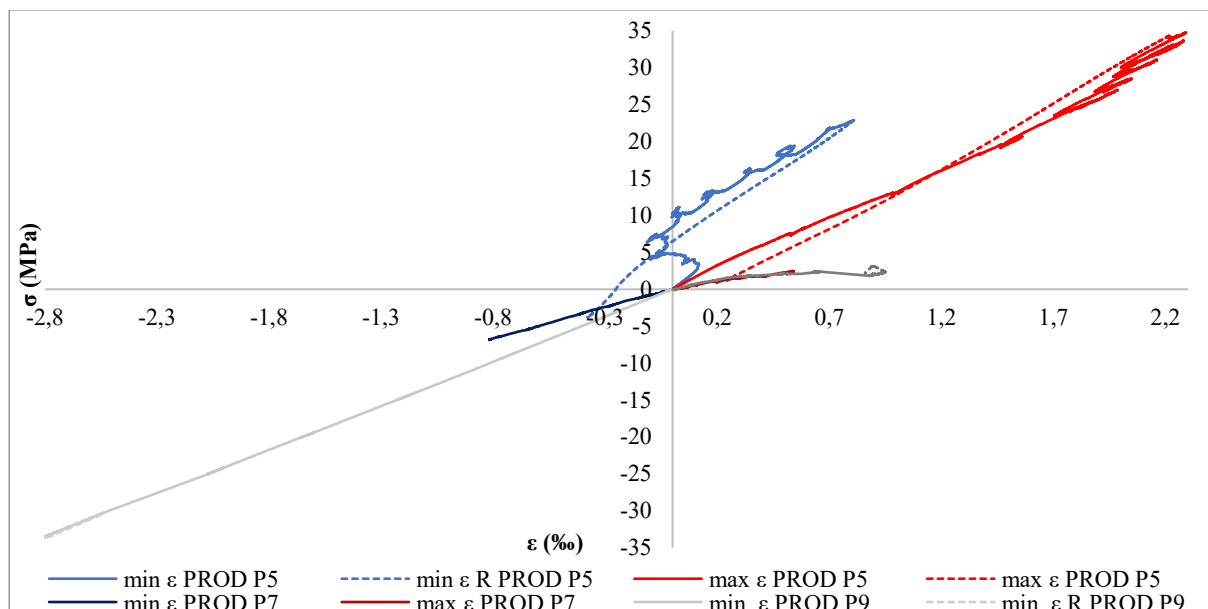
PREIZKUS/PLAST	σ (MPa)	ε (‰)	σ_{POV} (kN/m ²)
P8 PROD minimalne na meji plastičnosti	-6,0	-1,31	155
P7 MELJ maksimalne na meji plastičnosti	1,1	0,25	190
P9 PROD maksimalne na meji plastičnosti	1,33	0,21	190
P9 MELJ maksimalne na meji plastičnosti	2,66	0,29	140

Največje napetosti in deformacije pri nobeni lopatici niso dosegle natezne trdnosti (~88 MPa), tlačne trdnosti (~100 MPa), mejnih nateznih deformacij (~6,8 ‰) in mejnih tlačnih deformacij (~19 ‰), ki so za kost navedene v literaturi. Natezne napetosti so sicer dosegle in presegle mejne vrednosti, ki smo jih s spremljajočimi porušnimi preiskavami ugotovili za prašičjo kost (7,81 MPa–13,5 MPa). Natezne deformacije v lopaticah so se približale ter pri lopaticah v produ v preizkusih 5 in 8 (2,89 ‰; 3,2 ‰) tudi presegle mejne vrednosti, ki smo jih pridobili s spremljajočimi porušnimi preiskavami (2,54 ‰–6,13 ‰).

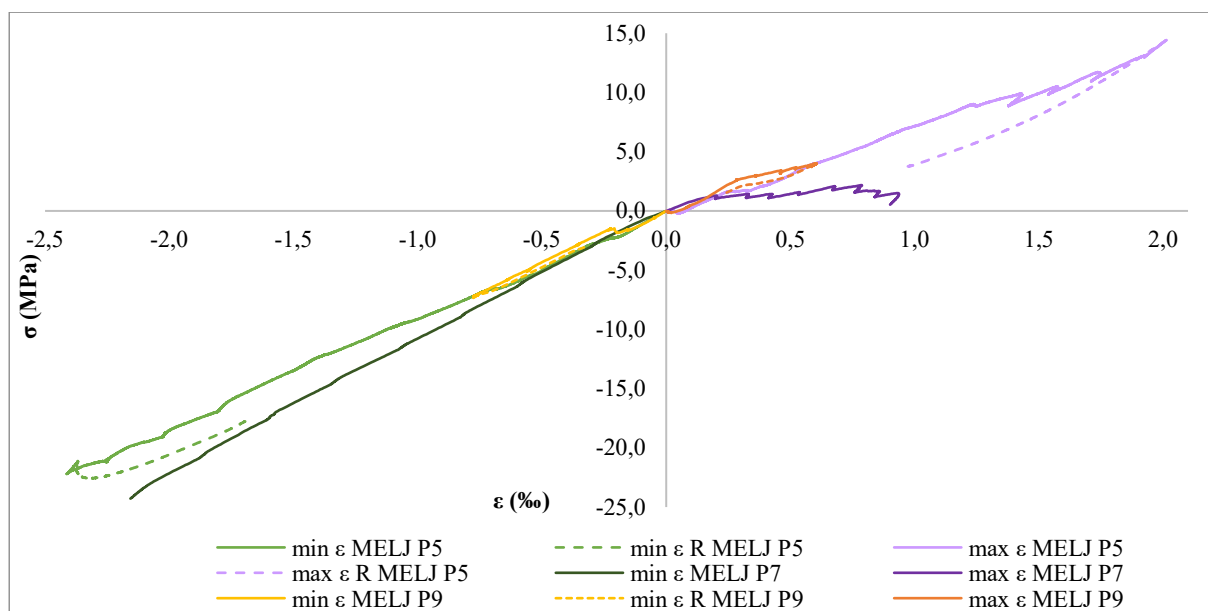
Četudi se preizkušanci niso vidno poškodovali, po razbremenitvi ni prišlo do povrnitve deformacij v prvotno stanje. V lopaticah so ostale tlačne minimalne in natezne maksimalne deformacije. Največ tlačnih deformacij je ostalo v lopatici v produ v preizkusu 9, največ nateznih pa v lopatici v produ v preizkusu 8. Ostanke deformacij so bili največji pri lopaticah v produ v preizkusih z dinamičnim obremenjevanjem in pri lopaticah v melju v preizkusih z dinamičnim obremenjevanjem ter uporabo zaščitnega sloja. Zaščitni sloj je pripomogel k manjšemu ostanku deformacij pri lopaticah v melju ob monotonem obremenjevanju in pri lopaticah v produ ob dinamičnem obremenjevanju. Podaljšan čas konsolidacije je ostanke deformacij zmanjšal le pri preizkušancih v produ, medtem ko so bili pri preizkušancih v melju ostanke deformacij med najvišjimi (**Preglednica M.11**; **Slike 6.30–6.34**).



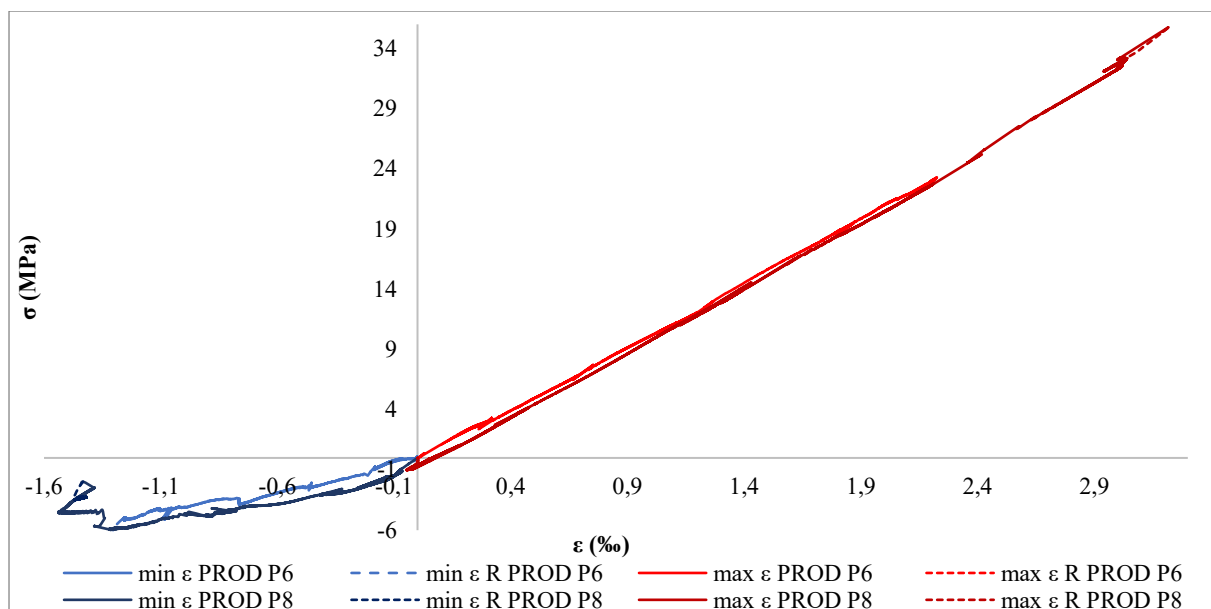
Slika 6.30: Ostanek minimalnih (min) in maksimalnih (max) deformacij v lopaticah v produ (P) in melju (M) preizkusov 5–9 po koncu razbremenjevanja.



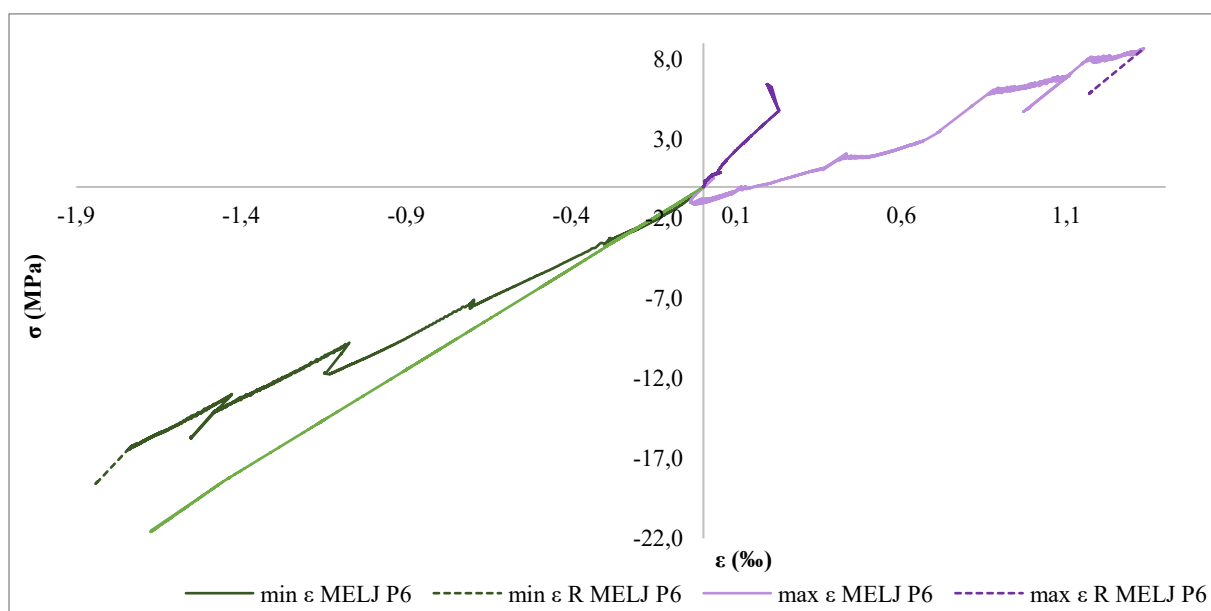
Slika 6.31: Primerjava grafov napetosti in deformacij (σ - ϵ) lopatic v produ v preizkusih (P) 5, 7 in 9 med obremenjevanjem (polna črta) in razbremenjevanjem (R; prekinjena črta).



Slika 6.32: Primerjava grafov napetosti in deformacij (σ - ϵ) lopatic v melju v preizkusih (P) 5, 7 in 9 med obremenjevanjem (polna črta) in razbremenjevanjem (R; prekinjena črta).



Slika 6.33: Primerjava grafov napetosti in deformacij (σ - ϵ) lopatic v produ v preizkusih (P) 6 in 8 med obremenjevanjem (polna črta) in razbremenjevanjem (R; prekinjena črta).



Slika 6.34: Primerjava grafov napetosti in deformacij (σ - ϵ) lopatic v melju v preizkusih (P) 6 in 8 med obremenjevanjem (polna črta) in razbremenjevanjem (R; prekinjena črta).

Pri keramičnih preizkušancih so med obremenjevanjem nastale tlačne in natezne napetosti in deformacije, kar pomeni, da so se preizkušanci med obremenjevanjem krčili in raztezali. Natezne deformacije ob nateznih napetostih in tlačne deformacije ob tlačnih napetostih kažejo, da se preizkušanci med obremenjevanjem niso upogibali.

Največje minimalne in maksimalne napetosti in deformacije so nastale pri keramični skodelici v melju v preizkusu 5. Primerjava učinka monotonega obremenjevanja v preizkusih 5 (z zaščitnim slojem) in 7 (brez zaščitnega sloja) kaže največje napetosti in deformacije pri skodelicah v produ v preizkusu 7 in v melju v preizkusu 5. Primerjava rezultatov preizkusov 5 in 7 z rezultati preizkusa 9 (monotono obremenjevanje brez zaščitnega sloja in z več časa za konsolidacijo zemljin) kaže najnižje vrednosti napetosti in deformacij pri keramiki v melju v preizkusu 9. Rezultati dinamičnega preizkusa 6 (z zaščitnim slojem) so podobni rezultatom dinamičnega preizkusa 8 (brez zaščitnega sloja), le pri keramiki v melju v preizkusu 8 so bile napetosti in deformacije večje kot v preizkusu 6 ter maksimalne napetosti in deformacije tlačne, medtem ko so bile v

preizkusu 6 natezne. Primerjava med monotonim in dinamičnim obremenjevanjem keramičnih preizkušancev kaže nižje napetosti in deformacije pri preizkušancih iz dinamičnih preizkusov (Sliki 6.35–6.36).



Slika 6.35: Največje minimalne (min) in maksimalne (max) napetosti (σ) keramike v produ (P) in melju (M) preizkusov 4–9 med obremenjevanjem (rdeča) in razbremenjevanjem (zeleni).



Slika 6.36: Največje minimalne (min) in maksimalne (max) deformacije (ϵ) lopatic v produ (P) in melju (M) preizkusov 4–9 med obremenjevanjem (rdeča) in razbremenjevanjem (zeleni).

Na vseh keramičnih preizkušancih so bile minimalne in maksimalne deformacije linearne elastične (Slike 6.37–6.41). Natezna in tlačna trdnost keramike sta močno odvisni od njenih lastnosti, a v splošnem velja, da deformacije pred porušitvijo redko presežejo 10 ‰ (Pelleg 2014, 53, 73). S spremljajočimi porušnimi preiskavami smo za keramične preizkušance ugotovili natezno trdnost 2,9 MPa–4,2 MPa in mejne natezne deformacije 0,17 ‰–0,46 ‰ (Preglednica 6.6). Med obremenjevanjem so natezne napetosti omenjeno natezno trdnost dosegle ali celo presegle. Natezne deformacije so presegle mejne vrednosti pri preizkušancu v melju v preizkusu 5 (0,84 ‰) in v produ v preizkusu 7 (0,33 ‰), medtem ko so se jim pri preizkušancu v produ v preizkusu 4 (0,084 ‰) približale. Tlačne deformacije se meji tlačnih deformacij 10 ‰ v nobenem primeru niso približale.

Preglednica 6.6: Podatki o natezni trdnosti keramičnih preizkušancev.

KERAMIKA	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	ϵ_1 (‰)	ϵ_2 (‰)
PORUŠNE PREISKAVE	2,9	4,2	0,17	0,46

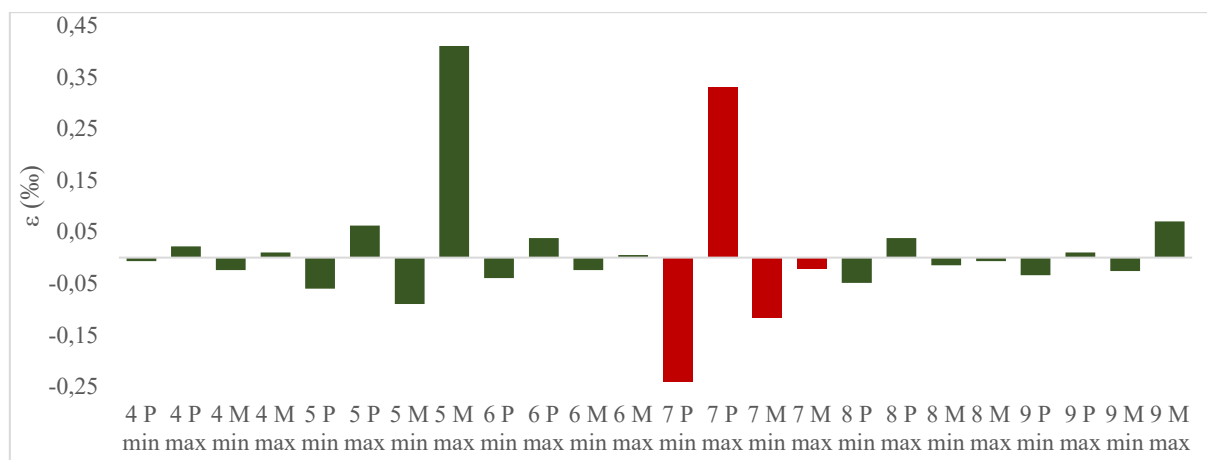
Preizkušanca v produ v preizkusu 4 in v melju v preizkusu 5 sta se prelomila. Pri lončku v produ v preizkusu 4 do preloma ni prišlo na mestu merilnega lističa in tako ni povsem jasno, kdaj točno je nastal. Med peto stopnjo obremenjevanja (155 kN/m²) so se minimalne deformacije zmanjšale in maksimalne povečale.

Sprememba verjetno kaže na nastanek poškodbe, do katere je prišlo pri minimalnih tlačnih napetostih -5,12 MPa in tlačnih deformacijah -0,01 ‰ ter maksimalnih nateznih napetostih 4,18 MPa in nateznih deformacijah 0,06 ‰. Prelom keramične skodelice v melju v preizkusu 5 je nastal preko merilnega lističa. Med peto in šesto stopnjo obremenjevanja (155 kN/m²–190 kN/m²) so se deformacije izrazito povečale, do preloma pa je prišlo pri minimalnih tlačnih napetostih -8,78 MPa, minimalnih tlačnih deformacijah -0,13 ‰, maksimalnih nateznih napetostih 9,47 MPa in maksimalnih nateznih deformacijah 0,26 ‰ (**Preglednica 6.7**). Natezne napetosti ob prelomu lončka v preizkusu 4 (4,18 MPa) so bile podobne natezni trdnosti keramičnega preizkušanca iz spremljajočih porušnih preiskav (2,9–4,2 MPa), medtem ko so bile natezne deformacije (0,06 ‰) izrazito nižje od mejnih nateznih deformacij (0,17–0,46 ‰). Povsem drugačni so bili rezultati iz preizkusa 5, kjer so bile natezne napetosti ob prelomu skodelice (9,47 MPa) dvakrat večje od natezne trdnosti iz porušnih preiskav, medtem ko so bile natezne deformacije (0,26 ‰) podobne mejnim nateznim deformacijam. Razlike v rezultatih preizkusov 4 in 5 gre pripisati mestu nastanka razpoka. Pri preizkušancu v preizkusu 5 je razpoka nastala neposredno preko merilnega lističa, pri preizkušancu v preizkusu 4 pa 2–3 cm nad merilnim lističem.

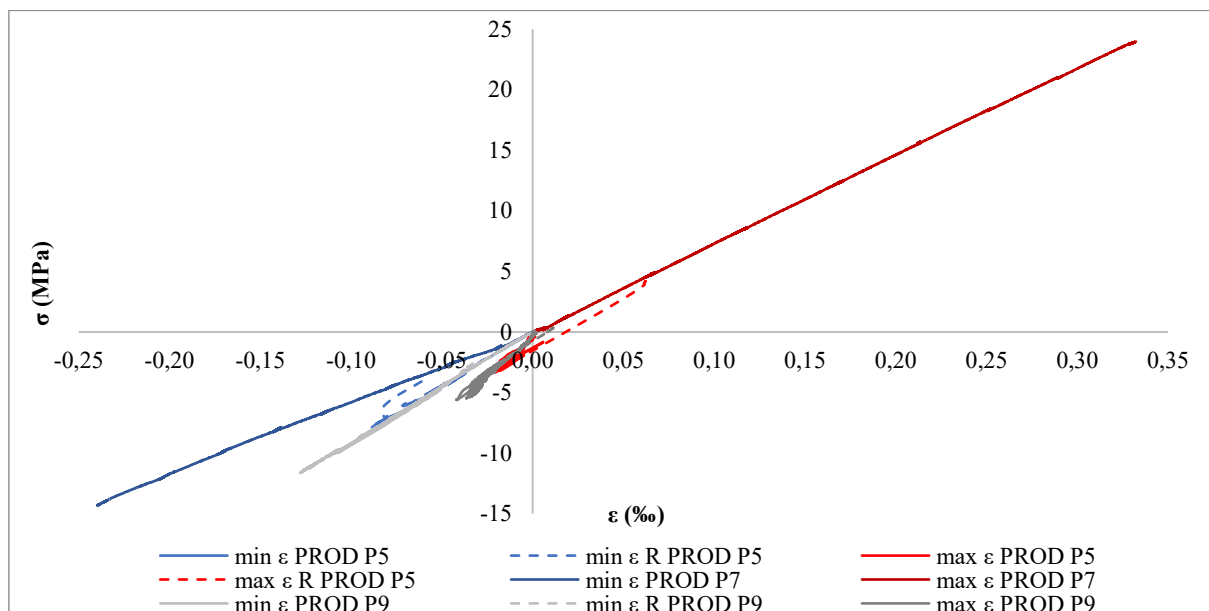
Preglednica 6.7: Vrednosti napetosti in deformacij keramičnih preizkušancev ob nastanku poškodb.

PREIZKUS/PLAST	σ (MPa)	ε (‰)	σ_{POV} (kN/m ²)
P4 PROD minimalne ob preskoku	-5,12	-0,07	155
P4 PROD maksimalne ob preskoku	4,18	0,06	155
P5 MELJ minimalne ob prelomu	-8,78	-0,13	155–190
P5 MELJ maksimalne ob prelomu	9,47	0,26	155–190

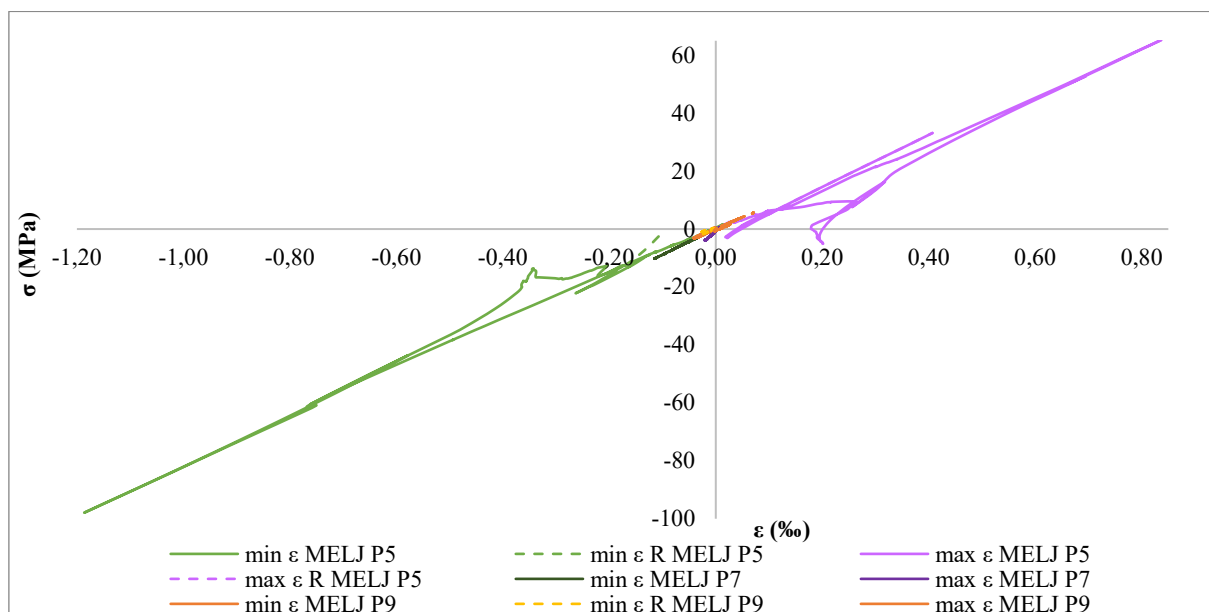
Preostali keramični preizkušanci se niso izraziteje poškodovali, vendar po razbremenitvi ni prišlo do povrnitve deformacij v prvotno stanje. V preizkušancih so ostale natezne in tlačne deformacije, največ pri skodelici v melju v preizkusu 5 in najmanj pri lončku v produ v preizkusu 4, skodelici v melju v preizkusu 8 in skodelici v melju v preizkusu 6. Pri preizkušancih monotoni preizkusov iz obeh zemljin so bili ostanki deformacij večji kot pri preizkušancih iz dinamičnih preizkusov, kar kaže, da ima velikost sile večji vpliv na deformiranje keramike kot vibracije. Večji ostanek deformacij je bil viden tudi pri preizkušancih v produ iz preizkusa, pri katerem nismo uporabili zaščitnega sloja, medtem ko so bili ostanki deformacij pri preizkušancih v preizkusu z dlje trajajočo konsolidacijo zemljin manjši v obeh zemljinah, produ in melju (**Preglednica M.12; Slike 6.37–6.41**).



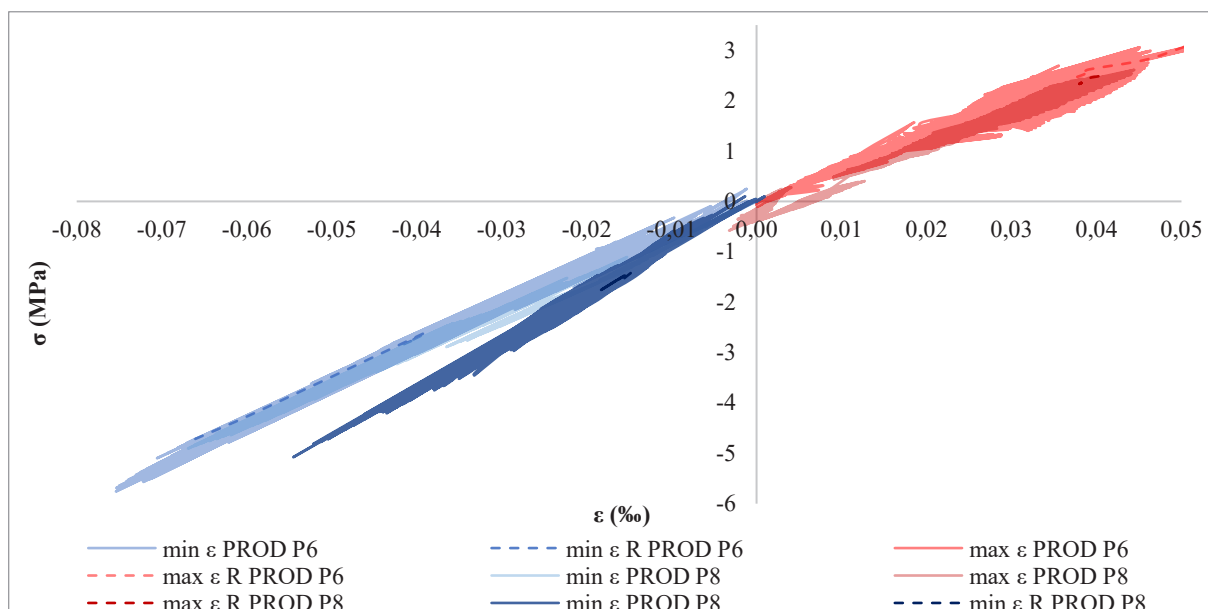
Slika 6.37: Ostanek minimalnih (min) in maksimalnih (max) deformacij keramičnih preizkušancev v produ (P) in melju (M) preizkusov 5–9 po koncu razbremenjevanja.



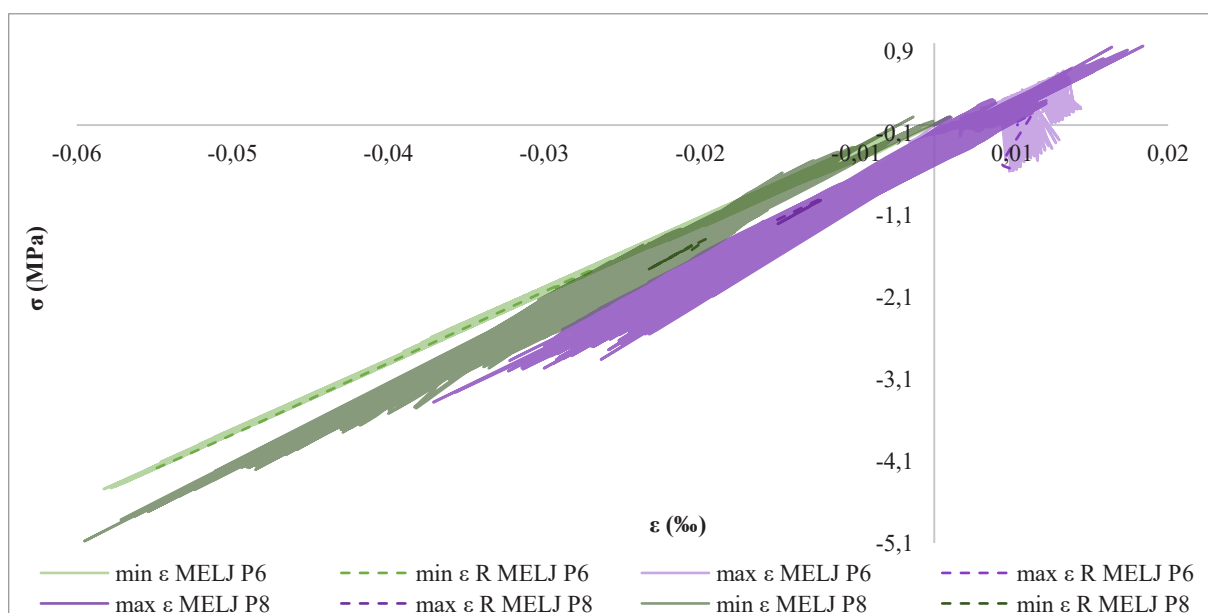
Slika 6.38: Primerjava grafov napetosti in deformacij (σ - ϵ) keramike v produ v preizkusih (P) 5, 7 in 9 med obremenjevanjem (polna črta) in razbremenjevanjem (R; prekinjena črta).



Slika 6.39: Primerjava grafov napetosti in deformacij (σ - ϵ) keramike v melju v preizkusih (P) 5, 7 in 9 med obremenjevanjem (polna črta) in razbremenjevanjem (R; prekinjena črta).



Slika 6.40: Primerjava grafov napetosti in deformacij (σ - ϵ) keramike v produ v preizkusih (P) 6 in 8 med obremenjevanjem (polna črta) in razbremenjevanjem (R; prekinjena črta).



Slika 6.41: Primerjava grafov napetosti in deformacij (σ - ϵ) keramike v melju v preizkusih (P) 6 in 8 med obremenjevanjem (polna črta) in razbremenjevanjem (R; prekinjena črta).

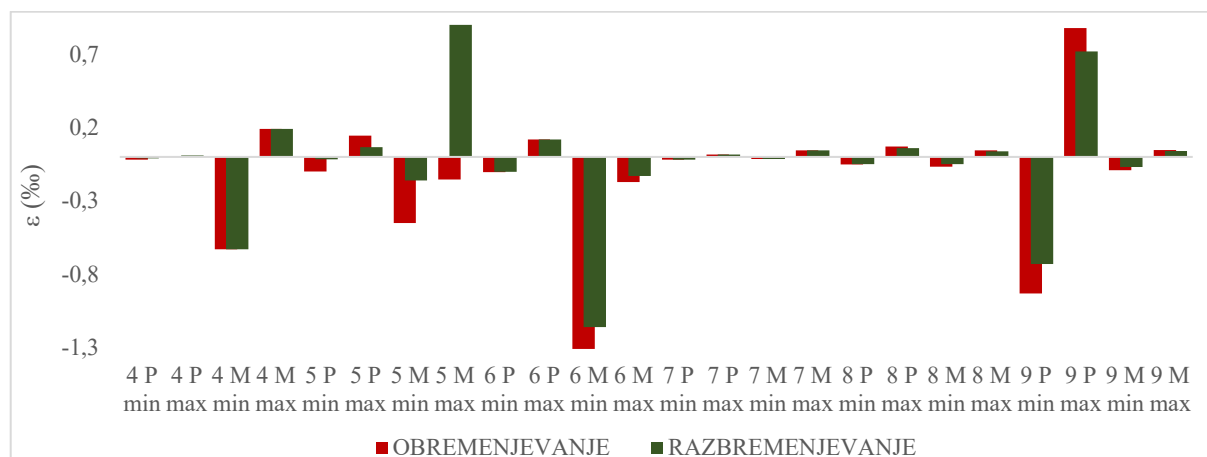
Pri steklenih preizkušancih so med obremenjevanjem nastale tlačne in natezne napetosti in deformacije, kar kaže na krčenje oz. raztezanje stekla. Opaziti je mogoče več tlačnih napetosti in deformacij ter manj nateznih. Natezne deformacije ob nateznih napetostih in tlačne deformacije ob tlačnih napetostih kažejo, da se preizkušanci med obremenjevanjem niso upogibali.

Pri steklenih preizkušancih so največje minimalne napetosti in deformacije nastale v melju v preizkusu 6 ter največje maksimalne napetosti in deformacije v produ v preizkusu 9. Pri večini preizkušancev so bile minimalne napetosti in deformacije tlačne, maksimalne pa natezne. Izjeme so nizek kozarec v produ v preizkusu 4 ter visoka kozarca v melju v preizkusih 5 in 6, kjer so bile vse napetosti in deformacije tlačne. Primerjava rezultatov monotoni preizkusov 5 (z zaščitnim slojem) in 7 (brez zaščitnega sloja) kaže večje napetosti in deformacije v preizkusu z zaščitnim slojem. Pri kozarcu v melju v preizkusu 5 so bile maksimalne napetosti in deformacije tlačne, v melju v preizkusu 7 pa natezne. Primerjava rezultatov preizkusov 5 in 7 s preizkusom 9 (brez zaščitnega sloja in z več časa za konsolidacijo zemljin) kaže največje napetosti in

deformacije pri preizkušancih v produ v preizkusu 9, medtem ko so bile vrednosti pri preizkušancih v melju v preizkusu 9 manjše kot v preizkusu 5 in večje kot v preizkusu 7. Primerjava med rezultati dinamičnih preizkusov 6 (z zaščitnim slojem) in 8 (brez zaščitnega sloja) kaže večje napetosti in deformacije pri steklu v preizkusu brez zaščitnega sloja. Ta razlika je bila pri preizkušancih v produ komaj opazna, medtem ko je bila pri preizkušancih v melju izrazita. Poleg tega so bile maksimalne napetosti in deformacije pri steklu v melju v preizkusu 6 tlačne, v melju v preizkusu 8 pa natezne (Sliki 6.42–6.43).



Slika 6.42: Največje minimalne (min) in maksimalne (max) napetosti (σ) stekla v produ (P) in melju (M) preizkusov 4–9 med obremenjevanjem (rdeča) in razbremenjevanjem (zelena).



Slika 6.43: Največje minimalne (min) in maksimalne (max) deformacije (ϵ) stekla v produ (P) in melju (M) preizkusov 4–9 med obremenjevanjem (rdeča) in razbremenjevanjem (zelena).

Pri steklenih preizkušancih so bile minimalne in maksimalne deformacije linearne elastične. Izrazito so se poškodovali preizkušanci v melju v preizkusih 4–7 ter v produ v preizkusih 5 in 6. Tlačne napetosti so pri steklenih preizkušancih nihale od -5,68 MPa do -98,8 MPa ter deformacije od -0,01 do -1,31 ‰. Natezne napetosti so nihale od 6,92 MPa do 12,32 MPa ter deformacije od 0,12 do 0,34 ‰. Pri tem je bil večji razpon vrednosti viden pri tlačnih napetostih in deformacijah. Poškodbe so na preizkušancih nastale med obremenjevanjem površine s 95 kN/m²–220 kN/m².

Steklo velja za krhek material z izrazito večjo tlačno trdnostjo v primerjavi z natezno. Natezna trdnost stekla je 25 MPa–120 MPa, mejne natezne deformacije 0,64 ‰–0,84 ‰, tlačna trdnost 500 MPa–900 MPa in mejne tlačne deformacije do 11 ‰⁴⁰ (Preglednica 6.8).

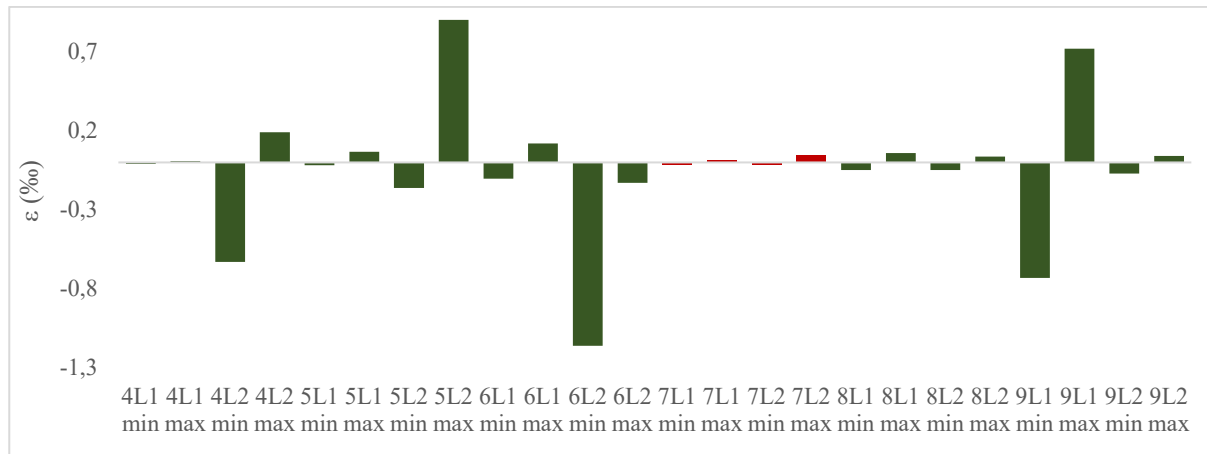
40 <http://gcs.gi-zrmk.si/Svetovanje/Clanki/Grobovsek/PT155.htm>.

Preglednica 6.8: Podatki o natezni in tlačni trdnosti stekla.

STEKLO	σ (MPa)	ε (‰)
NATEZNA TRDNOST	25–120	0,64–0,84
TLAČNA TRDNOST	500–900	~ 11

Pri steklenih preizkušancih v preizkusih napetosti niso dosegle natezne in tlačne trdnosti stekla, niti se deformacije niso približale mejnim nateznim in tlačnim deformacijam. Kljub temu je prišlo do pokanja in lomljenja preizkušancev. Razpoke so na mestu merilnega lističa nastale le na visokem kozarcu v melju v preizkusu 5. Vse napetosti in deformacije so bile tlačne, do poškodbe kozarca pa je prišlo med obremenjevanjem površine z 220 kN/m^2 , pri maksimalnih napetostih $-33,44 \text{ MPa}$, maksimalnih deformacijah $-0,45 \text{ ‰}$, minimalnih napetostih $-14,64 \text{ MPa}$ in minimalnih deformacijah $-0,15 \text{ ‰}$. Napetosti in deformacije so bile izključno tlačne tudi ob nastanku razpok na steklenem kozarcu v melju v preizkusu 7. Do poškodbe je prišlo med obremenjevanjem površine s 190 kN/m^2 , vendar pri izredno nizkih napetostih in deformacijah, kar je verjetno posledica nastanka razpok daleč proč od merilnega lističa (na nasprotni strani kozarca). Pri ostalih poškodovanih steklenih preizkušancih je do poškodb prišlo med obremenjevanjem površine s 95 kN/m^2 – 135 kN/m^2 . Minimalne napetosti in deformacije so bile tlačne, maksimalne pa natezne. Skladno z večjo tlačno trdnostjo stekla so bile tlačne napetosti in deformacije opazno manjše od nateznih (Preglednica M.13).

Kljub temu, da so bili poškodovani le preizkušanci v preizkusih 4–7, se pri nobenem preizkušancu po razbremenjevanju deformacije niso povrnila v prvotno stanje. Največ tlačnih deformacij je ostalo pri kozarcu v melju v preizkusu 6, največ nateznih pa pri kozarcu v melju v preizkusu 5. Najmanj tlačnih in nateznih deformacij je ostalo pri kozarcu v melju v preizkusu 4. Največji ostanek deformacij je opazen pri steklu v produ dinamičnih preizkusov in preizkusu z daljšo konsolidacijo zemljin ter pri steklu v melju v preizkusih z zaščitnim slojem (Preglednica M.14; Slika 6.44).



Slika 6.44: Ostanek minimalnih (min) in maksimalnih (max) deformacij steklenih preizkušancev v produ (P) in melju (M) preizkusov 5–9 po koncu razbremenjevanja.

7 Interpretacija rezultatov

V preizkušanjih v preizkusih 4–9 so bile ugotovljene tlačne in natezne napetosti in deformacije ter s tem njihovo krčenje in raztezanje. Več napetosti in deformacij je bilo tlačnih, kar je posledica obremenjevanja z vsiljevanjem tlačne sile. Izjema so koščeni preizkušanci. Pri lopaticah so bile v enaki meri prisotne tlačne in natezne napetosti in deformacije, verjetno zaradi njihove ploščate oblike. Pri lobanjah so bile ugotovljene tlačne napetosti z nateznimi deformacijami, kar kaže na upogib lobanjskih kosti. Do tega je verjetno prišlo zaradi izrazitejši telesnosti in votlosti lobanj.

Nihanja med tlačnimi in nateznimi napetostmi in deformacijami ter deformiranja preizkušancev ni mogoče neposredno povezati z določenim pogojem v preizkuševališču ali načinom obremenjevanja. Preizkušanje oz. razumevanje rezultatov je bilo zaradi prevelike kompleksnosti namreč močno poenostavljeno. Zanimarjeni so bili različni modeli obnašanja materialov pri večsni obremenitvah, raznolika geometrijska oblika preizkušancev ter dejstvo, da so bili preizkušanci obdani z zemljinami, ki so nehomogen medij, poleg tega pa robni pogoji niso bili konstantni. Treba je še upoštevati, da so merilni lističi deformacije merili le v eni ravnini, preizkušanci pa so bili izpostavljeni trirazsežnostnemu prostorskemu obremenjevanju. Zato so bile interpretacije napetosti in deformacij ter njihove odvisnosti od različnih načinov preizkušanja omejene na jasne spremembe pogojev: (ne)uporaba zaščitnega sloja, monoton in dinamičen način obremenjevanja, daljši čas konsolidacije zemljin, vrsta zemljine in material preizkušanca.

Zaščitni sloj je botroval večjim napetostim, deformacijam in poškodbam (negativen vpliv) pri bronastih, železnih in koščenih preizkušanjih v produ ter manjšim (pozitiven vpliv) v melju. Izjema so koščeni preizkušanci v dinamičnih preizkusih, kjer so bile napetosti, deformacije in poškodbe večje v melju. Pri keramičnih preizkušanjih je zaščitni sloj zmanjšal napetosti, deformacije in poškodbe preizkušancev (pozitiven vpliv) v produ, medtem ko jih je pri preizkušanjih v melju povečal (negativen vpliv). Pri steklu je zaščitni sloj povečal napetosti, deformacije in poškodbe preizkušancev (negativen vpliv) v produ in melju. Primerjava med vplivom velikosti sile in vibracijami kaže, da so vibracije povzročile večje napetosti, deformacije in poškodbe pri bronastih preizkušanjih v melju, koščenih preizkušanjih v produ ter steklenih preizkušanjih v produ in melju. V preostalih primerih je večje napetosti, deformacije in poškodbe povzročila velikost sile, ki je bila pri monotonem obremenjevanju dvakrat večja kot pri dinamičnem. Daljša konsolidacija zemljin je pri večini preizkušancev napetosti, deformacije in poškodbe zmanjšala (pozitiven vpliv). Izjema so koščeni preizkušanci v produ ter stekleni preizkušanci v produ in melju, pri katerih je daljša konsolidacija napetosti, deformacije in poškodbe povečala (negativen vpliv) (**Preglednica 7.1**). Pri teh ocenah ponovno opozarjamo na razlike v geometriji oz. telesnosti preizkušancev, saj so bili zlasti keramični in stekleni preizkušanci izrazito poškodbam naklonjenih oblik, ki pa se najpogosteje pojavljajo v arheoloških kontekstih.

Preglednica 7.1: Pozitivni in negativni vplivi različnih dejavnikov na preizkušance v obremenitvenih preizkusih.

MATERIAL		ZAŠČITA	SILA	VIBRACIJE	KONSOL.	MEJA PLASTIČNOSTI	PRELOM
ŽELEZO	PROD	-	-		+		
	MELJ	+	-		+		
BRON	PROD	-	-		+		
	MELJ	+		-	+		
KOST	PROD	-		-	-	P5, P8, P9	
	MELJ	+	-		+	P6, P7, P9	
KERAMIKA	PROD	+	-		+		P4
	MELJ	-	-		+		P5
STEKLO	PROD	-		-	-		P5, P6
	MELJ	-		-	-		P4, P7

Na kovinskih preizkušancih ni bilo vidnih poškodb, rezultati merilnih lističev pa ne kažejo nastanka plastičnih deformacij. Tudi koščeni preizkušanci niso bili izraziteje poškodovani, vendar je pri preizkušancih v produ v preizkusih 8 in 9 ter v melju v preizkusih 5–7 in 9 prišlo do nelinearnih deformacij. Nastanek nelinearnih deformacij je tako skladen s poškodbami preizkušancev, z negativnim vplivom obremenjevanja na koščene preizkušance v melju ne glede na prisotnost zaščitnega sloja (preizkusa 5 in 7) ter z negativnim vplivom kombinacije zaščitnega sloja in dinamičnega obremenjevanja (preizkus 6). Prav tako je nastanek nelinearnih deformacij skladen z negativnim vplivom vibracij (preizkus 8) in daljšo konsolidacijo (preizkus 9). Pri nastanku nelinearnih deformacij izstopa preizkušanec v melju v preizkusu 9, saj je imela daljša konsolidacija na koščene preizkušance v melju načeloma pozitiven vpliv. Morda je razlog kombinacija velikih vsiljenih sil, odsotnosti zaščitnega sloja in predhodno razmeroma dobro konsolidiranega melja. Pri lopatici v slabo konsolidiranem melju in brez zaščitnega sloja (preizkus 7) so nelinearne deformacije nastale med obremenjevanjem površine s 190 kN/m^2 , medtem ko so pri lopatici v boljše konsolidiranem melju in brez zaščitnega sloja (preizkus 9) nelinearne deformacije nastale med obremenjevanjem površine s 140 kN/m^2 . Rezultat potrjuje, da so bile ob boljši konsolidaciji melja za nastanek nelinearnih deformacij pri koščениh preizkušancih potrebne manjše obremenitve površine. S primerjavo obremenitev površine ob nastanku nelinearnih deformacij pri lopaticah in lobanjah je bila potrjena večja občutljivost slednjih, saj so nelinearne deformacije pri lobanjah nastale ob manjših obremenitvah. Na lopatici v produ v preizkusu 9 so nelinearne deformacije nastale med obremenjevanjem površine s 190 kN/m^2 in na lopatici v melju med obremenjevanjem površine s 140 kN/m^2 . V enakih preizkusnih pogojih so na lobanji nelinearne deformacije nastale med obremenjevanjem površine s 120 kN/m^2 oz. 80 kN/m^2 .

Keramični preizkušanci so se izrazito poškodovali v produ v preizkusu 4 in v melju v preizkusu 5. V prvem primeru je do poškodbe prišlo med obremenjevanjem površine s 155 kN/m^2 , v drugem pa med obremenjevanjem površine s 155 kN/m^2 – 190 kN/m^2 . Stekleni preizkušanci so se izrazito poškodovali v produ v preizkusih 5 in 6, med obremenjevanjem površine s 95 kN/m^2 oz. 155 kN/m^2 , ter v melju v preizkusih 4 in 7, med obremenjevanjem površine s 135 kN/m^2 oz. 190 kN/m^2 . Poškodbe steklenih in keramičnih preizkušancev v preizkusih 4 in 5 so skladne z velikimi vsiljenimi silami ter negativnim vplivom zaščitnega sloja. Pri preizkusu 4 gre razloge iskati tudi v večji vlažnosti zemljin in s tem večji teži melja ter v grobozrnatosti produ. Poškodbe kozarca v preizkusu 6 gre pripisati negativnim vplivom kombinacije zaščitnega sloja in vibracij. V preizkusu 7 (brez zaščitnega sloja in vibracij) je poškodba kozarca verjetno posledica velike vsiljene sile neposredno na nezaščiten plast melja (Preglednica 7.3).

Vplive obremenitev površine na keramične in koščene preizkušance je mogoče primerjati z raziskavami Da-in-Owensa in sodelavcev (2009). Njihove raziskave so se osredotočile na vpliv obremenitev težke mehanizacije na v tla zakopane človeške koželjnice iz arheoloških kontekstov in ročno izdelane sodobne keramične posode.

Pri obremenjevanju so ugotavljali napetosti, ki so potrebne za poškodbe izbranih preizkušancev. Opozoriti velja, da so napetosti, merjene s senzorji konteksta, predstavljale le še 7,3 % prvotne tlačne trdnosti. Dejanska razlika med odzivom sveže kosti in kosti iz arheološkega konteksta je bila prikazana tudi s preizkusom 10 naše raziskave, kjer je pod istimi pogoji sveža kost ostala nepoškodovana, medtem ko se je kost iz arheološkega konteksta prelomila. Do preloma je prišlo pri minimalnih tlačnih napetostih -0,35 MPa, minimalnih tlačnih deformacijah -0,08 ‰, maksimalnih nateznih napetostih 3,76 MPa in maksimalnih nateznih deformacijah 0,27 ‰. Glede na to, da so spremljajoče porušne preiskave pokazale porušitev sveže kosti pri napetostih 8–13,5 MPa in deformacijah 2,5–6,13 ‰, so vrednosti ob prelomu kosti iz preizkusa 10 podobne oz. presegajo za kosti iz arheoloških kontekstov poročano 7,3-odstotno trdnost sveže kosti. Na svežih koščenih preizkušancih so bile omenjene vrednosti iz spremljajočih porušnih preiskav dosežene in presežene. Iz tega je mogoče sklepati, da bi v preizkusih 4–9 ob zamenjavi svežih kosti s kostmi iz arheoloških kontekstov verjetno prišlo do izrazitejših poškodb. Na to kažejo tudi v preizkusih 6–9 uporabljene kosti iz arheoloških kontekstov, ki sicer niso bile opremljene z merilnimi lističi, vendar je bila večina vidno poškodovanih (**Preglednica 7.2**) – v zemljini in ne na samih preizkušancih (kot je v naši raziskavi). Koščeni preizkušanci so se razlomili pri napetostih v zemljini 280 kPa (Dain-Owens et al. 2009, Priloga 2, 28). V pričujoči raziskavi so napetosti v zemljini ob obremenjevanju nihale med 40 kPa in 60 kPa v produ ter med 40 kPa in 80 kPa v melju, torej so bile nižje od izpričanih 280 kPa. Tako je odsotnost izrazitih poškodb koščenih preizkušancev razumljiva. Poleg tega so Dain-Owens in sodelavci uporabili suhe kosti iz arheoloških kontekstov, v pričujoči raziskavi pa so bile večinoma uporabljene sveže, elastične kosti. Pri kosteh iz arheoloških kontekstov je namreč treba upoštevati njihovo izsuševanje in propad kolagena ter posledično izgubo elastičnosti. Pal (2014) omenja, da že samo izsušitev kosti njeno trdnost zmanjša za tretjino, izguba kolagena pa še dodatno oslabi njene mehanske lastnosti. Turner-Walker in Parry (1995) poročata, da tlačna trdnost dobro ohranjene kosti iz arheološkega konteksta znaša približno polovico prvotne tlačne trdnosti in tlačna trdnost slabo ohranjene kosti iz arheološkega konteksta znaša približno polovico prvotne tlačne trdnosti in tlačna trdnost slabo ohranjene kosti iz arheološkega konteksta predstavlja le še 7,3 % prvotne tlačne trdnosti. Dejanska razlika med odzivom sveže kosti in kosti iz arheološkega konteksta je bila prikazana tudi s preizkusom 10 pričujoče raziskave, kjer je pod istimi pogoji sveža kost ostala nepoškodovana, medtem ko se je kost iz arheološkega konteksta prelomila. Do preloma je prišlo pri minimalnih tlačnih napetostih -0,35 MPa, minimalnih tlačnih deformacijah -0,08 ‰, maksimalnih nateznih napetostih 3,76 MPa in maksimalnih nateznih deformacijah 0,27 ‰. Glede na to, da so spremljajoče porušne preiskave pokazale porušitev sveže kosti pri napetostih 8–13,5 MPa in deformacijah 2,5–6,13 ‰, so vrednosti ob prelomu kosti iz preizkusa 10 podobne oz. presegajo za kosti iz arheoloških kontekstov poročano 7,3 % trdnost sveže kosti. Na svežih koščenih preizkušancih so bile omenjene vrednosti iz spremljajočih porušnih preiskav dosežene in presežene. Iz tega je mogoče sklepati, da bi pri preizkusih 4–9 ob zamenjavi svežih kosti s kostmi iz arheoloških kontekstov verjetno prišlo do izrazitejših poškodb. Na to kažejo tudi pri preizkusih 6–9 uporabljene kosti iz arheoloških kontekstov, ki sicer niso bile opremljene z merilnimi lističi, vendar je bila večina vidno poškodovanih (**Preglednica 7.2**).

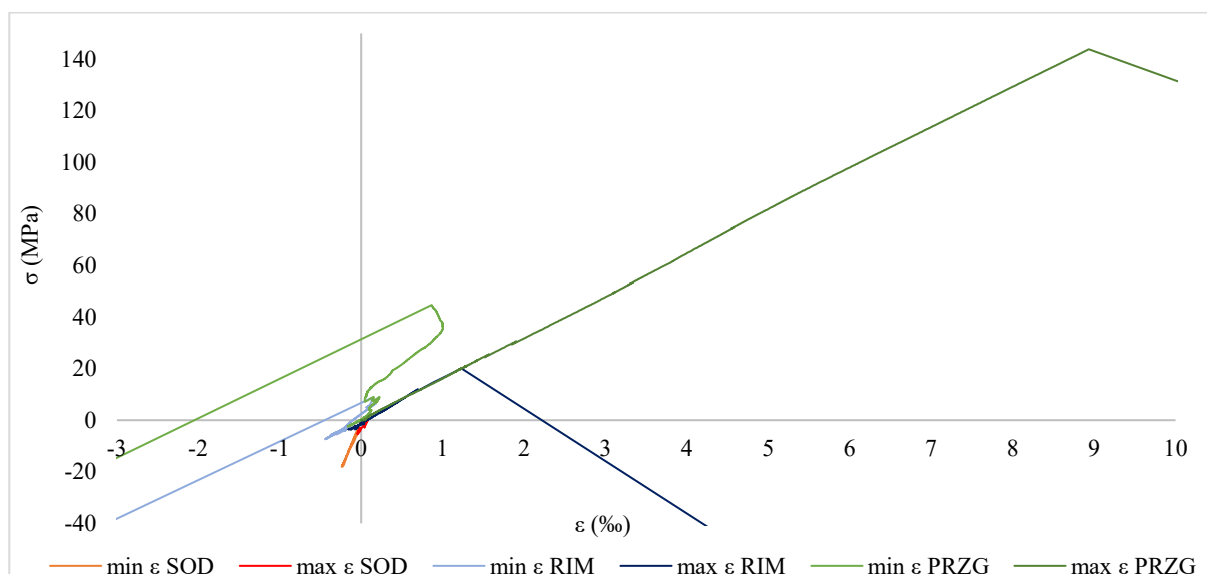
Preglednica 7.2: Vizualno dokumentirane poškodbe arheoloških koščenih preizkušancev v preizkusih 6–9.

PREIZKUS	IZVOR	PREIZKUŠANEC	POŠKODBA
6 PROD	arheološki	živalska dolga kost	površinska razpoka
6 MELJ	arheološki	živalska dolga kost	
7 PROD	arheološki	živalska dolga kost	globoka razpoka
7 MELJ	arheološki	živalska dolga kost	
8 PROD	arheološki	živalska dolga kost	tanke razpoke
8 MELJ	arheološki	živalska dolga kost	povečanje obstoječe razpoke
9 PROD	arheološki	živalska dolga kost	razpoke in razpad
9 MELJ	arheološki	živalska dolga kost	

Pri keramičnih preizkušancih iz raziskave Dain-Owensa in sodelavcev (2009) se je izkazalo, da so se vodoravno nameščeni keramični lonci razlomili pri napetostih v zemljini med 130 kPa in 360 kPa (Dain-Owens et al. 2009, Priloga 2, 28). V pričujoči raziskavi so bile v zemljini izračunane nižje napetosti (40–80 kPa) kot izpričanih 130–360 MPa. Kljub temu sta se keramični lonček v produ v preizkusu 4 in keramična skodelica v melju v preizkusu 5 razlomila. Pri obeh preizkušancih je poškodba nastala na ustju, kar je skladno z rezultati raziskave Dain-Owensa in sodelavcev (2009, Priloga 2, 28). Omeniti velja, da so bili v obeh raziskavah uporabljeni sodobni keramični preizkušanci, ki predhodno niso bili izpostavljeni vplivom okolja, kot gre pripisati arheološkim ostalinam. Keramika, ki je izpostavljena dejavnikom okolja, je običajno bolj porozna, razpokana in ima slabše mehanske lastnosti. Tako gre predpostaviti, da bi bili ob enakih pogojih arheološki keramični predmeti bolj ogroženi kot sodobni. To je bilo prikazano tudi s preizkusom 10, kjer je ob istih pogojih obremenjevanja sodobne keramike in keramike iz arheološkega konteksta prišlo do različnih poškodb. Sodobna keramika je prve razpoke utrpela pri minimalnih tlačnih napetostih -18,11 MPa, minimalnih tlačnih deformacijah -0,24 ‰, maksimalnih nateznih napetostih 0,08 MPa in maksimalnih nateznih deformacijah 0,31 ‰. Prve razpoke rimske keramike so nastale pri minimalnih tlačnih napetostih -5,99 MPa, minimalnih tlačnih deformacijah -0,37 ‰, maksimalnih tlačnih napetostih -3,5 MPa in maksimalnih tlačnih deformacijah -0,07 ‰. Prazgodovinska keramika je prve razpoke utrpela pri minimalnih tlačnih napetostih -2,3 MPa in minimalnih tlačnih deformacijah -0,16 ‰. Preizkus 10 kaže prevlado tlačnih napetosti in deformacij pri vseh preizkušancih, kar je posledica obremenjevanja z vsiljevanjem tlačne sile. Rimski in prazgodovinski preizkušane sta utrpela večje deformacije ob manjših napetostih v primerjavi s sodobnim preizkušancem, ki je temu primerno utrpel tudi manj poškodb (Sliki 7.1–7.2).



Slika 7.1: Napetosti (modra) in deformacije (rdeča) sodobnega (SOD), rimskega (RIM) in prazgodovinskega (PRZG) keramičnega preizkušanca ob nastanku prvih razpok v preizkusu 10.



Slika 7.2: Primerjava grafov napetosti in deformacij (σ - ϵ) sodobnega (SOD), rimskega (RIM) in prazgodovinskega (PRZG) keramičnega preizkušanca v preizkusu 10.

Preglednica 7.3: Povzetek pomenljivih vrednosti za v preizkusih izrazito poškodovane preizkušance.

MATERIAL	PREIZKUS/PLAST	VRSTA	GLOBINA (m)	σ (MPa)	ϵ (‰)	σ_{POV} (kN/m ²)	σ_{ZEMLJ} (kN/m ²)
ARHEOLOŠKA KOST	10	TLAK	0,2	-0,35	-0,08	400	/
		NATEG	0,2	3,76	0,27		
SODOBNA KERAMIKA	10	TLAK	0,2	-18,11	-0,246	350	/
		NATEG		0,08	0,31		
SODOBNA KERAMIKA	4 / PROD	TLAK	0,95	-5,12	-0,07	155	42
		NATEG		4,18	0,06		
SODOBNA KERAMIKA	5 / MELJ	TLAK	0,5	-8,78	-0,13	190	44
		NATEG		9,47	0,26		
ANTIČNA KERAMIKA	10	TLAK	0,2	-3,55	-0,07	320	/
PRAZGODOVINSKA KERAMIKA	10	TLAK	0,2	-2,3	-0,16	180	/
STEKLO	4 / MELJ	TLAK	0,5	-5,68	-0,63	135	40
		NATEG		12,32	0,19		
STEKLO	5 / PROD	TLAK	0,95	-6,20	-0,10	95	33
		NATEG		9,95	0,15		
STEKLO	5 / MELJ	TLAK	0,5	-14,6--33,4	-0,15--0,45	220	58
STEKLO	6 / PROD	TLAK	0,95	-6,53	-0,10	135	40
		NATEG		6,92	0,12		
STEKLO	6 / MELJ	TLAK	0,5	-98,80	-1,31	100	35
		NATEG		11,89	0,34		
STEKLO	7 / MELJ	TLAK	0,25	-0,77--0,11	-0,1	190	43

Avsenik (2012) je z računalniškimi simulacijami pokazala, kolikšne deformacije glinenih in peščenih tal bi povzročil 23.140 kg težak tovornjak s ploskovno obtežbo 31,32 kN/m² pod vsakim kolesom, na površini glinenih tal brez zaščitnega nasipa ter z različnimi zaščitnimi nasipi. Na podlagi rezultatov je bilo zaključeno, da bi bil optimalni zaščitni sloj na glinenih tleh geosintetik in 0,4 m visok nasip iz navadnega nasipnega materiala ali geosintetik in 0,8 m visok nasip iz ekspanzirane gline. Optimalni zaščitni sloj na peščenih tleh bi bil geosintetik in 0,6 m visok nasip iz običajnega materiala ali geosintetik in 0,4 m visok nasip iz

ekspandirane gline. Ob predpostavki, da so arheološke najdbe dovolj majhne, da se bodo deformirale enako kot temeljna tla (Avsenik 2012, 26), in neupoštevanju razlik med meljem in glino ter peskom in peščenim prodom, je mogoče primerjati velikost deformacij ob dejanski poškodbi preizkušanca v pričujoči raziskavi in s simulacijami pridobljene podatke (Avsenik 2012, 104, 105, Preglednici 40 in 41; **Preglednica 7.4**).

Kost iz arheološkega konteksta v melju na globini 0,2 m se je poškodovala pri nateznih deformacijah 0,27 ‰. Simulacije so na enaki globini pokazale manjše natezne deformacije gline ob uporabi zaščitnega sloja iz ekspandirane gline (0,15 ‰), medtem ko so bile pri ostalih zaščitnih slojih natezne deformacije 0,27 ‰ presežene. Sodobna, rimska in prazgodovinska keramika v melju na globini 0,2 m so se poškodovale pri tlačnih deformacijah -0,24 ‰, -0,07 ‰ oz. -0,16 ‰. Pri simulacijah so bile tlačne deformacije gline na enaki globini višje od deformacij ob nastanku poškodb, ne glede na vrsto zaščitnega sloja. Sodobna keramika v melju na globini 0,5 m se je poškodovala pri tlačnih deformacijah -0,13 ‰ ter nateznih deformacijah 0,26 ‰. Simulacije so pokazale deformacije gline, ki so bile manjše od 0,26 ‰, ob uporabi katerega koli zaščitnega sloja, pri čemer so bile pri običajnem nasipnem materialu natezne deformacije gline le rahlo nižje (0,23 ‰), medtem ko so bile pri ekspandirani glini nižje za več kot polovico (0,1 ‰).

Poškodbe stekla v melju na globini 0,25 m so nastale pri tlačnih deformacijah -0,1 ‰. Pri simulacijah so bile deformacije gline na enaki globini v vseh primerih višje. Steklo v melju na globini 0,5 m se je poškodovalo pri tlačnih deformacijah -0,15 ‰, -0,63 ‰ in -1,31 ‰ ter pri nateznih deformacijah 0,19 ‰ in 0,34 ‰. Pri simulacijah so bile deformacije gline na enaki globini najnižje pri zaščitnem sloju iz 0,8 m visokega nasipa ekspandirane gline (-0,64 ‰), vendar še vedno višje kot pri večini poškodovanih preizkušancev.

Sodobna keramika v produ na globini 0,95 m se je poškodovala pri tlačnih deformacijah -0,07 ‰ in nateznih deformacijah 0,06 ‰. Pri simulacijah so bile v peščenih tleh na globini 0,8 m–1 m tlačne deformacije krepko višje tudi ob uporabi zaščitnega sloja (-0,46 ‰, -0,22 ‰), medtem ko so bile natezne deformacije z uporabo zaščitnega sloja rahlo nižje (0,05 ‰, 0,04 ‰). Steklo v produ na globini 0,95 m se je poškodovalo pri tlačnih deformacijah -0,1 ‰ in nateznih deformacijah 0,12 ‰–0,15 ‰. Pri simulacijah so bile tlačne deformacije peščenih tal na primerljivi globini v vseh primerih višje tudi ob uporabi zaščitnega sloja (-0,46 ‰, -0,22 ‰), medtem ko so bile natezne deformacije rahlo višje le ob odsotnosti zaščitnega sloja (0,18 ‰). Na osnovi primerjave je mogoče zaključiti, da s simulacijami določen optimalni zaščitni sloj ne bi zaščitil vseh najdb, saj so vrednosti deformacij tal pogosto presegle vrednosti deformacij, ki so bile ugotovljene v preizkušancih ob nastanku poškodb.

Preglednica 7.4: S simulacijami pridobljene velikosti deformacij tal (Povzeto po Avsenik 2012, 104–105, Preglednici 40 in 41).

GLINA	0	NATEZNE HORIZONTALNE DEFORMACIJE (‰)			VERTIKALNE DEFORMACIJE (‰)		
		BREZ NASIPA	0,4 m VISOK NASIP IZ OBIČ. MATERIALA	0,8 m VISOK NASIP IZ EKSP. GLINE	BREZ NASIPA	0,4 m VISOK NASIP IZ OBIČ. MATERIALA	0,8 m VISOK NASIP IZ EKSP. GLINE
	0–0,2	3,94	0,29	0,15	-7,03	-1,8	-1,03
PESEK	0,4–0,6	0,49	0,23	0,1	-1,53	-0,9	-0,64
	GLOBINA (m)	NATEZNE HORIZONTALNE DEFORMACIJE (‰)			VERTIKALNE TLAČNE DEFORMACIJE (‰)		
		BREZ NASIPA	0,4 m VISOK NASIP IZ OBIČ. MATERIALA	0,6 m VISOK NASIP IZ EKSP. GLINE	BREZ NASIPA	0,4 m VISOK NASIP IZ OBIČ. MATERIALA	0,6 m VISOK NASIP IZ EKSP. GLINE
	0,8–1	0,18	0,05	0,04	-1,38	-0,46	-0,22

8 Mehanske obremenitve tal pri varovanju *in situ*

Celostno varovanje *in situ* velja za prednostno obliko ohranjanja dediščine, a le ob ustreznih fizičnih pogojih za dejansko ohranitev ostalin ter družbeno, ekonomsko in strokovno utemeljeni strategiji. Pri odločitvah o varovanju arheoloških ostalin *in situ* je treba pred aktivnostmi, ki bodo povzročile mehanske obremenitve tal, npr. pri izvedbi ukrepov za izboljšanje pogojev na najdišču ali aktivni rabi prostora, oceniti posledice aktivnosti.

Dodatne mehanske obremenitve bodo povzročile spremembo napetostnega stanja v tleh (glej poglavje 3). Pri tem bodo nastale deformacije, odvisne od prvotnega napetostnega stanja, torej stanja pred obremenitvami, dodatnih napetosti, ki jih bo povzročilo obremenjevanje, ter novih napetostnih stanj, ki so vsota prvotnih in dodatnih napetosti. Spremembe napetostnih stanj bodo povzročile deformacije tal, ki se bodo ob iztiskanju zraka in vode iz por postopno konsolidirala oz. gostila. Za oceno sprememb napetostnih stanj in deformacij tal ter s tem razvoja posedkov, mejnih napetostnih stanj, nosilnosti in dopustnih obremenitev je treba najprej pridobiti podatke o fizikalnih lastnostih zemljin ter prepustnosti, deformabilnosti in trdnosti obravnavanih tal (geotehnični podatki). Ker se zemljine obnašajo zelo različno in v odvisnosti od številnih spremenljivk, morajo biti omenjeni podatki pridobljeni za vsak primer oz. najdišče posebej. Pridobitev podatkov temelji na standardiziranih inženirskih laboratorijskih in terenskih raziskavah,⁴¹ ki so za predstavbo o njihovem poteku in zahtevnosti v grobem predstavljene v Prilogi N.

Obremenitve bodo vplivale tudi na v tleh prisotne ostaline. Zato je potrebno poznavanje trdnostnih parametrov in mejnih deformacij na najdišču prisotnih materialov, torej napetosti in deformacij, ki jih material prenese, preden se poškoduje. Vrednosti na arheoloških najdiščih pogosto prisotnih materialov so na podlagi pregleda literature (O'Sullivan in Swailes 2009, 271, 272; Kelton et al. 2011, 642; Fernandez-Navarro in Villegas 2013, 18; Pelleg 2014, 53, 73) povzete v **Preglednici 8.1**. Vrednosti so okvirne ter izhajajo iz porušnih preiskav modernih materialov in ne iz preiskav v zemljino zakopanih arheoloških ostalin. V **Preglednici 8.2** so povzete napetosti in deformacije, pri katerih so v pričujoči raziskavi ter raziskavi Dain-Owensa in sodelavcev (2009) nastale poškodbe na preizkušancih, zakopanih v zemljino. Podane vrednosti močno nihajo in so občutno nižje od splošnih vrednosti iz **Preglednice 8.1**, saj temeljijo na preiskavah različno oblikovanih sodobnih preizkušancev in preizkušancev iz arheoloških kontekstov, ki so bili zakopani različno globoko v nehomogeni in razmeroma grobozrnati zemljini. Tako je očitno, da lega in lastnosti materiala oz. ostaline ter okolje, v katerem se nahaja, botrujejo različnim mejnim vrednostim. Zato bi bilo treba za natančnejšo oceno mehanskih lastnosti na določenem najdišču prisotnih ostalin izvesti dodatne raziskave po vzoru v nalogi predstavljenih porušnih preiskav.

41 <http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/kmtal-gradiva/Gradiva%20za%20vec%20predmetov/Skripta%20Janko%20Logar/TERENSKE%20PREISKAVE.pdf>; <http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/kmtal-gradiva/Gradiva%20za%20vec%20predmetov/MT%20-%20FIZIKALNE%20LASTNOSTI.pdf>; Das in Baaranja 2003.

Preglednica 8.1: Pregled splošnih mejnih napetosti in deformacij za izbrane materiale.

MATERIAL	MEJNE NAPETOSTI (MPa)		MEJNE DEFORMACIJE (%)	
	TLAČNE	NATEZNE	TLAČNE	NATEZNE
LES	1,7	1,5	7	1
ČLOVEŠKA KOST	107	124	1,9	0,14
ŽIVALSKA KOST	100	88	1,7	0,7
ŽELEZO	150		4	
BRON	210		5,9	
STEKLO	950	25	1,1	0,07
KERAMIKA	5	2	0,1	0,07

Preglednica 8.2: Podatki o napetostih in deformacijah, zemljini in globini, pri katerih so se preizkušanci poškodovali.

MATERIAL	PLAST	GLOBINA (m) NAMESTITVE	VRSTA NAPETOSTI IN DEFORMACIJ	σ (MPa) V PREIZKUŠANCU	ε (‰) V PREIZKUŠANCU	σ_{POV} (kPa) NA POVRŠINI	σ_{ZEMLJ} (kPa) V ZEMLJINI
ARHEOLOŠKA ŽIVALSKA KOST	MELJ	0,2	TLAČNE	0,35	0,08	400	/
		0,2	NATEZNE	3,76	0,27		
ARHEOLOŠKA ČLOVEŠKA KOST ⁴²	PEŠČEN MELJ	0,25	/	/	/	45-60	280
SODOBNA KERAMIKA	MELJ	0,2	TLAČNE	18,11	0,25	350	/
			NATEZNE	0,08	0,31		
SODOBNA KERAMIKA	PROD	0,95	TLAČNE	5,12	0,07	155	42
			NATEZNE	4,18	0,06		
SODOBNA KERAMIKA	MELJ	0,5	TLAČNE	8,78	0,13	190	440
			NATEZNE	9,47	0,26		
ANTIČNA KERAMIKA	MELJ	0,2	TLAČNE	3,55	0,07	320	/
PRAZGODOVINSKA KERAMIKA	MELJ	0,2	TLAČNE	2,3	0,16	180	/
SODOBNA KERAMIKA ⁴³	PEŠČEN MELJ	0,25	/	/	/	25-60	130-160
STEKLO	MELJ	0,5	TLAČNE	5,68	0,63	135	40
			NATEZNE	12,32	0,19		
STEKLO	PROD	0,95	TLAČNE	6,20	0,10	95	33
			NATEZNE	9,95	0,15		
STEKLO	MELJ	0,5	TLAČNE	14,6-33,4	0,15-0,45	220	58
STEKLO	PROD	0,95	TLAČNE	6,53	0,10	135	40
			NATEZNE	6,92	0,12		
STEKLO	MELJ	0,5	TLAČNE	98,80	1,31	100	35
			NATEZNE	11,89	0,34		
STEKLO	MELJ	0,25	TLAČNE	0,77-0,11	0,1	190	43

42 Dain-Owens et al. 2009.

43 Dain-Owens et al. 2009.

Če želimo arheološko najdišče zaščititi pred spremembami, ki bodo popačile ali uničile njegov informacijski potencial, moramo v naslednjem koraku določiti meje, ki jih posledice obremenitev ne smejo preseči. Z vidika mehanike je treba določiti mejne napetosti in deformacije zemljin in v njih prisotnih materialov. Najbolj grob kriterij dovoljenih obremenitev tal bo vezan na spremembo napetostnih stanj. Obremenitve površine ne smejo povzročiti tako velikih sprememb napetosti, da bi novo napetostno stanje preseglo mejne napetosti obravnavanih tal, saj bo v nasprotnem primeru prišlo do njihove porušitve. Določitev mejnih napetostnih stanj temelji na stabilnostnih analizah, ki jih je mogoče izvesti s poznavanjem lastnosti tal in obremenitev.⁴⁴ Ob prisotnosti arheoloških ostalin je treba dovoljene obremenitve prilagoditi do te mere, da novo napetostno stanje v tleh ne bo večje od napetosti, ki jih lahko prenesejo ostaline oz., da trdnost in mejne deformacije ohranjenih materialov ne bodo presežene.

Zbrani podatki o prepustnosti, deformabilnosti in trdnosti tal ter mehanskih lastnostih materialov na določenem najdišču omogočajo izračune in izvedbo računalniških simulacij in/ali fizičnih preizkusov odziva obravnavanih tal in ostalin na obremenitve. Pri tem moramo simulacije/preizkuse prilagajati do te mere, da novonastale napetosti in deformacije ne presegajo postavljenih mejnih vrednosti. Vključimo lahko zaščitne sloje različnih dimenzij, grajenih z uporabo različnih geotekstilov in nasipnih materialov, prilagajamo gosenice in pnevmatike gradbenih/kmetijskih strojev, omejimo vibracije za potrebe utrjevanja tal ipd. (glej Avsenik 2012, Dain-Owens et al. 2009). Dejansko izvedbo aktivnosti na območju prilagodimo pridobljenim rezultatom. Če to ni mogoče, moramo sprejeti drugačne ukrepe za zaščito ostalin, v skrajnem primeru prepoved določenih aktivnosti ali izvedbo arheoloških izkopavanj.

Obremenitve lahko povzročijo tudi druge spremembe v okolju, zato je treba poleg mejnih napetosti in deformacij vzpostaviti mejne vrednosti za lastnosti, ki najbolj vplivajo na ohranjanje arheoloških ostalin *in situ*: vlažnost, kislost/bazičnost, redoks potencial, temperatura in posedanje tal. Meje vrednosti omenjenih lastnosti je najbolje določiti na podlagi rezultatov kratkoročnega monitoringa. Ta z beleženjem podatkov v vsaj enem koledarskem letu poda informacije o stanju pred obremenitvami in izhodišča za določitev velikosti sprememb, ki ne bodo povzročile pospešenega propada arheoloških ostalin.

V kontekstu ohranjanja arheoloških ostalin se za vlažnost uporablja tristopenjski sistem (Hughes 1999), po katerem so spremembe vlažnosti < 5 % nizke in nenevarne, spremembe 6 %–10 % zmerne in potencialno nevarne ter spremembe > 11 % visoke in nevarne.

Redoks potencial v tleh niha med približno –400 mV in +800 mV. Ohranjanju arheoloških ostalin so naklonjeni predvsem redukcijski pogoji (Preglednica 8.3, kategorije 6–10), ki morajo biti karseda stabilni (Smit, Van Heeringen in Theunissen, 2006, 70–72).

Preglednica 8.3: Kategorije redoks potenciala.

REDOKS POTENCIAL	KATEGORIJA	OHRANITVENI POTENCIAL
+680–800	1	nizek  visok
+560–680	2	
+440–560	3	
+320–440	4	
+200–320	5	
+80–200	6	
-40–+ 80	7	
-160–40	8	
-280–160	9	
-400–280	10	

44 <https://gradbenik.files.wordpress.com/2010/01/6-mejna-napetostna-stanja-v-temeljnih-tleh-stabilnostne-analize.pdf>.

Pomen pH vrednosti za ohranjanje arheoloških ostalin je odvisen od posameznega materiala. Nekateri materiali se bolje ohranijo v bazičnem (steklo, kovine, žindra, kost in tekstil rastlinskega izvora), drugi v rahlo kislem okolju (tekstil živalskega izvora in pelod), medtem ko tretji ne kažejo občutljivosti na pH vrednost (kamen, keramika in les) (Kars in Smit 2003; Smit, Van Heeringen in Theunissen 2006, 73). Na osnovi pH lestvice je zemljina kislja pri pH vrednosti $< 6,5$, nevtralna pri pH vrednosti $6,6-7,3$ in bazična pri pH vrednosti $> 7,4$. Za interpretacijo meritev oz. zaznavanje vplivnih sprememb pH vrednosti je zahtevana natančnost $\pm 0,5$ pH enote (Smit, Heeringen in Theunissen 2006, 76). Najbolje je, če na določenem najdišču za osnovo vzamemo pH vrednost plasti z dobro ohranjenimi arheološkimi ostalinami in to vrednost ohranjamo, saj bodo že spremembe za eno do dve enoti v večini primerov pospešile propadanje materialov (Smit, Heeringen in Theunissen 2006, 73).

Tudi vpliv temperature se od materiala do materiala močno razlikuje, a se večina arheoloških ostalin najbolje ohrani v hladnejših okoljih ($< 10-15^{\circ}\text{C}$). Za ostaline so najnevarnejši ekstremi in nihanja, kot npr. zamrzovanje in tajanje ali nenaden dvig temperature za več stopinj (Mathewson, Gonzalez in Eblen 1992, 11). Natančno mejo dovoljene spremembe je zaradi odsotnosti podatkov te vrste težko podati. Vsekakor pa se povprečna letna temperatura na najdišču ne sme dvigovati. Hollesen in sodelavci (2012, 167) namreč poročajo, da lahko dvig temperature za 1°C propad organskih ostankov pospeši za 12 %.

Priporočila o mejnih vrednostih posedkov tal v primeru ohranjanja arheoloških najdišč in situ ne obstajajo. Gre za izrazito relativen vidik, pogojen z obravnavanim najdiščem. Pri gradnji objektov je sprejemljiva velikost posedkov vezana na mejno stanje uporabnosti (razpoke, zapiranje vrat in oken ...). Tako v grobem velja, da absolutni posedki v nekoherentnih tleh ne smejo preseči 5 cm, v koherentnih tleh pa ne 2,5 cm.⁴⁵ Vrednosti niso neposredno prenosljive na arheološko najdišče pod površjem tal in služijo zgolj za občutek. Posedki ne bi smeli biti večji od omenjenih 5 cm oz. 2,5 cm, saj bi s tem lahko prišlo do popačenja stratigrafije, spremembe konteksta najdb in sprememb v okolju, kot je vlažnost zemljin.

Ker do sprememb v okolju ne pride vedno hipoma, je ob dejanski izvedbi aktivnosti potreben dolgoročni monitoring. Ta služi opazovanju najdišča daljše časovno obdobje in omogoča:

- zaznavanje sprememb v okolju in morebitnih groženj ostalinam,
- preverbo uspešnosti morebitnih ukrepov za izboljšanje pogojev v okolju,
- prepoznavanje potrebe po novih ukrepih,
- oceno primernosti lokacije meritvenih točk, pogostosti meritev in določenih mejnih vrednosti ter morebitno potrebo po njihovi prilagoditvi.

Lastnosti okolja, pogostost in lokacije meritev so lahko pri dolgoročnem monitoringu enake kot pri kratkoročnem oz. so deloma prilagojene glede na rezultate slednjega. Dolgoročnega monitoringa pa ni smiselno izvajati v nedogled. Glede na pretekle izkušnje velja, da nekajletna stabilnost v okolju zadošča za potrditev nadaljnjega ohranjanja ostalin. Tako je ob stabilnosti okolja pet zaporednih let in ob odsotnosti posegov, ki bi lahko stabilnost porušili, monitoring mogoče prekiniti (Historic England 2016b, 3, 4).

45 <http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/kmtal-gradiva/Gradiva%20za%20vec%20predmetov/Skripta%20Janko%20Logar/NOSILNOST.pdf>.

9 Zaključki

Prepoznavanje in razumevanje vplivov lastnosti okolja in njihovih sprememb na različne vrste materialov tvori pomemben del načrta za dolgoročno ohranitev arheoloških ostalin *in situ*. Namen pričujoče raziskave je bil vzpostavitev izhodišč za boljše razumevanje odnosa med lastnostmi okolja in v njem ohranjenih ostalin, predvsem vplivov mehanskih obremenitev na različne zemljine in materiale, ter izpostavitve pomembnosti tega odnosa pri sprejemanju odločitev o načinu ohranjanja arheološke dediščine.

Na osnovi pregleda preteklih raziskav je bilo zaključeno, da imajo na ohranitev arheoloških ostalin največji vpliv nivo podtalnice, vlažnost, temperatura, pH vrednost, redoks potencial in aktivnost organizmov, pri čemer so omenjene lastnosti soodvisne in je njihov vpliv močno pogojen z vrsto materiala. Denimo, les je najbolj ogrožen zaradi aktivnosti organizmov, ki so pogojene z vlažnostjo tal. Propadanje kosti je močno odvisno od organizmov, vlažnosti, temperature in pH vrednosti tal. Korozija železa in brona je pogojena z vlažnostjo in kemično sestavo vode v tleh ter pH vrednostjo tal. Propadanje stekla je odvisno predvsem od prisotnosti in kemične sestave vode v tleh, medtem ko sta pri keramiki pomembni še vlažnost in temperatura (Preglednica 9.1).

Preglednica 9.1: Najpomembnejše lastnosti okolja za ohranjanje različnih materialov.

MATERIAL	LASTNOSTI OKOLJA				
	VLAŽNOST (vsebnost vode)	TALNE RAZTOPINE (kemična sestava)	TEMPERATURA	pH VREDNOST	AKTIVNOST ORGANIZMOV
LES	X				X
KOST	X	X	X	X	X
BRON	X	X		X	
ŽELEZO	X	X		X	
STEKLO		X		X	
KERAMIKA	X	X	X		

Rezultati preizkusov mehanskega obremenjevanja na zemljine in v njih zakopane preizkušance potrjujejo izrazite spremembe vlažnosti zaradi dodatnih obremenitev površine, povezavo med zgoščevanjem zemljine in premiki preizkušancev ter porast poškodb ob omejenosti premikov. Opažen je bil tudi nepredvidljiv in negativen vpliv vibracij, posebej ob uporabi zaščitnega sloja. Četudi nekoliko poenostavljeno, se rezultati merilnih lističev in makroskopskih poškodb na preizkušancih (kost, keramika, steklo) dobro ujemajo. Največ deformacij so merilni lističi zabeležili pri preizkušancih v produ v preizkusih 6, 8 in 9 ter v melju v preizkusih 5 in 6, medtem ko so bile makroskopske poškodbe preizkušancev v povprečju največje v produ v preizkusih 5, 6 in 9 ter v melju v preizkusih 5 in 6. Z nastankom največjih deformacij in poškodb v preizkusih 5, 6 in 9 sta bila potrjena negativen vpliv zaščitnega sloja in vibracij, predvsem v primeru njune kombinacije, ter negativen vpliv daljše konsolidacije zemljin. Opazili smo tudi nekaj razlik med relativno elastičnimi, polnimi ali debelostenskimi kovinskimi in koščenimi preizkušanci ter krhkimi, votlimi in tankostenskimi keramičnimi in steklenimi preizkušanci. Prvi so bili bolj podvrženi vplivu vibracij in vrsti zemljine, medtem ko je imela pri drugih največji vpliv velikost vsiljene sile.

Pričujoči rezultati ne zadoščajo za podajo zanesljivih vrednosti napetosti in deformacij, znotraj katerih so preizkušanci varni pred poškodbami. Poenostavitev izredno kompleksnih situacij nehomogene zemljine ter ravninskih meritev v večosnem napetostnem stanju na preizkušancih raznolikih geometrijskih oblik je bila enostavno prevelika. Poleg tega se je izkazalo, da ima zemljina izrazit in nepredvidljiv vpliv na meritve in obnašanje preizkušancev, za dobro razumevanje katerega bi bilo potrebnih več preizkusov. Kljub temu smo pridobili nekaj koristnih podatkov. Kovinski preizkušanci se v nobenem preizkusu niso poškodovali. Koščeni preizkušanci so sicer utrpeli raznolike manjše poškodbe, vendar so se razlomile le kosti iz arheoloških kontekstov, v preizkusu 10 ob tlačnih deformacijah -0,08 ‰ ter nateznih deformacijah 0,27 ‰. Vendar ne gre zanemariti prehoda v nelinearne deformacije pri svežih koščenih preizkušancih, pri lobanjah ob nateznih deformacijah 0,1 ‰–0,8 ‰, pri lopaticah pa pri nateznih deformacijah 0,2 ‰–0,3 ‰ ter tlačnih deformacijah -1,3 ‰. Najbolj so bili poškodovani keramični in stekleni preizkušanci. Sodobna keramika se je razlomila pri tlačnih deformacijah -0,07 ‰–-0,24 ‰ ter nateznih deformacijah 0,06 ‰–0,31 ‰, antična keramika pri tlačnih deformacijah -0,07 ‰ in prazgodovinska pri tlačnih deformacijah -0,16 ‰. Pri steklenih preizkušancih vrednosti močno nihajo, saj je do razpok in lomljenja prišlo pri tlačnih deformacijah med -0,1 ‰ in -1,31 ‰ ter nateznih deformacijah med 0,12 ‰ in 0,34 ‰ (**Preglednica 9.2**).

Preglednica 9.2: Velikost deformacij v preizkušancih ob nastanku poškodb.

PREIZKUŠANEC	POŠKODBA	TLAČNE ϵ (‰)	NATEZNE ϵ (‰)
ARHEOLOŠKA KOST	RAZLOM	-0,08	0,27
SVEŽA KOST	PREHOD V NELINEARNO OBMOČJE	-1,31	0,1–0,8
SODOBNA KERAMIKA	RAZLOM	-0,71–-0,24	0,06–0,31
ANTIČNA KERAMIKA	RAZLOM	-0,07	/
PRAZGODOVINSKA KERAMIKA	RAZLOM	-0,16	
STEKLO	RAZLOM	-0,1–-1,31	0,12–0,34

S simulacijami pridobljene deformacije zemljine ob obremenitvah površine s 23,4-tonskim tovornjakom (Avsenik 2012) so bile v zgornjem metru tal primerljive oz. so pogosto presegle na poškodovanih preizkušancih ugotovljene deformacije, v zgornjih 60 cm tal tudi ob uporabi optimalnega zaščitnega sloja. V zemljini izračunane napetosti (σ_{ZEM}) med obremenjevanjem in nastankom poškodb na preizkušancih so primerljive z napetostmi, ki jih v melju na 0,25 m povzročita težki valjar in pettonski kombajn na gosenicah ali s pnevmatikami z zračnim tlakom 1 bar, medtem ko na večjih globinah, med 0,55 m in 0,62 m, primerljive napetosti v zemljini povzročijo dvotonski traktor ter pet- in desettonski kombajn s pnevmatikami z zračnim tlakom 1–2 bara (Godwin et al. 2009, Priloga 1, 16–19).

Zbrani podatki kažejo, da je priporočljiva uporaba čim lažjih strojev, pnevmatik z nižjim tlakom, dvojnih pnevmatik in gumijastih gosenic, ki izrazito zmanjšajo prenos napetosti na ostaline (Godwin et al. 2009, 24). V zvezi z zaščitnim slojem že Avsenik (2012, 76, 124) omenja, da ob odsotnosti ostalin v zgornjih 50 cm tal zaščitni sloj morda ni smisel, saj njegova izgradnja in dodatna teža povzročita prevelike deformacije tal. Tudi v pričujoči raziskavi se je izkazalo, da lahko uporaba zaščitnega sloja povzroči več škode kot koristi. Pri načrtovanju zaščitnega sloja je treba poleg njegove lastne teže in globine ostalin upoštevati fizikalne lastnosti zemljin in v tleh prisotne vrste ostalin. Zrnastost in vlažnost zemljin namreč močno vplivata na plastičnost in nosilnost tal, medtem ko vrsta materiala in stanje ohranjenosti pogojujeta mehanske lastnosti ostalin in s tem njihov odziv na obremenitve. V izvedenih preizkusih so bili na obremenitve najbolj občutljivi keramični in stekleni preizkušanci, kar je skladno z njihovimi mehanskimi lastnostmi in votlo, izraziteje 3D geometrijsko obliko. Zanemariti ne gre niti usmerjenosti ostalin, saj Dain-Owens in sodelavci poročajo (2009, Priloga 2, 28), da so poškodbam najbolj podvržene ostaline, ki ležijo pravokotno glede na smer sile obremenjevanja.

Poleg poškodb je treba upoštevati premike preizkušancev in zgoščevanje zemljin oz. posedanje tal. Ti lahko povzročijo spremembe v okolju, kot je upad ali dvig vlažnosti, ter v stratigrafski sliki najdišča in/ali

kontekstu najdb. V naših preizkusih se je že manj stisljivi prod posedel za do 8 cm, medtem ko se je stiskanju bolj podvržen melj posedel za do 20 cm. Preizkušanci v produ so se v povprečju premaknili za 5 cm in v melju za 9 cm. Pri tem je treba resda upoštevati, da smo večino preizkusov izvedli v slabo konsolidirani zemljini, vendar sta se tudi po daljši, štirimesečni konsolidaciji obe zemljini stisnili za 5 cm, preizkušanci pa so se premaknili za 1,5–4 cm. Nadalje moramo razumeti, da je bila prostorska razporeditev zemljin in preizkušancev v preizkuševališču enakomerna in enotna. Za arheološka najdišča je značilna raznolikost v dimenzijah in prostorski razporeditvi različnih zemljin ter vrst ostalin. Tako je na najdišču pričakovati različno posedanje tal z različnimi lastnostmi (Huisman 2012, 64–66) ter s tem dodaten vpliv na stratigrafijo in/ali kontekst najdb. Poleg tega je obremenjevanje povzročilo spremembe v strukturi in vlažnosti zemljine, ki bi se lahko dolgoročno dodatno povečale. Gostejša lega trdnih delcev zemljine namreč pomeni manjšo poroznost ter s tem nižjo vlažnost in/ali omejen pretok vode v tleh. Zanimariti ne gre dejstva, da je bilo obremenjevanje enkratno. V raziskavi Goodwina in sodelavcev (2009, Priloga 1, 24) je ciklično obremenjevanje povzročilo 10-odstoten dvig napetosti v zemljini. Tako gre predvidevati, da bi ciklične obremenitve povzročile dodatne spremembe. Glede na pridobljene rezultate lahko trdimo, da so teorije o boljšem prenosu napetosti iz grobozrnate zemljine na preizkušance v primerjavi s prenosom iz fino zrnate zemljine (Sidell et al. 2004; Booth in Spandl 2009) ter o upadu vpliva obremenitev z globino ob obremenjevanju površine (Das in Sobhan 2013, 169) preveč poenostavljene za razumevanje deformiranja v tleh ohranjenih arheoloških ostalin. Upoštevati moramo namreč vse dejavnike okolja, fizikalne lastnosti zemljin ter lastnosti prisotnih materialov. Dejansko razumevanje posledic obremenjevanja površine tal nad arheološkim najdiščem tako zahteva kompleksno predhodno študijo z uporabo na najdišču prisotnih zemljin in ostalin ter simulacije ali/in izvedbo fizičnih preizkusov.

Z metodološkega stališča so bili izvedeni preizkusi omejeni in razmeroma zahtevni, a ponovljivi in primerni za prispevek k boljšemu razumevanju posledic mehanskih obremenitev na v tleh prisotne arheološke ostaline. Pridobljeni so bili uporabni podatki, primerljivi z drugimi raziskavami mehanskih obremenitev arheoloških ostalin. Omejitve metodologije so predvsem v odsotnosti zadostne konsolidacije zemljine, s kovinskim okvirjem omejenem območju obremenjevanja, težavah nadzorovanja namerne spremembe vlažnosti tal ter v merjenju deformacij z merilnimi lističi na majhnem delu preizkušanca. Glede na to, da so bili kljub temu pridobljeni oprijemljivi rezultati, bi bilo metodologijo z nekaj prilagoditvami mogoče nadalje uporabiti za tovrstne raziskave ali neposreden nadzor vpliva mehanskih obremenitev na najdišče. Za to bi bil potreben predvsem daljši časovni okvir, ki bi omogočil boljšo predhodno konsolidacijo zemljin ter večje dimenzije preizkuševališča oz. nadomestitev kovinske celice z denimo terenskimi izkopi sond in njihovo uporabo kot preizkuševališča. To bi pripomoglo tudi k primerljivosti rezultatov z dejanskimi razmerami na terenu. Težavo merilnih lističev bi bilo mogoče rešiti z njihovim večjim številom in namestitvijo na različne dele preizkušancev. Poudariti velja, da so bili merilni lističi uporabljeni na povsem nevsakdanji način. Ker so bili obdani z zemljino, je bil v meritvah prisoten šum, ki pa ni onemogočil pridobitve razumljivih in smiselnih rezultatov. Prav tako so se za uporabne in zanesljive izkazali merilci vlažnosti in temperature. In četudi slednji v kontekstu pričujoče raziskave ne kažejo izrazito uporabnih podatkov, bi bili dolgoročno in v primeru terenske raziskave zagotovo koristni.

Vprašanje, ali je arheološke ostaline *in situ* mogoče ohraniti nepoškodovane tudi ob dodatnih obremenitvah površine oz. kdaj in v kakšnih pogojih, zaenkrat ostaja odprto. Za zanesljiv odgovor bi bilo potrebnih več preizkusov, predvsem z večjim številom ponovitev, ob dodatnih spremembah pogojev v preizkuševališču in načina obremenjevanja ter z vpeljavo preiskav na terenu. Gotovo je, da so obremenitve povzročile izrazite spremembe vlažnosti in strukture zemljine, njeno posedanje ter nezanemarljive premike in poškodbe preizkušancev. Poleg tega so bile deformacije in v zemljini izračunane napetosti ob nastanku poškodb v preizkušancih podobne deformacijam tal, ki jih povzroči tovrstni tovornjak, ter napetostim v tleh, ki nastanejo ob uporabi kmetijske mehanizacije.

Namen raziskave ni bil ponuditi hitre in enostavne odgovore na vprašanja, zakaj, kaj, kdaj in kako varovati arheološke ostaline *in situ*, temveč preučiti vplive mehanskih obremenitev na različne artefakte. Odločanje

o ohranjanju ostalin *ex* ali *in situ* je namreč izjemno kompleksno in močno odvisno od okoliščin posameznega primera.

Odločitev o varovanju ostalin *in situ* zahteva jasno družbeno, strokovno in ekonomsko utemeljitev. S fizično-tehničnega vidika je za strokovno utemeljitev varovanja *in situ* potrebno predvsem natančno razumevanje stanja ohranjenosti ostalin in lastnosti okolja določenega najdišča skozi daljše časovno obdobje. Dolgoročna ohranitev ostalin bo namreč pogojena z ravnovesjem med okoljem in prisotnimi arheološkimi materiali, ki bodo v nasprotnem primeru pospešeno propadali (Smit, van Heeringen, Theunissen 2006, 19–25). Poleg trenutno ugodnih pogojev na najdišču mora utemeljitev za *in situ* varovanje vsebovati oceno groženj, ki bi lahko povzročile neposredne poškodbe in s spremembo pogojev v okolju pospešile procese propadanja, zmanjšale ostalinam pripisan pomen ter razvrednotile vzpostavljeni varstveni režim. Zato je treba oceniti vplive naravnih in človekovih aktivnosti na območju z ohranjenimi ostalinami ali v njegovi neposredni okolici ter predvideti ukrepe za njihovo zamejitev. Ocena vplivov pa ni pomembna zgolj pri neposrednih posegih v tla, kot so izkopi, temeljenje in pilotiranje, temveč tudi pri aktivnostih, ki minimalno ali sploh ne posegajo v tla, npr. pri izgradnji nasipov in nadaljnji rabi prostora ter pri intenzivnem kmetovanju. Pri tem sta ključna predvsem mehanski in geokemični vidik, saj lahko zaradi mehanskih obremenitev in uporabe kemično reaktivnih snovi pride do zgoščevanja in posedanja tal, spremembe vodnega režima in arheološkim materialom neugodne kemične sestave tal. Ob dopustitvi aktivnosti na obravnavanem najdišču ali v njegovi neposredni okolici morajo biti s pomočjo monitoringa zagotovljeni spremljanje in vrednotenje vplivov aktivnosti ter mehanizmi za posredovanje ob spremembah, ki bi lahko pospešile propad ostalin. Ker procesov propadanja ni mogoče povsem ustaviti, temveč jih lahko zgolj upočasnimo, je potreben časovni okvir oz. ocena, kako dolgo je določene ostaline mogoče ohranjati *in situ* brez prevelikih izgub arheoloških informacij (Huisman 2009, 181).⁴⁶

Za sprejetje utemeljene odločitve o varovanju določenih ostalin *in situ* je torej potrebno izredno premišljeno in vsakemu posameznemu najdišču prilagojeno načrtovanje s številnimi dodatnimi raziskavami, ob izvedbi pa še dolgoročni monitoring okolja, posebej ob nestabilnih pogojih in aktivni rabi prostora (Historic England, 2016). Če želimo ostaline resnično ohraniti *in situ*, bo treba s sodelovanjem med različnimi strokami dodatno razviti konservatorske procese in strategije, ki bodo omogočale prilagajanje danes standardnih konservatorskih načrtov in načrtov upravljanja temu namenu. Pri tem moramo razmisliti o ustrezno usposobljenem osebju, ki ga kompleksnost in multidisciplinarnost pristopa zahteva tako za načrtovanje celotnega procesa kot za njegovo izvedbo.

46 Huisman pravi, da bi moralo biti ohranjanje *in situ* omejeno na podlagi časovne lestvice človekovega življenja, denimo na generacijo.

10 Viri in literatura

- Allegretta, I. et al. 2015 Strength of kaolinite-based ceramics: Comparison between limestone- and quartz-tempered bodies. - *Applied Clay Science*, 116–117, 220–230.
- Ardito, A. J. 1994 Reducing the effects of heavy equipment compaction through in situ archaeological site preservation. - *Antiquity*. - Cambridge University Press 68(261), 816–820.
- Bishop, A. W. et al. 1960 Factors controlling the strength of partly saturated cohesive soils. - *Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils*, 502–532.
- Campbell, G., Moffat, L. in Straker, V. 2011 *Environmental Archaeology: A guide to the theory and practice of methods, from sampling and recovery to post-excavation*. 2nd Edition. - Portsmouth, English Heritage.
- Clarke, B. 2008 Normal Bone Anatomy and Physiology. - *Clinical Journal of the American Society of Nephrology* 3(Suppl 3), 131–139.
- Currey, J. D. 2002 *Bones: structure and mechanics*. - Princeton University Press.
- Das, B. M. in Sobhan, K. 2013 *Principles of geotechnical engineering*. - Stamford, Cengage Learning.
- Davidson, D. A. in Wilson, C. A. 2006 *An assessment of potential soil indicators for the preservation of Cultural Heritage*. - Stirling, School of Biological and Environmental Science, University of Stirling.
- Fernández-Navarro, J. in Villegas, M. 2013 What is Glass?: An Introduction to the Physics and Chemistry of Silicate Glasses. - V: Janssens (ur.) *Modern Methods for Analysing Archaeological and Historical Glass*. - Chichester, John Wiley & Sons, 1–22.
- Fratzl, P. in Weinkamer, R. 2007 Nature's hierarchical materials. - *Progress in Materials Science* 52(8), 1263–1334.
- Freestone, I. 2001 Post-depositional changes in archaeological ceramics and glasses. - V: Brothwell, D. R. in Pollard, A. M. (ur.) *Handbook of archaeological sciences*. - Chichester, John Wiley & Sons, 615–625.
- French, C. A. I. 2003 *Geoarchaeology in action: studies in soil micromorphology and landscape evolution*. - London, Psychology Press.
- Gaberc, A. et al. 2004 PRVE IZKUŠNJE Z UPORABO DILATOMETRA V SLOVENIJI. - *Proceedings of 4th conference of the Slovenian geotechnical society, Rogaška Slatina, June 2004*. - Rogaška Slatina, 165–174.
- Gordon, C. C. in Buikstra, J. E. 1981 Soil pH, Bone Preservation, and Sampling Bias at Mortuary Sites. - *American Antiquity* 46(3), 566–571.
- Hanžič, L. A., Ivanič, A. in Mautinger, A. 2008 *Inženirski materiali – Praktikum za laboratorijske vaje*. - Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo.
- Hazen, A. 1892 *Some Physical Properties of Sand and Gravel, with Special Reference to their Use in Filtration*. - Massachusetts State Board of Health, 24th Annual Report.
- Historic England 2016a Appendix 2 -Preservation Assessment Techniques. - *Preserving Archaeological Remains*. - Swindon, Historic England.
- Historic England 2016b Appendix 4 – Water Monitoring for Archaeological Sites Monitoring redox at Brooksby Quarry in a flow-through cell. - *Preservation Archaeological Remains*. - Swindon, Historic England.
- Historic England 2016c *Preserving Archaeological Remains*. - Swindon, Historic England.
- Hughes, R. 1999 The development of capping technologies for the in situ preservation of archaeological sites. - *European Association of Archaeologist 5th Annual Meeting*. - Bournemouth, UK.
- Huisman, D. J. 2009 *Degradation of Archaeological Remains*. - Den Haag, Netherlands, Sdu Uitgevers.
- Huisman, D. J. 2012 Deep Impact: What Happens When Archaeological Sites are Built on? - *Conservation and Management of Archaeological Sites* 14(1–4), 60–71.
- Hunaidi, O. 2000 How Traffic Generates Vibration. - *Construction Technology Update* 39, 1–6.
- Ivanc, T. et al. 2012 *Varstvo nepremicne kulturne dediščine: pravna ureditev*. - Maribor, De Vesta.
- Jones, M. 2013 Assessment of preservation – Wooden remains. - V: Brunning, R. (ur.) *Somerset's Peatland Archaeology*. - Oxford, Oxbow Books, 31–33.
- Kars, H. in Smit, A. 2003 Handleiding Fysiek Behoud Archeologisch Erfgoed. Degradatiemechanismen in sporen en materialen. Monitoring van de conditie van het bodemarchief. - *Geoarchaeological and Bioarchaeological Studies* 1.

- Kato, N. et al. 1997 Estimation of Young's modulus in swine cortical bone using quantitative computed tomography. - *Bulletin (Hospital for Joint Diseases) (New York, NY)* 57(4), 183–186.
- Kilikoglou, V. et al. 1998 MECHANICAL PERFORMANCE OF QUARTZ-TEMPERED CERAMICS: PART I, STRENGTH AND TOUGHNESS. - *Archaeometry* 40(2), 261–279.
- Kladnik, R. 1989 *Visokošolska fizika: Mehanski in toplotni pojavi*. - Državna založba Slovenije.
- Lemajič, G. 2001 *Steklo*. - *Priročnik 1*. - Ljubljana, Skupnost muzejev Slovenije.
- Leskovar, T. 2014 Ocena fizičnega stanja arheološkega najdišča v sistemu varstva. - *Arheo*, 83–91.
- Lipe, W. D. 1996 In Defense of Digging: Archeological Preservation as a Means, Not an End. - United States. National Park Service. Cultural Resources.
- Martens, V. V. 2011 Environmental monitoring and in situ preservation of urban archaeological deposits. An information resource and a preservation challenge. - *Suomen Keskiajan Arkeologian Seura—Sällskapet för Medeltidsarkeologi i Finland* 2, 5–10.
- Mathewson, C. C., Gonzalez, T. in Eblen, J. S. 1992 *Burial as a method of archaeological site protection*. - Austin, Texas A&M University.
- Membery, S. 2008 Is in-situ preservation always the right strategy, or are flexible approaches beneficial to both developer and archaeologist. - *Geoarchaeological and Bioarchaeological Studies* 10, 311–316.
- Milič, Z. 2001 KONSERVIRANJE IN RESTAVRIRANJE ŽELEZA. - *Priročnik 1*. - Skupnost muzejev Slovenije, 1–12.
- Misiewicz, P. A., Richards, T. E., Hann, M. J., Godwin, R. J. 2008 Techniques for estimating contact pressure resulting from loaded agricultural tyres - *American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting 2008*. - St. Joseph, Michigan, USA, American Society of Agricultural and Biological Engineers, 1–8.
- Pal, S. 2014 Mechanical properties of biological materials. - in *Design of Artificial Human Joints & Organs*. - Springer, 23–40.
- Potts, D. T. 2012 *A companion to the archaeology of the ancient Near East*. - Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons.
- Reilly, D. T. in Burstein, A. H. 1975 The elastic and ultimate properties of compact bone tissue. - *Journal of Biomechanics* 8(6), 393–405.
- Ribič, K. 2016 *Primerjava rezultatov nateznega preizkusa za preizkušance iz zlitinskih materialov*. - *Kemijska tehnologija*. - Univerza v Mariboru.
- Smit, A. M., Van Heeringen, R. M. in Theunissen, E. 2006 *Archaeological Monitoring Standard: Guidelines for the non-destructive recording and monitoring of the physical quality of archaeological sites and monuments*. - Amersfoort, National Service for Archaeology, Cultural Landscape and Built Heritage.
- Stanek, M. in Turk, G. 2008 *Osnove mehanike trdnih teles*. - Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- Šubic Prislan, J. 2001 KERAMIKA. - *Priročnik 1*. - Ljubljana, Skupnost muzejev Slovenije.
- Tawfiq, K., Mtenga, P. in Sobanjo, J. 2010 Effect of Construction Induced Vibrations on Green Concrete in Drilled Shafts. - *Journal of Materials in Civil Engineering* 22(6), 637–642.
- Terzaghi, K., Peck, R. B. in Mesri, G. 1996 *Soil mechanics in engineering practice*. - John Wiley & Sons.
- Willems, W. J. H. 2008 Archaeological resource management and preservation. - *Geoarchaeological and Bioarchaeological Studies* 10, 283–289.
- Willems, W. J. H. 2012 Problems with preservation in situ. - *Analecta Praehistorica Leidensia* 43(44), 1–8.
- Williams, M. D. in Ostrom, M. 2000 Oxygenation of anoxic water in a fluctuating water table system: an experimental and numerical study. - *Journal of Hydrology*. - Elsevier 230(1–2), 70–85.
- Zimmerman, L. J., Vitelli, K. D. in Hollowell-Zimmer, J. 2003 *Ethical issues in archaeology*. - Walnut Creek, Altamira Press.
- <http://dk.mors.si/Dokument.php?id=132&lang=slv>.
- <http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/kmtal-gradiva/Gradiva%20za%20vec%20predmetov/MT%20-%20EDOMETER.pdf>.
- <http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/kmtal-gradiva/Gradiva%20za%20vec%20predmetov/MT%20-%20FIZIKALNE%20LASTNOSTI.pdf>.
- <http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/kmtal-gradiva/Gradiva%20za%20vec%20predmetov/Skripta%20Janko%20Logar/TER-ENSKE%20PREISKAVE.pdf>.
- <http://gcs.gi-zrmk.si/Svetovanje/Clanki/Grobovsek/PT155.htm>.
- <http://imechanica.org/files/handout10.pdf>.
- <http://soundboardmaterial.pbworks.com/f/ch5-Mechanical-Properties-of-Wood%20updated.pdf>.
- <http://web.uta.edu/faculty/ricard/Courses/KINE-3301/Notes/Lesson-14.html>.
- <http://www.alcu.si/dokumenti/alcu-barvne-kovine-prodajni-katalog.pdf>.
- <http://www.alubra.com/pdf/catalog.pdf>.
- <http://www.decagon.com/products/soils/volumetric-water-content-sensors/10hs-soil-moisture-large-area-of-influence/>.

http://www.engineeringtoolbox.com/poissons-ratio-d_1224.html.
<http://www.lesarska.sclj.si/images/Obvestila/2014/8-MEHANSKE-L-L.pdf>.
http://www.lesena-gradnja.si/html/img/pool/Fizikalno-tehnolo_ke_zan_ilnosti_lesa.pdf.
<http://www.metu.edu.tr/~rgurbuz/Courses/MetE206.pdf>.
http://www.omega.com/techref/pdf/StrainGage_Measurement.pdf.
<http://www.zag.si/ajax/DownloadHandler.php?file=1553>.
<http://www.zag.si/ajax/DownloadHandler.php?file=1561>.
<https://gradbenik.files.wordpress.com/2010/01/1-fizikalne-lastnosti-zemljini.pdf>.
<https://www.britannica.com/>.
<https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Mechanical/StressStrain.htm>.
www.zag.si/ajax/DownloadHandler.php?file=1557.

11 Priloge

A	Priloga – preizkus 1
B	Priloga – preizkus 2
C	Priloga – preizkus 3
Č	Priloga – preizkus 4
D	Priloga – preizkus 5
E	Priloga – preizkus 6
F	Priloga – preizkus 7
G	Priloga – preizkus 8
H	Priloga – preizkus 9
I	Priloga – preizkus 10
J	Priloga – povzetek metodologije porušnih preiskav
K	Priloga – premiki in poškodbe preizkušancev v preizkusih 4–9
L	Priloga – primerjava rezultatov
M	Priloga – geotehnični podatki

A. PRILOGA – Preizkus 1

Preglednica A.1: Povzetek namestitve preizkušancev v preizkusu 1.

PLAST	VIŠINA NAMESTITVE	LEGA	PREIZKUŠANEC	IZVOR
melj	57 cm	navpična	LE-KO-1	arheološki
melj	55 cm	navpična	LE-KO-2	arheološki
melj	57 cm	navpična	LE-DE-1	arheološki
melj	54 cm	navpična	LE-DE-2	arheološki
melj	71,5 cm	vodoravna	LE-DE-3	arheološki
melj	72,5 cm	vodoravna	LE-DE-4	arheološki
melj	73,5 cm	vodoravna	LE-DE-5	arheološki
melj	73,5 cm	vodoravna	LE-DE-6	arheološki
melj	73,5 cm	vodoravna	LE-DE-7	arheološki
melj	73,5 cm	vodoravna	LE-DE-8	arheološki

Preglednica A.2: Vlažnost pred, med, ob koncu ter po preizkusu 1.

MERILEC	PRED	MED	OB KONCU	PO PREIZKUSU
MV 1 (mV)	953	988	991	963
MV 2 (mV)	907	952	978	957
MT 1 (°C)	19,4	19,4	19,4	19,4
MT 2 (°C)	19,2	19,2	19,2	19,2

Preglednica A.3: Napetosti na opazovanih globinah v preizkusu 1.

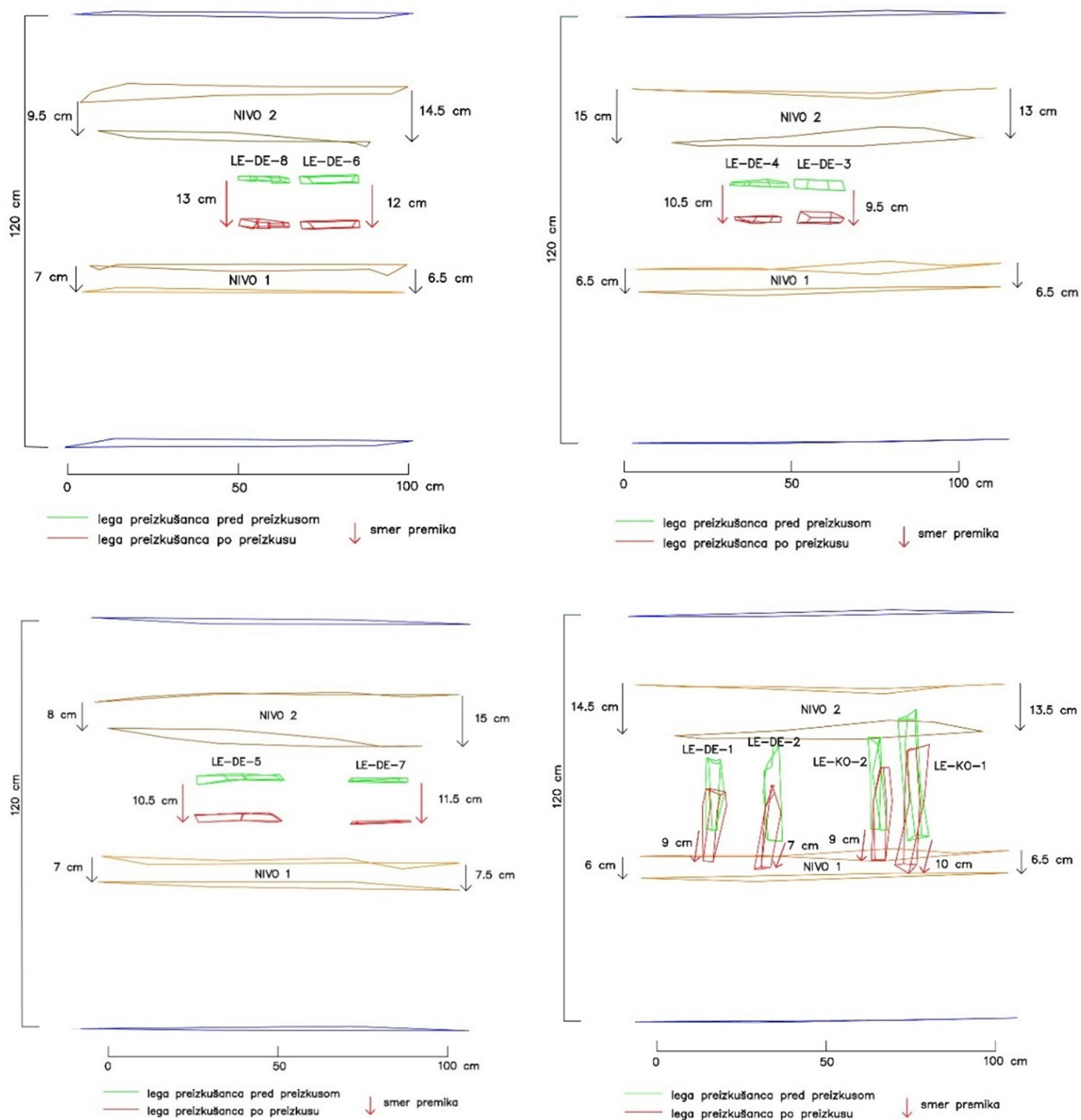
PREIZKUS	PRED (kN/m ²)		SPREMEMBA (kN/m ²)				MAX (kN/m ²)	
	PROD	MELJ	Δ PROD	%	Δ MELJ	%	PROD	MELJ
1	0	8,2	0	0	69,9	89,5	0	78,1

Preglednica A.4: Posedanje plasti v preizkusu 1.

PREIZKUS	PROD	MELJ
1	6–7,5 cm	8–15 cm

Preglednica A.5: Premiki preizkušancev v preizkusu 1.

PREIZKUŠANEC	LEGA	PREMIKI		POŠKODBE	
		razdalja	smer	vrsta	stopnja
LE-DE-1	N	9 cm	vstran navzdol	rahlo povečanje obstoječih razpok	2
LE-DE-2	N	7 cm	vstran navzdol	povečanje obstoječih razpok, luščenje vrhnje plasti	4
LE-KO-1	N	10 cm	vstran navzdol	povečanje obstoječih razpok, razlom	2
LE-KO-2	N	9 cm	vstran navzdol	povečanje obstoječih razpok, odlomljen rob	2
LE-DE-3	V	9,5 cm	naravnost navzdol	povečanje obstoječih razpok, odlomljen rob	1
LE-DE-4	V	10,5 cm	naravnost navzdol	rahlo povečanje obstoječih razpok	2
LE-DE-5	V	10,5 cm	naravnost navzdol	povečanje obstoječih razpok, luščenje vrhnjih plasti	1
LE-DE-6	V	12 cm	naravnost navzdol	luščenje vrhnje plasti, odlomljen rob, povečanje obstoječih razpok, nastanek drobnih razpok	2
LE-DE-7	V	11,5 cm	naravnost navzdol	povečanje obstoječih razpok, luščenje vrhnjih plasti, odlomljen rob	2
LE-DE-8	V	13 cm	naravnost navzdol	rahlo povečanje obstoječih razpok, luščenje vrhnjih plasti	1



Slika A.1: Shematski prikaz premikov preizkušancev v preizkusu 1.

B. PRILOGA – Preizkus 2

Preglednica B.1: Povzetek namestitve preizkušancev v preizkusu 2.

PLAST	VIŠINA NAMESTITVE	LEGA	PREIZKUŠANEC	IZVOR
melj	54 cm	navpična	LE-KO-1	arheološki
melj	54 cm	navpična	LE-KO-4	arheološki
melj	67 cm	navpična	LE-DE-1	arheološki
melj	61 cm	navpična	LE-DE-12	arheološki
melj	68,5 cm	vodoravna	LE-DE-5	arheološki
melj	69 cm	vodoravna	LE-DE-6	arheološki
melj	68 cm	vodoravna	LE-DE-11	arheološki

Preglednica B.2: Vlažnost pred, med, ob koncu ter po preizkusu 2

MERILEC	PRED	MED	OB KONCU	PO PREIZKUSU
MV 1 (mV)	924	985	969	965
MV 2 (mV)	995	1013	971	963
MT 1 (°C)	18,8	18,8	18,8	18,8
MT 2 (°C)	18,6	18,6	18,6	18,7

Preglednica B.3: Napetosti na opazovanih globinah v preizkusu 2.

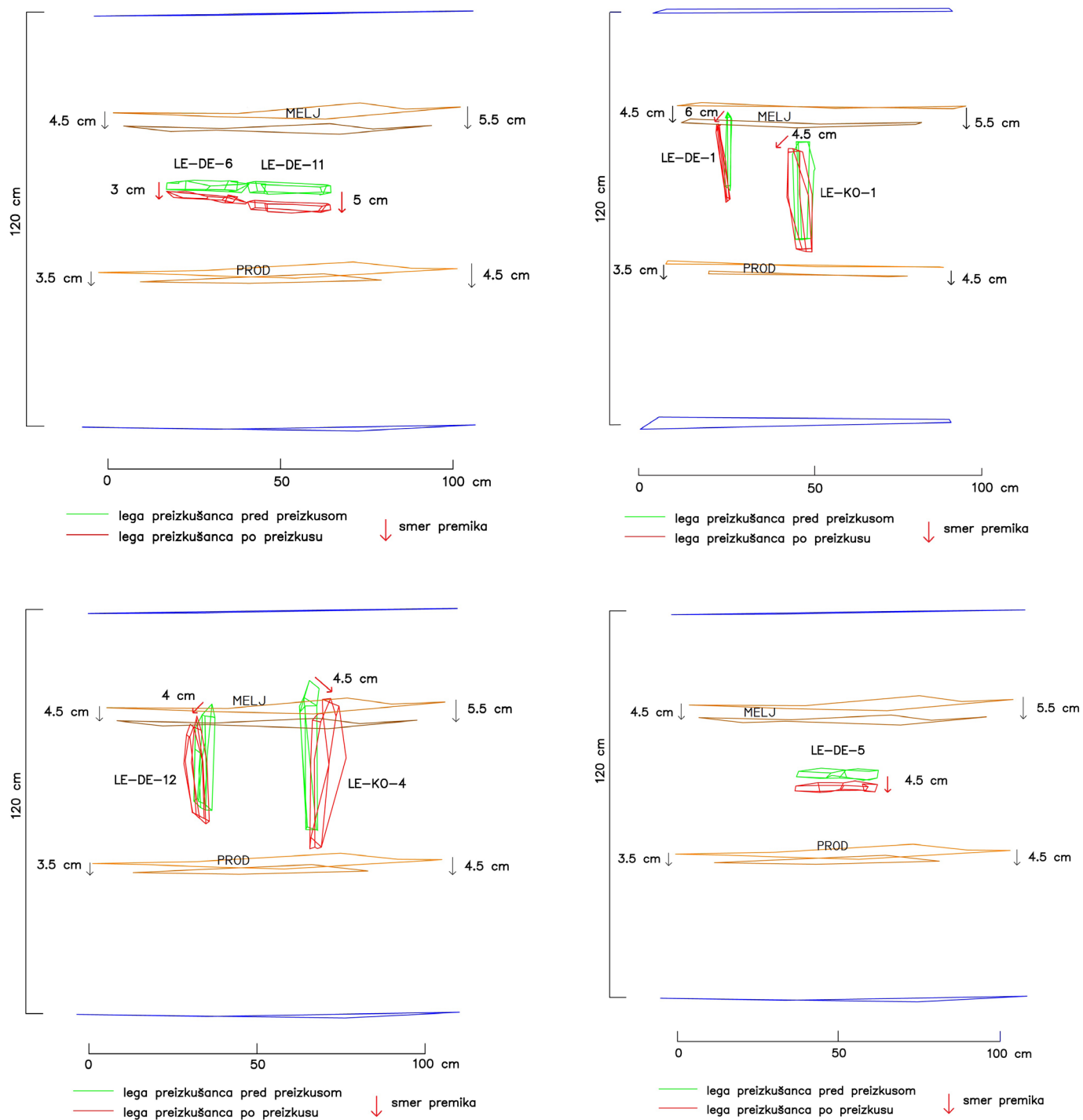
PREIZKUS	PRED (kN/m ²)		SPREMEMBA (kN/m ²)				MAX (kN/m ²)	
	PROD	MELJ	Δ PROD	%	Δ MELJ	%	PROD	MELJ
2	0	8,7	0	0	55,9	86,5	0,00	64,6

Preglednica B.4: Posedek plasti v preizkusu 2.

PREIZKUS	PROD	MELJ
1	3–4,5 cm	4,5–5,5 cm

Preglednica B.5: Premiki in poškodbe preizkušancev v preizkusu 2.

PREIZKUŠANEC	LEGA	PREMIKI		POŠKODBE	
		razdalja	smer	vrsta	stopnja
LE-DE-1	N	6 cm	vstran navzdol	povečanje obstoječih razpok, luščenje vrhnjih plasti	2
LE-DE-12	N	4 cm	vstran navzdol	povečanje obstoječih razpok, odlomljen rob	1
LE-KO-1	N	4,5 cm	vstran navzdol	povečanje obstoječih razpok, odlomljen rob	1
LE-KO-4	N	4,5 cm	vstran navzdol	povečanje obstoječih razpok, odlomljen rob, luščenje površine	2
LE-DE-5	V	4,5 cm	naravnost navzdol	rahlo povečanje obstoječih razpok, odlomljen rob	1
LE-DE-6	V	3 cm	naravnost navzdol	povečanje obstoječih razpok, nastanek številnih drobnih razpok	3
LE-DE-11	V	5 cm	naravnost navzdol	odlomljen rob	1



Slika B.1: Shematski prikaz premikov preizkušancev v preizkusu 2.

Preglednica C.1: Povzetek namestitve preizkušancev v preizkusu 3.

PLAST	VIŠINA NAMESTITVE	LEGA	PREIZKUŠANEC	IZVOR
melj	52 cm	navpična	LE-KO-2	arheološki
melj	52 cm	navpična	LE-KO-4	arheološki
melj	53,5 cm	navpična	LE-DE-12	arheološki
melj	56,5 cm	navpična	LE-DE-15	arheološki
melj	66,5 cm	vodoravna	LE-DE-5	arheološki
melj	67 cm	vodoravna	LE-DE-16	arheološki
melj	66,5 cm	vodoravna	LE-DE-17	arheološki
melj	67,4 cm	navpična	ST-KO-6	sodobni
melj	67,6 cm	navpična	KE-SK-6	sodobni

Preglednica C.2: Vlažnost pred, med, ob koncu ter po preizkusu 3.

MERILCI	PRED	MED	OB KONCU	PO PREIZKUSU
MV 1 (mV)	915	949	985	968
MV 2 (mV)	990	1010	110	978
MT 1 (°C)	18,6	18,6	18,6	18,6
MT 2 (°C)	18,3	18,3	18,4	18,3

Preglednica C.3: Napetosti na opazovanih globinah v preizkusu 3.

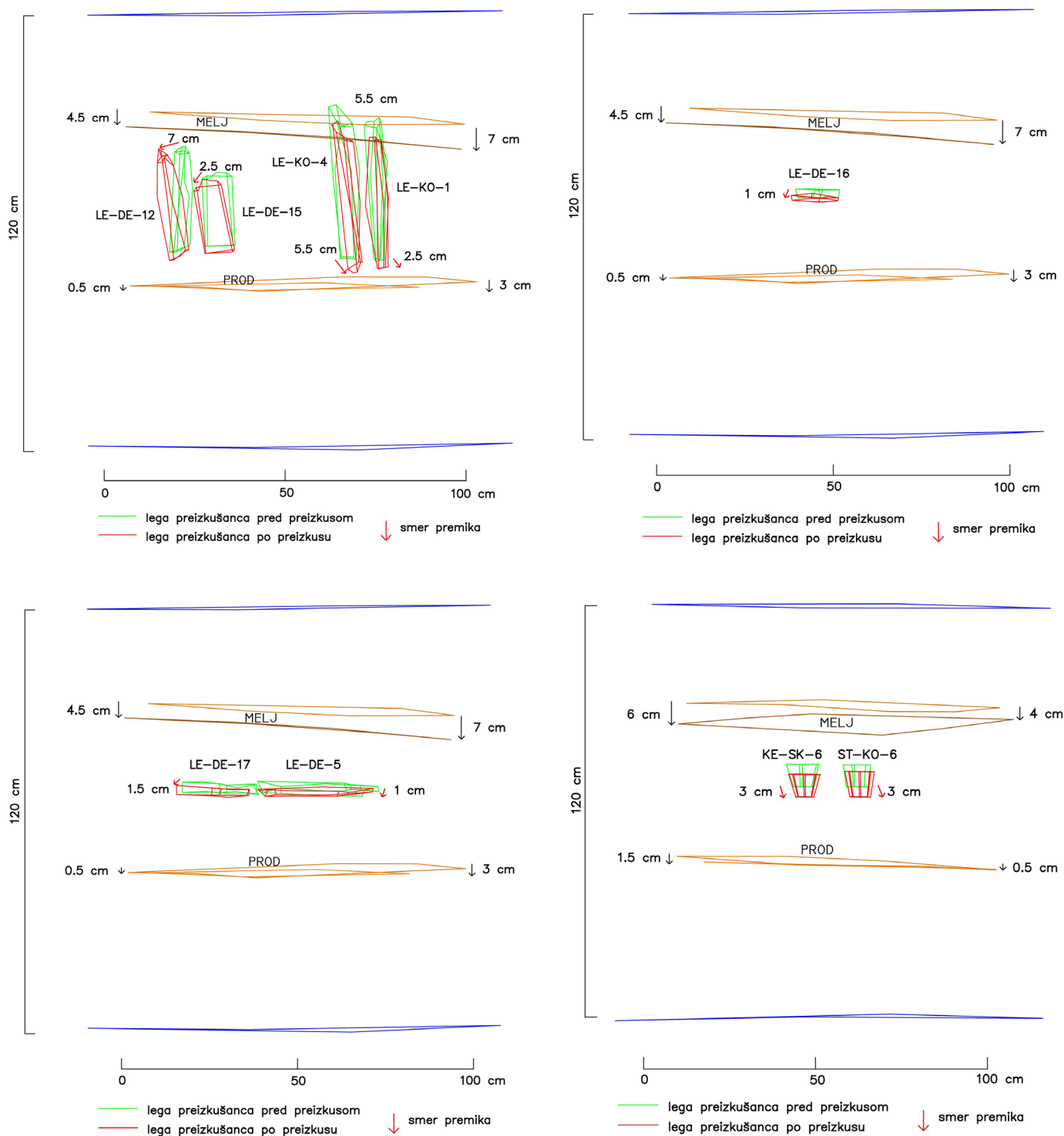
PREIZKUS	PRED (kN/m ²)		SPREMENBA (kN/m ²)				MAX (kN/m ²)	
	PROD	MELJ	Δ PROD	%	Δ MELJ	%	PROD	MELJ
3	0	8,7	0	0	27,7	76,1	0	36,4

Preglednica C.4: Posedanje plasti v preizkusu 3.

PREIZKUS	PROD	MELJ
3	0,5–3 cm	4,5–7 cm

Preglednica C.5: Premiki preizkušancev v preizkusu 3.

PREIZKUŠANEC	LEGA	PREMIKI		POŠKODBE	
		razdalja	smer	vrsta	stopnja
LE-DE-12	N	7 cm	vstran navzdol		0
LE-DE-15	N	2,5 cm	vstran navzdol		0
LE-KO-2	N	2,5 cm	vstran navzdol	odlomljen rob	1
LE-KO-4	N	5,5 cm	vstran navzdol	povečanje obstoječe razpoke, odlomljen rob	2
LE-DE-5	V	1 cm	vstran navzdol		0
LE-DE-16	V	1 cm	vstran navzdol	odlomljen rob, luščenje vrhnjih plasti	1
LE-DE-17	V	1,5 cm	vstran navzdol		0
KE-SK-6	N	3 cm	vstran navzdol		0
ST-KO-6	N	3 cm	vstran navzdol		0



Slika C.1: Shematski prikaz premikov preizkušancev v preizkusu 3.

Preglednica D.1: Povzetek namestitve preizkušancev v preizkusu 4.

PLAST	VIŠINA NAMESTITVE	PREIZKUŠANEC	MERILNI LISTIČ	IZVOR
prod	31 cm	BR-PR-2	da	sodobni
prod	29,5 cm	KE-LO-1	da	sodobni
prod	29 cm	KE-PE-1	ne	arheološki
prod	30 cm	KE-TE-2	ne	arheološki
prod	29,5 cm	KO-ST-2	da	sodobni
prod	29 cm	ST-KO-2	da	sodobni
prod	29,5 cm	ZE-TE-2	da	sodobni
PLAST	VIŠINA NAMESTITVE	PREIZKUŠANEC	MERILNI LISTIČ	IZVOR
melj	70 cm	BR-PR-1	da	sodobni
melj	70 cm	KE-LO-2	da	sodobni
melj	70,5 cm	KE-PE-2	ne	arheološki
melj	69,5 cm	KE-TE-1	ne	arheološki
melj	70,5 cm	KO-ST-1	da	sodobni
melj	69,5	ST-KO-1	da	sodobni
melj	71,5 cm	ZE-TE-1	da	sodobni

Preglednica D.2: Vlažnost pred, med, ob koncu ter po preizkusu 4.

MERILCI	PRED	MED	OB KONCU	PO PREIZKUSU
MV 1 (mV)	965	989	976	959
MV 2 (mV)	975	998	995	961
MT 1 (°C)	18,9	19,9	18,9	19,9
MT 2 (°C)	19	19	19,1	19

Preglednica D.3: Napetosti na opazovanih globinah v preizkusu 4.

PREIZKUS	PRED (kN/m ²)		SPREMEMBA (kN/m ²)				MAX (kN/m ²)	
	PROD	MELJ	Δ PROD	%	Δ MELJ	%	PROD	MELJ
4	16,8	8,6	35,5	61,5	49,2	85,1	52,3	57,8

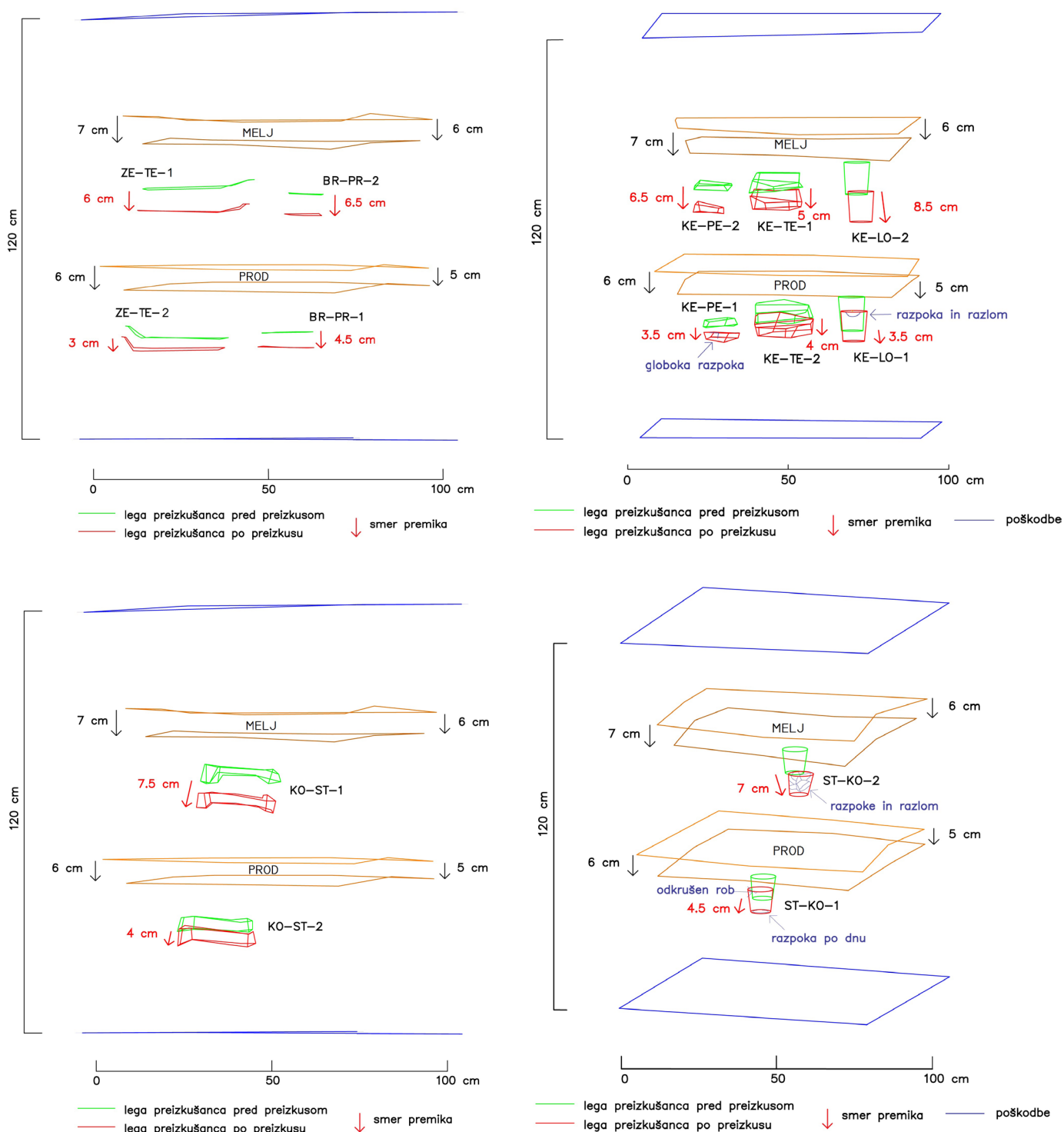
Preglednica D.4: Posedanje plasti v preizkusu 4.

PREIZKUS	PROD	MELJ
4	5–6 cm	6–7 cm

Preglednica D.5: Premiki in poškodbe preizkušancev v preizkusu 4.

PROD	PREMIKI		POŠKODBE	
PREIZKUŠANEC	razdalja	smer	vrsta	stopnja
BR-PR-1	4,5 cm	naravnost navzdol		
KE-LO-1	3,5 cm	vstran navzdol	razpoke, razlom	4
KE-PE-1	3,5 cm	naravnost navzdol	globoka razpoka	3
KE-TE-2	4 cm	naravnost navzdol		
KO-ST-2	4 cm	vstran navzdol		
ST-KO-1	4,5 cm	vstran navzdol	razpoka po dnu, odkrušen rob	2
ZE-TE-2	3 cm	naravnost navzdol		

MELJ	PREMIKI		POŠKODBE	
PREIZKUŠANEC	razdalja	smer	vrsta	stopnja
BR-PR-2	6,5 cm	naravnost navzdol		
KE-LO-2	8,5 cm	vstran navzdol		
KE-PE-2	6,5 cm	naravnost navzdol		
KE-TE-1	5 cm	naravnost navzdol		
KO-ST-1	7,5 cm	vstran navzdol		
ST-KO-2	7 cm	vstran navzdol	razpoke, razlom	4
ZE-TE-1	6 cm	naravnost navzdol		



Slika D.1: Shematski prikaz premikov in poškodb preizkušancev v preizkusu 4.

Preglednica D.6: Napetosti in deformacije železnih preizkušancev v preizkusu 4.

PROD		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje	25,6	0,105
zmanjšanje	8,3	0,034
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek	16,8	0,07
MELJ		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje	77,1	0,32
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek	68,3	0,28

Preglednica D.7: Napetosti in deformacije bronastih preizkušancev v preizkusu 4.

PROD		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje	109,7	0,82
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek	88,6	0,67
MELJ		
MAX. – OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje	-38,92	-0,29
umik	5,97	0,04
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek	-11,89	-0,089

Preglednica D.8: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije stegenice v produ v preizkusu 4.

PROD		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje minimalne	-2,13	-0,24
največje maksimalne	2,25	0,25
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek minimalnih	-2,0	-0,18
ostanek maksimalnih	0,15	0,08

Preglednica D.9: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije stegenice v melju v preizkusu 4.

MELJ		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje minimalne tlačne	-2,51	-0,25
največje minimalne natezne	11,11	0,40
največje maksimalne	16,43	1,06
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek minimalnih	11,68	0,48
ostanek maksimalnih	15,65	0,97

Preglednica D.10: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije keramičnega lončka v produ v preizkusu 4.

PROD		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje minimalne	-5,73	-0,09
največje maksimalne	5,62	0,08
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek minimalnih	-0,16	-0,01
ostanek maksimalnih	1,74	0,02

Preglednica D.11: Minimalne in maksimalne glavne napetosti keramičnega lončka v melju v preizkusu 4.

MELJ		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje minimalne	-5,03	-0,06
največje maksimalne tlačne	0,62	0,02
največje maksimalne natezne	-2,78	-0,02
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek minimalnih	-1,84	-0,02
ostanek maksimalnih	0,38	0,01

Preglednica D.12: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije steklenega nizkega kozarca v produ v preizkusu 4.

PROD		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje minimalne natezne	0,16	0,01
največje minimalne tlačne	-1,42	-0,02
največje maksimalne natezne	0,30	0,01
največje maksimalne tlačne	-0,74	-0,01
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek minimalnih	-0,53	-0,01
ostanek maksimalnih	0,51	0,01

Preglednica D.13: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije nizkega kozarca v melju v preizkusu 4.

MELJ		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
45 ° tlačne pri prvem preskoku	-5,68	-0,63
45 ° natezne pri drugem preskoku	12,32	0,19
45 ° natezne pri tretjem preskoku	3,48	0,05
-45 ° tlačne pri prvem preskoku	-5,25	-0,06
-45 ° tlačne pri drugem preskoku	-0,81	-0,02
-45 ° tlačne pri tretjem preskoku	-4,58	-0,10
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
45 ° ostanek	/	/
-45 ° ostanek	/	/

E. PRILOGA – Preizkus 5

Preglednica E.1: Povzetek namestitve preizkušancev v preizkusu 5.

PLAST	VIŠINA NAMESTITVE	PREIZKUŠANEC	MERILNI LISTIČ	IZVOR
prod	28 cm	BR-PR-5	da	sodobni
prod	29 cm	KE-PE-3	ne	arheološki
prod	28 cm	KE-SK-1	da	sodobni
prod	31 cm	KE-TE-3	ne	arheološki
prod	31 cm	KO-LO-1	da	sodobni
prod	27 cm	KO-LOB-1	da	sodobni
prod	31,5 cm	ST-SK-1	ne	sodobni
prod	28 cm	ST-VK-1	da	sodobni
prod	27,5 cm	ZE-KO-1	da	sodobni
PLAST	VIŠINA NAMESTITVE	PREIZKUŠANEC	MERILNI LISTIČ	IZVOR
melj	62 cm	BR-PR-6	da	sodobni
melj	66 cm	KE-PE-4	ne	arheološki
melj	63 cm	KE-SK-2	da	sodobni
melj	66,5 cm	KE-TE-4	ne	arheološki
melj	67 cm	KO-LO-2	da	sodobni
melj	62,5 cm	KO-LOB-2	da	sodobni
melj	68 cm	ST-SK-2	ne	sodobni
melj	64 cm	ST-VK-2	da	sodobni
melj	62 cm	ZE-KO-2	da	sodobni

Preglednica E.2: Vlažnost pred, med, ob koncu ter po preizkusu 5.

MERILEC	PRED	MED	OB KONCU	PO PREIZKUSU
MV 1 (mV)	915	984	996	974
MV 2 (mV)	892	998	976	990
MT 1 (°C)	21,1	21	20,9	20,8
MT 2 (°C)	20,3	20,2	20,2	20,1

Preglednica E.3: Delež vode v melju v preizkusu 5.

TEŽA ODVZETEGA VZORCA	TEŽA PO SUŠENJU	KOLIČINA VODE
2000 g	1630 g	22,7 %

Preglednica E.4: Napetosti na opazovanih globinah v preizkusu 5.

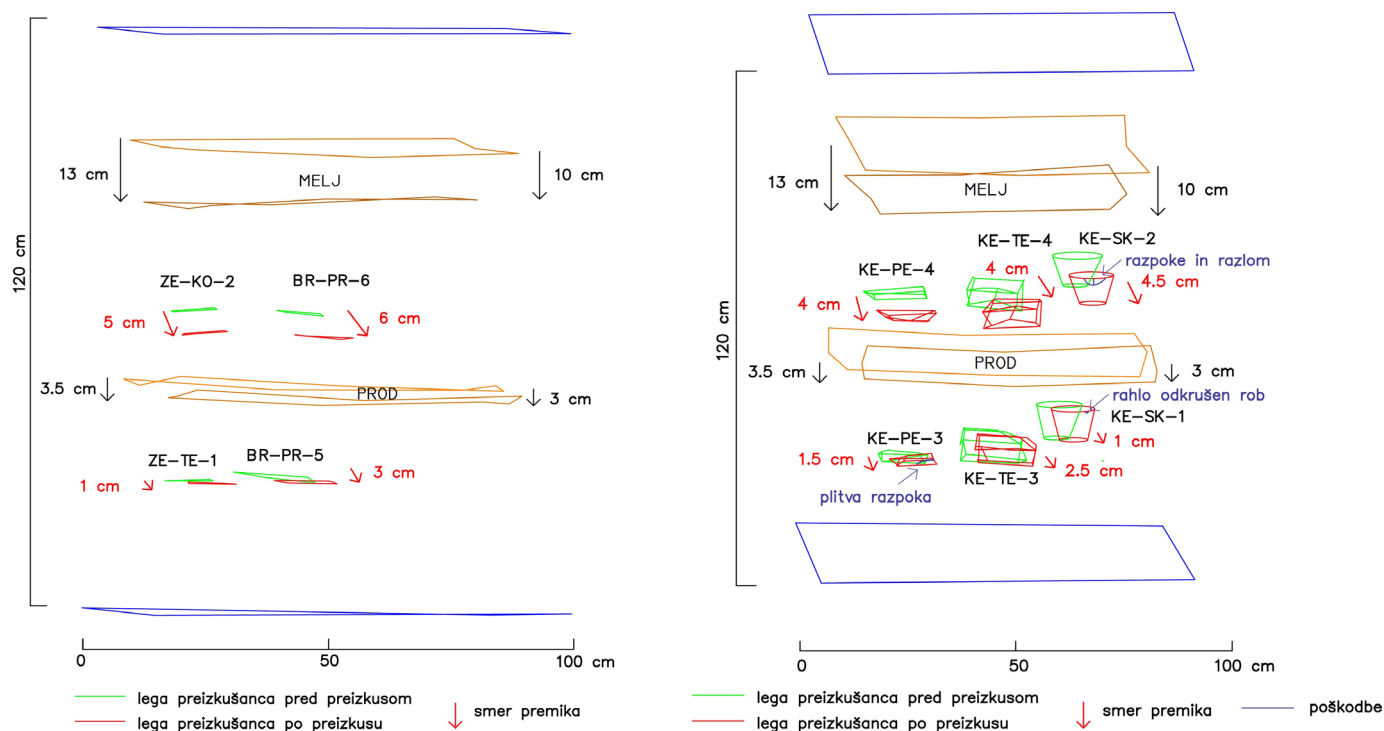
PREIZKUS	PRED (kN/m ²)		SPREMEMBA (kN/m ²)				MAX (kN/m ²)	
	PROD	MELJ	Δ PROD	%	Δ MELJ	%	PROD	MELJ
5	17,7	8,4	40,3	62,9	55,7	86,9	58,0	64,1

Preglednica E.5: Posedanje plasti v preizkusu 5.

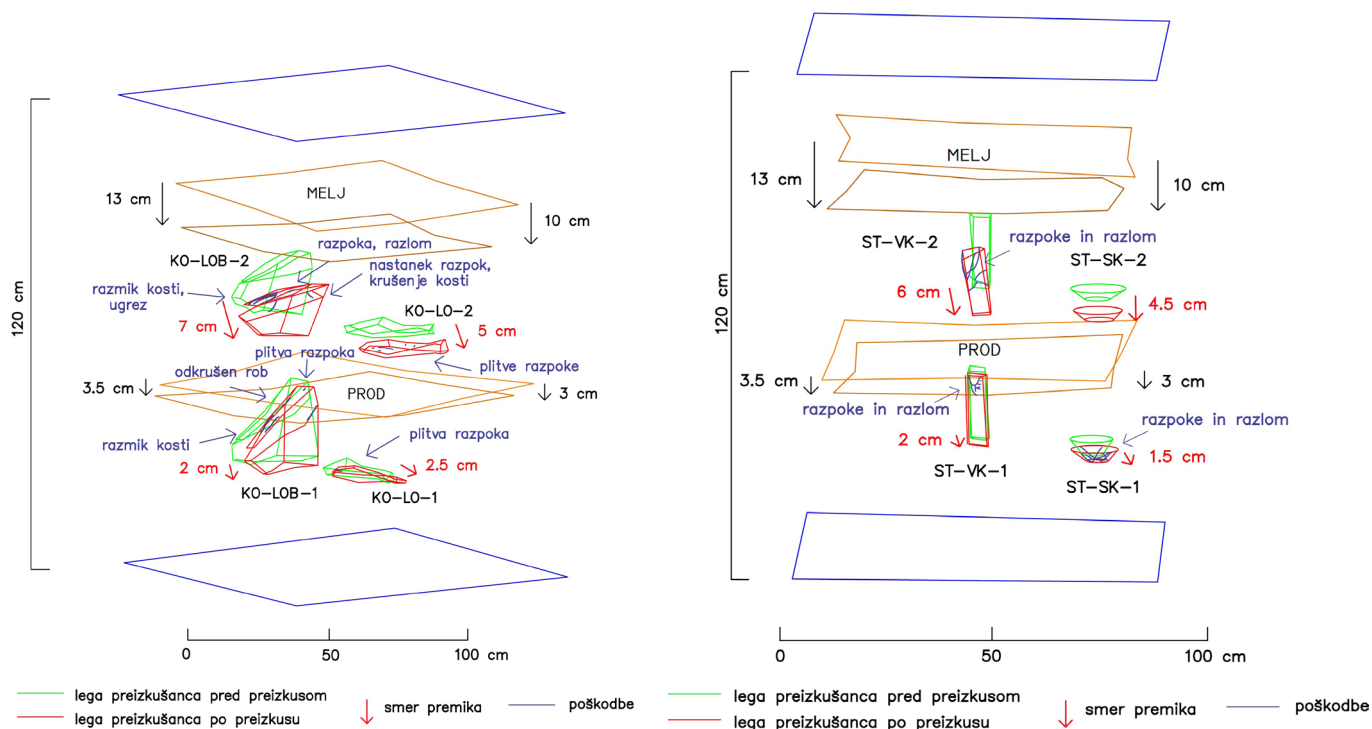
PREIZKUS	PROD	MELJ
5	3–3,5 cm	10–13 cm

Preglednica E.6: Premiki in poškodbe preizkušancev v preizkusu 5.

PROD	PREMIKI		POŠKODBE	
PREIZKUŠANEC	razdalja	smer	vrsta	stopnja
BR-PR-5	3 cm	vstran navzdol		
KE-PE-3	1,5 cm	vstran navzdol	plitva razpoka	2
KE-SK-1	1 cm	vstran navzdol	rahlo odkrušen rob	1
KE-TE-2	2,5 cm	vstran navzdol		
KO-lo-1	2,5 cm	vstran navzdol	plitva, kratka razpoka	1
ko-lob-1	2 cm	vstran navzdol	odkrušen rob, razmik, razpoka	2
ST-Sk-1	1,5 cm	vstran navzdol	razpad	5
ST-vk-1	2 cm	vstran navzdol	razpoke, razlom	4
ZE-TE-1	1 cm	vstran navzdol		
MELJ	PREMIKI		POŠKODBE	
PREIZKUŠANEC	razdalja	smer	vrsta	stopnja
BR-PR-6	6,5 cm	vstran navzdol		
KE-PE-4	4 cm	vstran navzdol		
KE-SK-2	4,5 cm	vstran navzdol	razpoke, razlom	4
KE-TE-1	4 cm	vstran navzdol		
KO-LO-2	5 cm	vstran navzdol	plitva razpoka	2
KO-LOB-2	7 cm	vstran navzdol	razmik, ugrez, razpoke, krušenje	3
ST-SK-2	4,5 cm	naravnost navzdol		
ST-VK-2	6 cm	vstran navzdol	razpoke, razlom	4
ZE-TE-2	5 cm	vstran navzdol		



Slika E.1: Shematski prikaz premikov in poškodb preizkušancev v preizkusu 5.



Slika E.1: Shematski prikaz premikov in poškodb preizkušancev v preizkusu 5.

Preglednica E.7: Napetosti in deformacije železnih preizkušancev v preizkusu 5.

PROD		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ϵ (‰)
največje	-198,8	-0,81
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ϵ (‰)
ostanek	-128,1	-0,52
MELJ		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ϵ (‰)
največje	123,0	0,50
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ϵ (‰)
ostanek	/	/

Preglednica E.8: Napetosti in deformacije bronastih preizkušancev v preizkusu 5.

PROD		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ϵ (‰)
največje	43,1	0,32
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ϵ (‰)
ostanek	29,2	0,22
MELJ		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ϵ (‰)
največje natezne	3,22	0,024
največje tlačne	-4,33	-0,033
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ϵ (‰)
ostanek	-3,26	-0,024

Preglednica E.9: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije lopatice v produ preizkusa 5.

PROD		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje minimalne tlačne	6,44	-0,11
največje minimalne natezne	22,88	0,81
največje maksimalne	34,72	2,89
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek minimalnih	-3,88	-0,38
ostanek maksimalnih	1,22	0,24

Preglednica E.10: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije lopatice v melju preizkusa 5.

MELJ		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje minimalne	-22,16	-2,41
največje maksimalne	14,4	2,01
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek minimalnih	-17,85	-1,70
ostanek maksimalnih	3,72	0,95

Preglednica E.11: Napetosti in deformacije lobanje v produ preizkusa 5.

PROD		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje	-16,48	-0,87
zmanjšanje	9,84	0,52
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek	-4,36	-0,23

Preglednica E.12: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije lobanje v melju preizkusa 5.

MELJ		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje minimalne	-90,55	-7,69
zmanjševanje minimalnih	20,45	1,7
največje maksimalne	-8,74	0,80
največje maksimalne	-1,8	2,48
zmanjševanje maksimalnih	-1,1	0,7
maksimalne na meji plastičnosti	-8,65	0,82
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek minimalnih	-47,19	-3,86
ostanek maksimalnih	-5,28	0,93

Preglednica E.13: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije lopatice v produ preizkusa 6.

PROD		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje minimalne	-5,22	-1,27
največje maksimalne	23,3	2,22
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek minimalnih	-5,97	-1,31
ostanek maksimalnih	22,06	2,15

Preglednica E.14: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije keramične skodelice v produ preizkusa 5.

PROD		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje minimalne	-7,9	-0,09
največje maksimalne tlačne	-4,17	-0,03
največje maksimalne natezne	-0,95	0,01
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek minimalnih	-3,99	-0,06
ostanek maksimalnih	4,2	0,06

Preglednica E.15: Minimalne in maksimalne normalne napetosti keramične skodelice v melju preizkusa 5.

MELJ		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
minimalne ob preskoku	-8,78	0,13
maksimalne ob preskoku	9,47	0,26
največje minimalne	-97,9	-1,18
največje maksimalne	65,24	0,84
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek minimalnih	-2,1	-0,09
ostanek maksimalnih	33,16	0,41

Preglednica E.16: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije visokega kozarca v produ preizkusa 5.

PROD		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje minimalne	-6,2	-0,1
zmanjšanje minimalnih	-1,94	-0,06
največje maksimalne	9,95	0,15
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek minimalnih	-0,01	-0,02
ostanek maksimalnih	4,63	0,07

Preglednica E.17: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije visokega steklenega kozarca v melju preizkusa 5.

MELJ		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
minimalne pri prvem preskoku	-16,92	-0,2
minimalne pri drugem preskoku	-33,44	-0,45
zmanjšanje minimalnih	-29,9	0,40
največje maksimalne natezne	0,61	0,02
maksimalne pri prvem preskoku	-14,64	-0,15
maksimalne pri drugem preskoku	-5,72	0,01
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
minimalne v času preskoka	-6,59	-0,14

Preglednica F.1: Povzetek namestitve preizkušancev v preizkusu 6.

PLAST	VIŠINA NAMESTITVE	PREIZKUŠANEC	MERILNI LISTIČ	IZVOR
prod	31 cm	BR-PR-2	da	sodobni
prod	29,5 cm	KE-PE-2	ne	arheološki
prod	31 cm	KE-SK-4	da	sodobni
prod	31,5 cm	KO-GO-2	ne	arheološki
prod	31,5 cm	KO-LO-4	da	sodobni
prod	31 cm	KO-LOB-4	da	sodobni
prod	31 cm	ST-SK-4	ne	sodobni
prod	30,5 cm	ST-VK-4	da	sodobni
prod	33 cm	ZE-TE-2	da	sodobni
PLAST	VIŠINA NAMESTITVE	PREIZKUŠANEC	MERILNI LISTIČ	IZVOR
melj	62,5 cm	BR-PR-1	da	sodobni
melj	64 cm	KE-PE-1	ne	arheološki
melj	62,5 cm	KE-SK-3	da	sodobni
melj	62,5 cm	KO-GO-1	ne	arheološki
melj	62,5 cm	KO-LO-3	ne	sodobni
melj	64,5 cm	KO-LOB-3	da	sodobni
melj	63 cm	ST-SK-3	ne	sodobni
melj	63 cm	ST-VK-3	da	sodobni
melj	61,5 cm	ZE-TE-1	da	sodobni

Preglednica F.2: Vlažnost pred, med, ob koncu in po koncu preizkusa 6.

MERILEC	PRED	MED	OB KONCU	PO PREIZKUSU
MV 1 (mV)	866	885	915	926
MV 2 (mV)	904	916	927	919
MT 1 (°C)	20,3	20,3	20,3	20,3
MT 2 (°C)	20,2	20,2	20,3	20,2

Preglednica F.3: Delež vode v melju v preizkusu 6.

TEŽA ODVZETEGA VZORCA	TEŽA PO SUŠENJU	KOLIČINA VLAGE
2000 g	1674 g	19,5 %

Preglednica F.4: Napetosti na opazovanih globinah v preizkusu 6.

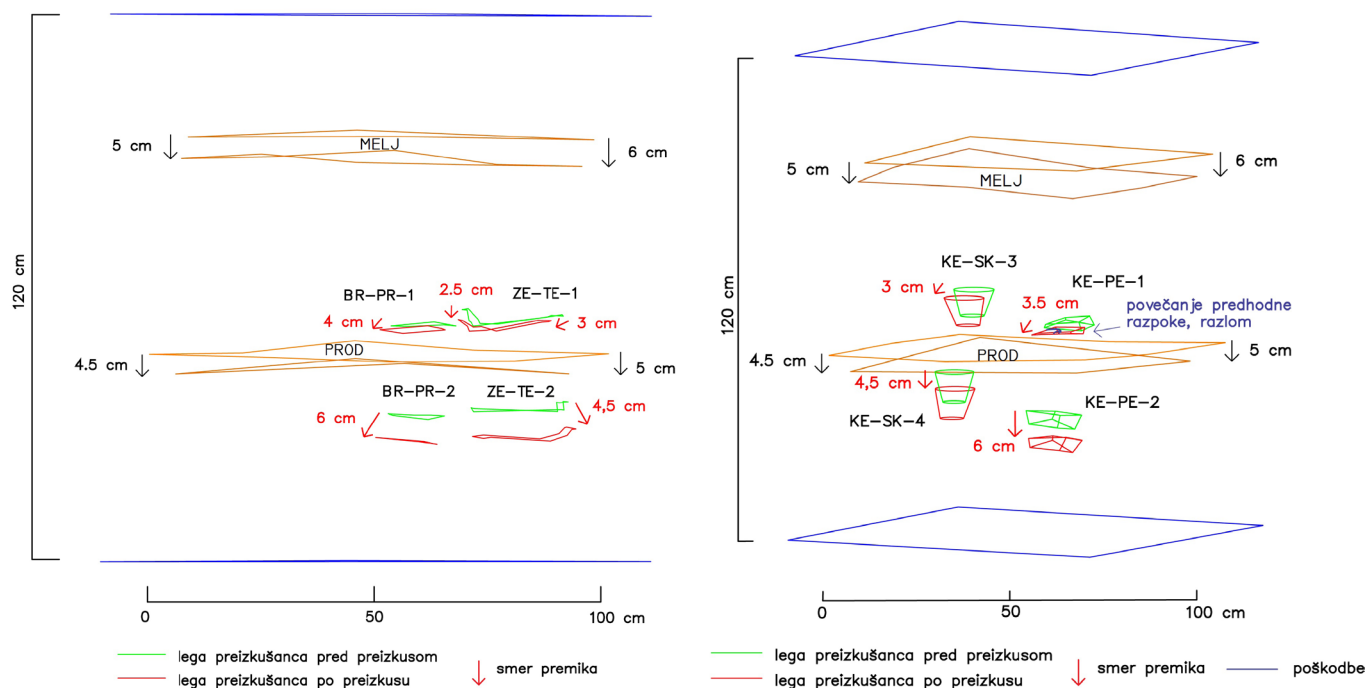
PREIZKUS	PRED (kN/m²)		SPREMEMBA (kN/m²)				MAX (kN/m²)	
	PROD	MELJ	Δ PROD	%	Δ MELJ	%	PROD	MELJ
6	16,9	8,7	22,6	58,1	30,2	77,6	39,5	38,9

Preglednica F.5: Posedanje plasti v preizkusu 6.

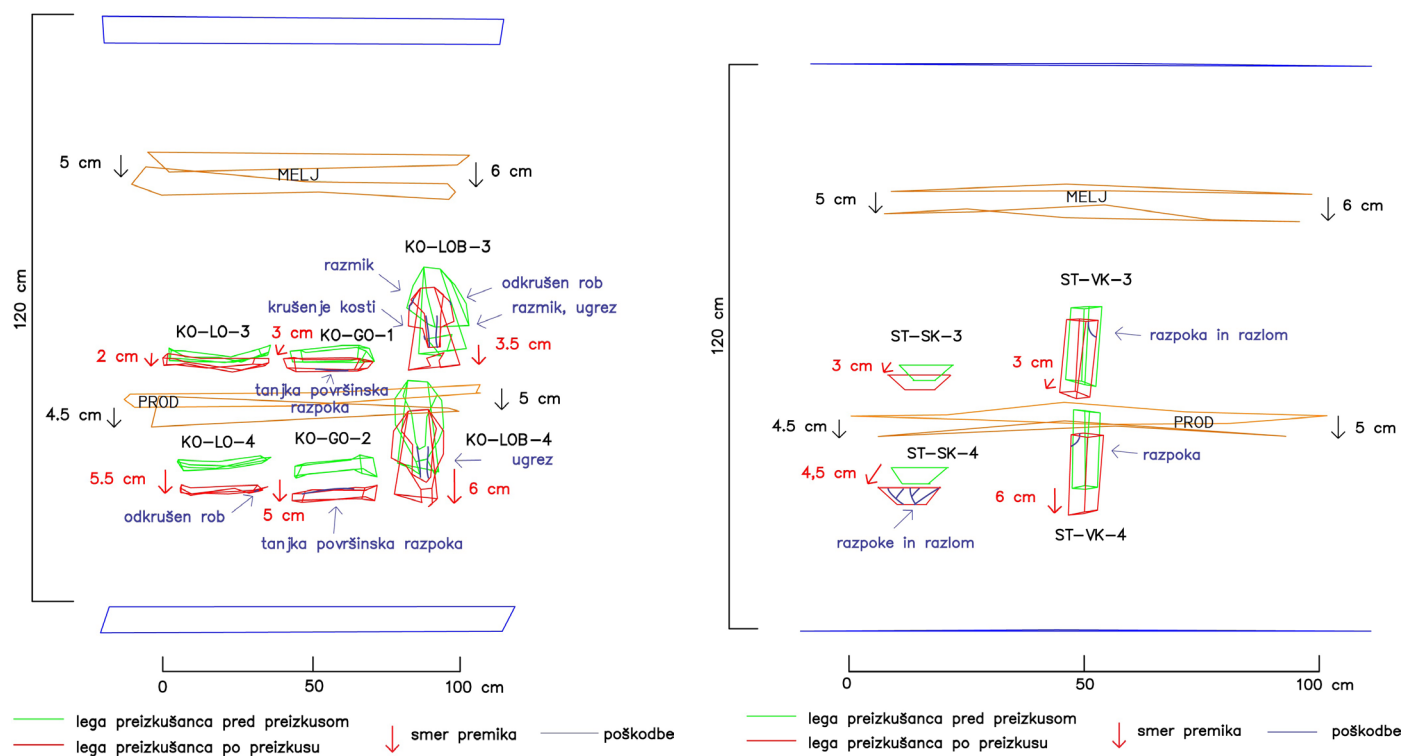
PREIZKUS	PLAST 1	PLAST 2
6	4,5–5 cm	5–6 cm

Preglednica F.6: Premiki in poškodbe preizkušancev v preizkusu 6.

PROD	PREMIKI		POŠKODBE	
PREIZKUŠANEC	razdalja	smer	vrsta	stopnja
BR-PR-2	6 cm	vstran navzdol		
KE-PE-2	6 cm	naravnost navzdol		
KE-SK-4	4,5 cm	naravnost navzdol		
KO-GO-2	5 cm	naravnost navzdol	površinska razpoka	2
KO-lo-4	5,5 cm	vstran navzdol	odkrušen rob	1
ko-lob-4	6 cm	naravnost navzdol	razmik, ugrez dela kosti	3
ST-SK-4	4,5 cm	vstran navzdol	razpoke, razlom	5
ST-VK-4	6 cm	naravnost navzdol	globoka razpoka	3
ZE-TE-2	4 cm	vstran navzdol		
MELJ	PREMIKI		POŠKODBE	
PREIZKUŠANEC	razdalja	smer	vrsta	stopnja
BR-PR-1	4 cm	vstran navzdol		
KE-PE-1	3,5 cm	vstran navzdol	razpoka, razlom	4
KE-SK-3	3 cm	vstran navzdol		
KO-GO-1	3 cm	vstran navzdol		
KO-LO-3	2 cm	naravnost navzdol		
KO-LOB-3	3,5 cm	naravnost navzdol	ugrez dela kosti, krušenje kosti, razmik	3
ST-SK-3	3 cm	vstran navzdol		
ST-VK-2	4,5 cm	vstran navzdol	razpoka, razlom	4
ZE-TE-1	3 cm	vstran navzdol		



Slika F.1: Shematski prikaz premikov in poškodb preizkušancev v preizkusu 6.



Slika F.1: Shematski prikaz premikov in poškodb preizkušancev v preizkusu 6.

Preglednica F.7: Napetosti in deformacije železnih preizkušancev v preizkusu 6.

PROD		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje	39,2	0,199
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek	38,6	0,196
MELJ		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje tlačne	-16,8	-0,098
največje natezne	1,86	0,011
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek	-16,0	-0,093

Preglednica F.8: Napetosti in deformacije bronastih preizkušancev v preizkusu 6.

PROD		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje	-22,4	-0,21
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek	-21,2	-0,201
MELJ		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje tlačne	-9,47	-0,08
največje natezne	0,97	0,008
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek	0,32	0,003

Preglednica F.9: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije v lopatici v melju preizkusa 6.

MELJ		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje minimalne	-16,67	-1,75
največje maksimalne	8,68	1,33
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek minimalnih	-18,54	-1,84
ostanek maksimalnih	5,85	1,17

Preglednica F.10: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije lobanje vrodu preizkusa 6.

PROD		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje minimalne	-59,86	-5,03
največje maksimalne	1,62	1,79
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek minimalnih	-58,73	-4,95
ostanek maksimalnih	1,24	1,77

Preglednica F.11: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije lobanje v melju preizkusa 6.

MELJ		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje minimalne	-18,12	-1,31
največje maksimalne natezne	1,46	0,23
največje maksimalne natezne	0,31	0,34
največje maksimalne tlačne	-7,3	-0,1
največje maksimalne na meji plastičnosti	0,93	0,23
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek minimalnih	-16,34	-1,16
ostanek maksimalnih	-7,1	-0,13

Preglednica F.12: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije keramične skodelice vrodu preizkusa 6.

PROD		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje minimalne	-5,76	-0,08
največje maksimalne	3,06	0,05
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek minimalnih	-2,76	-0,04
ostanek maksimalnih	2,47	0,04

Preglednica F.13: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije keramične skodelice v melju preizkusa 6.

MELJ		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje minimalne	-4,18	-0,05
največje maksimalne natezne	0,69	0,01
največje maksimalne tlačne	-0,53	
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek minimalnih	-1,96	-0,024
ostanek maksimalnih	0,004	0,005

Preglednica F.14: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije visokega steklenega kozarca v produ preizkusa 6.

PROD		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
minimalne ob prvem preskoku	-6,53	-0,1
minimalne ob drugem preskoku	-3,12	-0,06
največje minimalne	-5,75	-0,11
največje maksimalne tlačne	-0,87	-0,01
največje maksimalne natezne	6,92	0,12
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek minimalnih	-5,53	-0,1
ostanek maksimalnih	6,92	0,12

Preglednica F.15: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije visokega steklenega kozarca v melju preizkusa 6.

MELJ		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje minimalne	-98,8	-1,31
največje maksimalne natezne	11,89	0,34
največje maksimalne tlačne	-30,87	-0,17
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek minimalnih	-88,78	-1,16
ostanek maksimalnih	-30,3	-0,13

Preglednica G.1: Povzetek namestitve preizkušancev v preizkusu 7.

PLAST	VIŠINA NAMESTITVE	PREIZKUŠANEC	MERILNI LISTIČ	IZVOR
prod	48,5 cm	BR-PR-5	da	sodobni
prod	48,5 cm	KE-PE-4	ne	arheološki
prod	48 cm	KE-SK-1	da	sodobni
prod	49 cm	KO-GO-3	ne	arheološki
prod	50,5 cm	KO-LO-1	da	sodobni
prod	48,5 cm	KO-ST-1	da	sodobni
prod	50 cm	ST-KO-3	da	sodobni
prod	50 cm	ZE-KO-1	da	sodobni
PLAST	VIŠINA NAMESTITVE	PREIZKUŠANEC	MERILNI LISTIČ	IZVOR
melj	91,5 cm	BR-PR-6	da	sodobni
melj	91,5 cm	KE-PE-2	ne	arheološki
melj	91,5 cm	KE-SK-3	da	sodobni
melj	90,5 cm	KO-GO-4	ne	arheološki
melj	91,5 cm	KO-LO-2	da	sodobni
melj	92,5 cm	KO-ST-2	ne	sodobni
melj	93 cm	ST-KO-4	da	sodobni
melj	92 cm	ZE-KO-2	da	sodobni

Preglednica G.2: Vlažnost pred, med, ob koncu ter po preizkusu 7.

MERILEC	PRED	MED	OB KONCU	PO PREIZKUSU
MV 1 (mV)	834	896	923	912
MV 2 (mV)	868	977	1002	981
MT 1 (°C)	19,9	19,9	19,9	19,9
MT 2 (°C)	19,5	19,9	19,9	20,1

Preglednica G.3: Delež vode v melju v preizkusu 7.

TEŽA ODVZETEGA VZORCA	TEŽA PO SUŠENJU	KOLIČINA VLAGE
2000 g	1644 g	21,7 %

Preglednica G.4: Napetosti na opazovanih globinah v preizkusu 7.

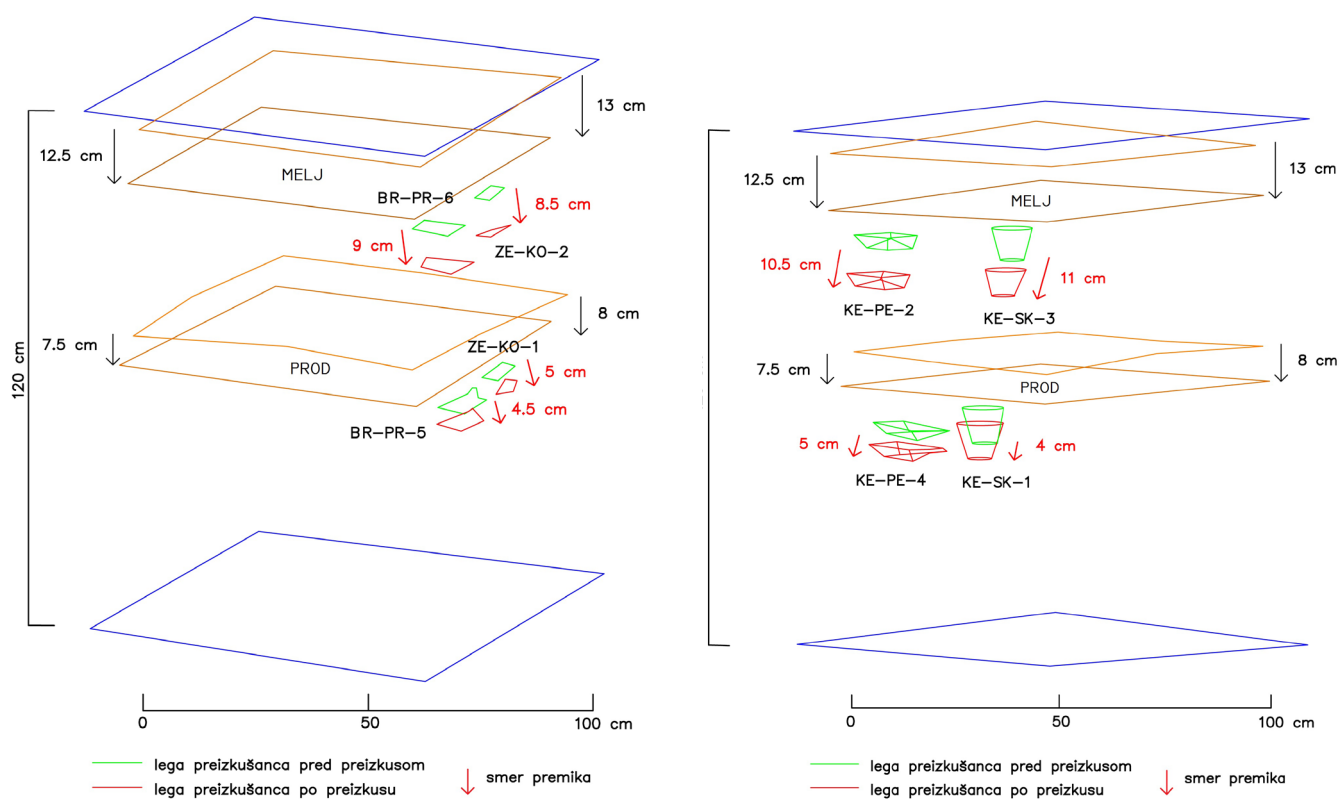
PREIZKUS	PRED (kN/m ²)		SPREMEMBA (kN/m ²)				MAX (kN/m ²)	
	PROD	MELJ	Δ PROD	%	Δ MELJ	%	PROD	MELJ
7	12	3,8	40,3	67,7	55,7	93,6	52,3	59,5

Preglednica G.5: Posedanje plasti v preizkusu 7.

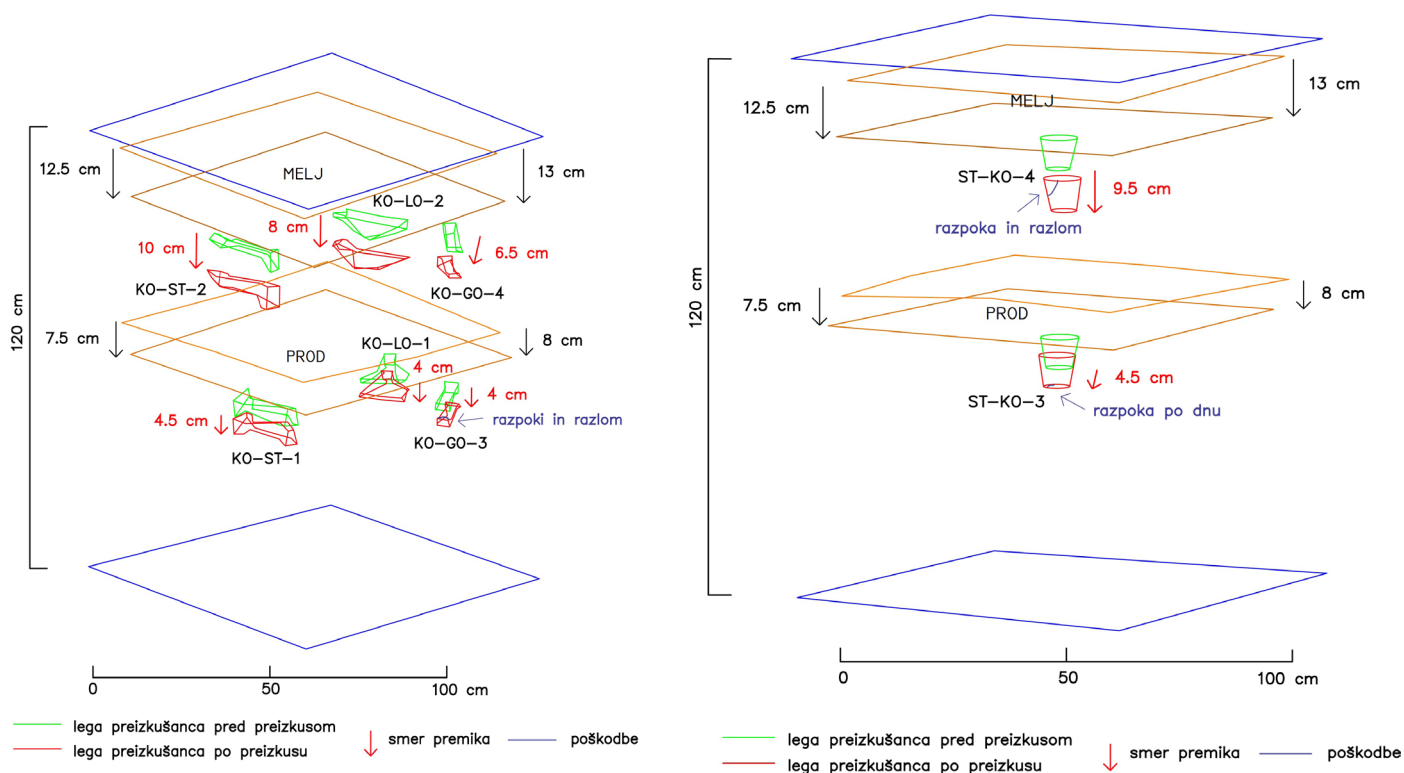
PREIZKUS	PROD	MELJ
7	7,5–8 cm	12,5–13 cm

Preglednica G.6: Premiki in poškodbe preizkušancev v preizkusu 7.

PROD	PREMIKI		POŠKODBE	
PREIZKUŠANEC	razdalja	smer	vrsta	stopnja
BR-PR-5	4,5 cm	vstran navzdol		
ZE-KO-1	5 cm	vstran navzdol		
KE-PE-4	5 cm	vstran navzdol		
KE-SK-1	4 cm	vstran navzdol		
KO-GO-3	4 cm	naravnost navzdol	globoka razpoka	3
KO-lo-1	4 cm	naravnost navzdol		
ko-ST-1	4,5 cm	naravnost navzdol		
ST-KO-3	4,5 cm	vstran navzdol	razpoka po dnu	4
MELJ	PREMIKI		POŠKODBE	
PREIZKUŠANEC	razdalja	smer	vrsta	stopnja
BR-PR-6	9 cm	vstran navzdol		
ZE-KO-2	8,5 cm	vstran navzdol		
KE-PE-2	10,5 cm	vstran navzdol		
KE-SK-3	11 cm	vstran navzdol		
KO-GO-4	6,5 cm	vstran navzdol		
KO-LO-2	8 cm	naravnost navzdol		
KO-ST-2	10 cm	naravnost navzdol		
ST-KO-4	9,5 cm	naravnost navzdol	razpoka in razlom	2



Slika G.1: Shematski prikaz premikov in poškodb preizkušancev v preizkusu 7.



Slika G.1: Shematski prikaz premikov in poškodb preizkušancev v preizkusu 7.

Preglednica G.7: Napetosti in deformacije železnih preizkušancev v preizkusu 7.

PROD		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje	-28,4	-0,116
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek	/	/

Preglednica G.8: Napetosti in deformacije bronastih preizkušancev v preizkusu 7.

PROD		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje	18,9	0,142
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ R (MPa)	ε R (‰)
ostanek	/	/
MELJ		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje	-4,34	-0,033
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek	/	/

Preglednica G.9: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije stegenice v produ preizkusa 7.

PROD		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje minimalne natezne	-2,65	0,02
največje minimalne tlačne	-1,1	-0,05
največje maksimalne	6,16	0,45
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek minimalnih	/	/
ostanek maksimalnih	/	/

Preglednica G.10: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije stegenice v melju preizkusa 7.

MELJ		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje minimalne	-1,45	-0,24
največje maksimalne	3,20	0,33
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek minimalnih	/	/
ostanek maksimalnih	/	/

Preglednica G.11: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije lopatice v produ preizkusa 7.

PROD		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje minimalne	-6,85	-0,82
največje maksimalne	2,43	0,54
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek minimalnih	/	/
ostanek maksimalnih	/	/

Preglednica G.12: Minimalne in maksimalne glavne napetosti lopatice v melju preizkusa 7.

MELJ		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje minimalne	-24,29	-2,16
največje maksimalne	2,18	0,79
največje maksimalne	1,4	0,94
maksimalne na meji plastičnosti	1,1	0,25
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek minimalnih	/	/
ostanek maksimalnih	/	/

Preglednica G.13: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije keramične skodelice v produ preizkusa 7.

PROD		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje minimalne	-14,3	-0,24
največje maksimalne	23,9	0,33
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek minimalnih	/	/
ostanek maksimalnih	/	/

Preglednica G.14: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije keramične skodelice v melju preizkusa 7.

MELJ		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje minimalne	-10,24	-0,12
največje maksimalne	-3,9	-0,02
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek minimalnih	/	/
ostanek maksimalnih	/	/

Preglednica G.15: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije nizkega steklenega kozarca vrodu preizkusa 7.

PROD		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje minimalne natezne	0,2	0,01
največje minimalne tlačne	-1,1	-0,02
največje maksimalne	0,88	0,02
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek minimalnih	/	/
ostanek maksimalnih	/	/

Preglednica G.16: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije nizkega steklenega kozarca v melju preizkusa 7.

MELJ		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
minimalne natezne ob prvem preskoku	0,13	0,001
minimalne tlačne ob drugem preskoku	-1,01	-0,02
minimalne tlačne ob tretjem preskoku	-0,76	-0,01
minimalne tlačne ob četrtem preskoku	-1,1	-0,03
maksimalne natezne ob prvem preskoku	0,26	0,04
maksimalne natezne ob drugem preskoku	0,024	0,01
maksimalne natezne ob tretjem preskoku	0,09	0,01
največje maksimalne tlačne	-0,77	-0,01
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek minimalnih	/	/
ostanek maksimalnih	/	/

Preglednica H.1: Povzetek namestitve preizkušancev v preizkusu 8.

PLAST	VIŠINA NAMESTITVE	PREIZKUŠANEC	MERILNI LISTIČ	IZVOR
prod	45 cm	BR-PR-1	da	sodobni
prod	43,5 cm	KE-LO-2	da	sodobni
prod	43,5 cm	KE-PE-3	ne	arheološki
prod	44,5 cm	KO-GO-1	ne	arheološki
prod	45,5 cm	KO-LO-3	da	sodobni
prod	45,5 cm	ST-SK-3	da	sodobni
prod	46 cm	ZE-TE-1	da	sodobni
PLAST	VIŠINA NAMESTITVE	PREIZKUŠANEC	MERILNI LISTIČ	IZVOR
melj	88 cm	BR-PR-2	da	sodobni
melj	87,5 cm	KE-PE-2	ne	arheološki
melj	86,5 cm	KE-SK-4	da	sodobni
melj	86,5 cm	KO-GO-2	ne	arheološki
melj	88 cm	KO-LO-4	da	sodobni
melj	86,5 cm	ST-SK-4	da	sodobni
melj	88,5 cm	ZE-TE-2	da	sodobni

Preglednica H.2: Vlažnost pred, med, ob koncu ter po preizkusu 8.

MERILEC	PRED	MED	OB KONCU	PO PREIZKUSU
MV 1 (mV)	764	847	886	882
MV 2 (mV)	999	1005	1009	1005
MT 1 (°C)	22,8	22,8	22,8	22,8
MT 2 (°C)	22,4	22,5	22,5	22,6

Preglednica H.3: Delež vode v melju v preizkusu 8.

TEŽA ODVZETEGA VZORCA	TEŽA PO SUŠENJU	KOLIČINA VLAŽE
2000 g	1656 g	20,8 %

Preglednica H.4: Napetosti na opazovanih globinah v preizkusu

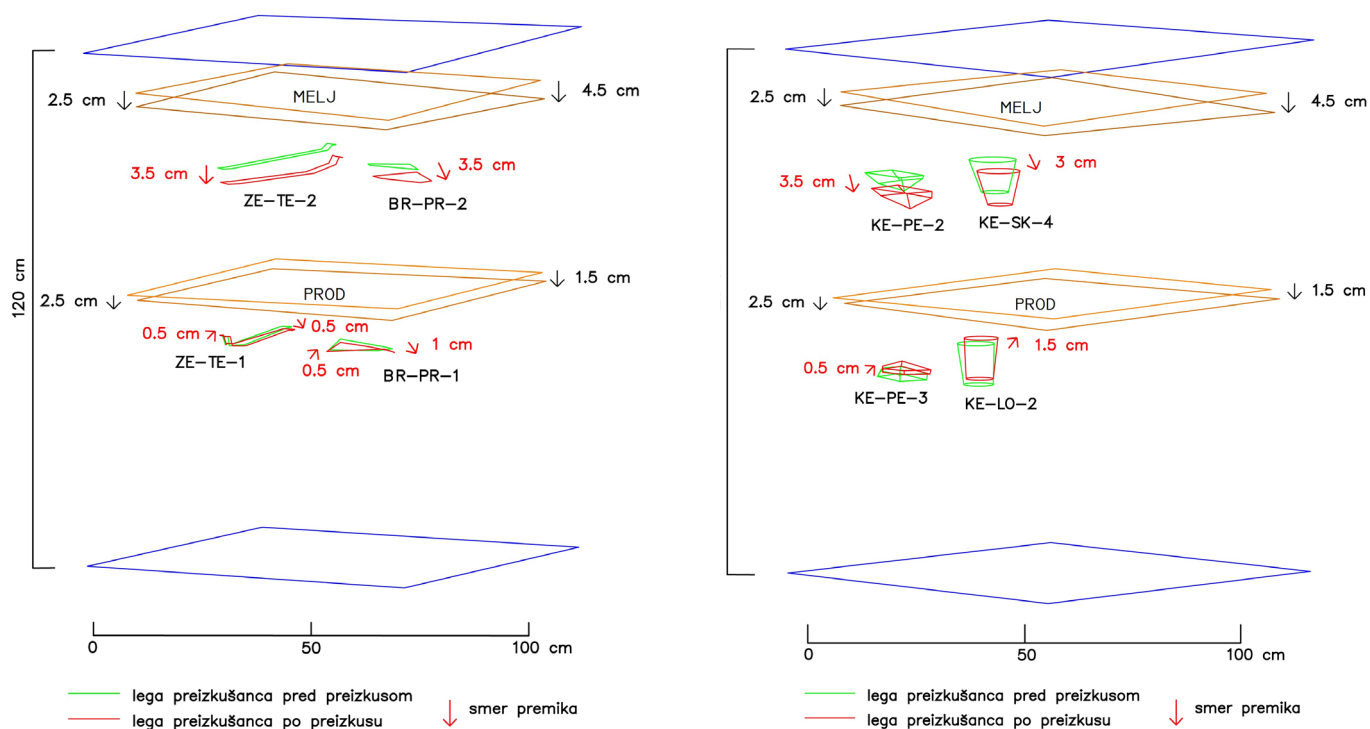
PREIZKUS	PRED (kN/m ²)		SPREMEMBA (kN/m ²)				MAX (kN/m ²)	
	PROD	MELJ	Δ PROD	%	Δ MELJ	%	PROD	MELJ
8	11,5	3,5	23,7	65,2	32,8	90,3	35,1	36,3

Preglednica H.5: Posedanje plasti v preizkusu 8.

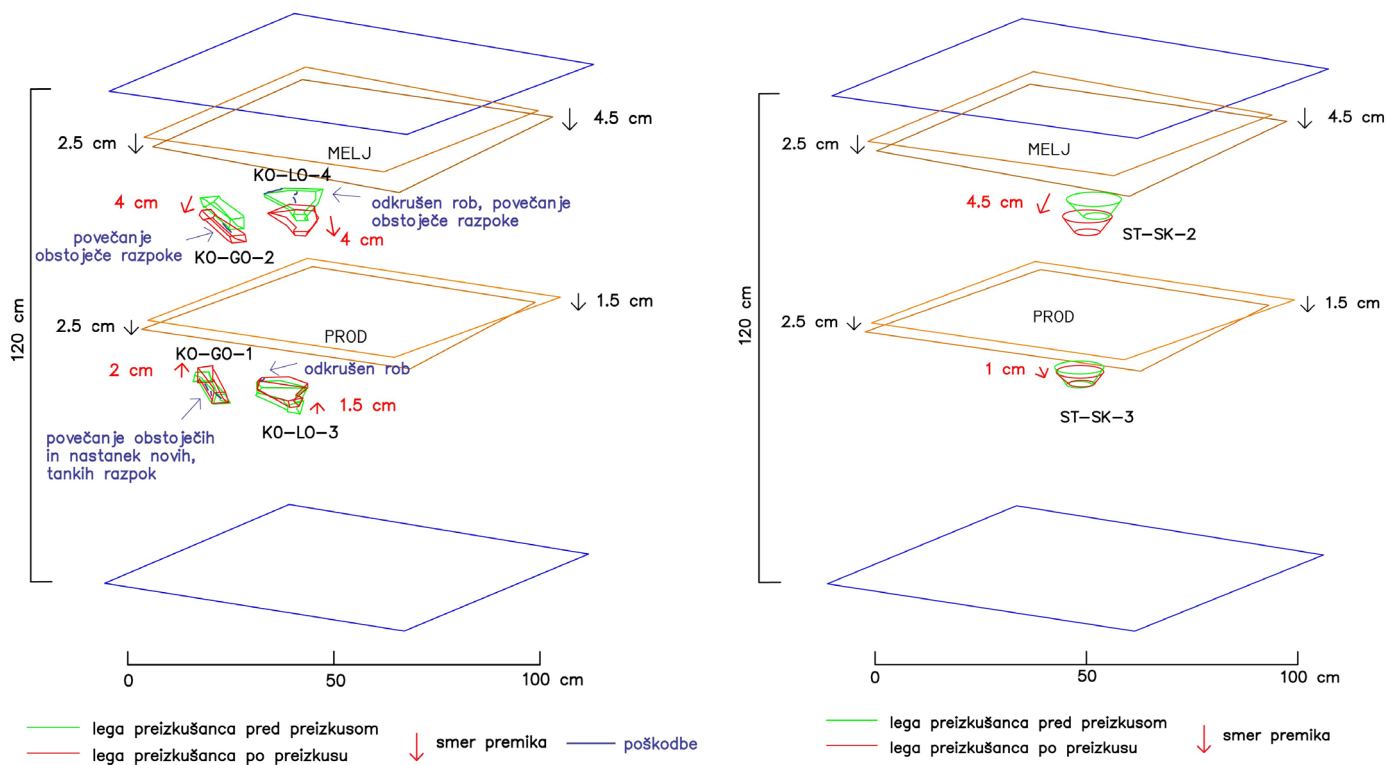
PREIZKUS	PROD	MELJ
8	1,5–2,5 cm	2,5–4,5 cm

Preglednica H.6: Premiki in poškodbe preizkušancev v preizkusu 8.

PROD	PREMIKI		POŠKODBE	
PREIZKUŠANEC	razdalja	smer	vrsta	stopnja
BR-PR-1	0,5–1 cm	nagib		
ZE-TE-1	0,5 cm	nagib		
KE-PE-3	0,5 cm	vstran navzgor		
KE-LO-2	1,5 cm	vstran navzgor		
KO-GO-1	2 cm	naravnost navzgor	drobne razpoke	2
KO-LO-3	1,5 cm	naravnost navzgor	odkrušen rob	1
ST-SK-3	1 cm	vstran navzdol		
MELJ	PREMIKI		POŠKODBE	
PREIZKUŠANEC	razdalja	smer	vrsta	stopnja
BR-PR-2	3,5 cm	vstran navzdol		
ZE-TE-2	3,5 cm	naravnost navzdol		
KE-PE-2	3,5 cm	vstran navzdol		
KE-SK-4	3 cm	vstran navzdol		
KO-GO-2	4 cm	vstran navzdol	povečanje razpoke	1
KO-lo-4	4 cm	vstran navzdol	povečanje razpoke, odkrušen rob	1
ST-SK-2	4,5 cm	vstran navzdol		



Slika H.1: Shematski prikaz premikov in poškodb preizkušancev v preizkusu 8.



Slika H.1: Shematski prikaz premikov in poškodb preizkušancev v preizkusu 8.

Preglednica H.7: Napetosti in deformacije železnih preizkušancev v preizkusu 8.

PROD		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje tlačne	-2,44	-0,009
največje natezne	6,88	0,028
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek	5,77	0,024
MELJ		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje tlačne	-1,99	-0,008
največje natezne	29,51	0,12
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek	25,07	0,102

Preglednica H.8: Napetosti in deformacije bronastih preizkušancev v preizkusu 8.

PROD		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje	-13,39	-0,1
zmanjšanje	5,67	0,044
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek	-7,72	-0,058
MELJ		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje tlačne	-5,19	-0,04
največje natezne	12,54	0,094
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek	11,1	0,083

Preglednica H.9: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije lopatice v produ preizkusa 8.

PROD		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje minimalne	-6,0	-1,31
največje minimalne	-4,5	-1,54
minimalne na meji plastičnosti	-6,0	-1,31
največje maksimalne	35,75	3,2
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek minimalnih	-3,50	-1,47
ostanek maksimalnih	32,95	3,02

Preglednica H.10: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije lopatice v melju preizkusa 8.

MELJ		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje minimalne	-21,5	-1,67
največje maksimalne	4,78	0,23
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek minimalnih	-18,47	-1,47
ostanek maksimalnih	6,42	0,19

Preglednica H.11: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije keramičnega lončka v produ preizkusa 8.

PROD		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje minimalne	-4,91	-0,07
največje maksimalne natezne	2,61	0,04
največje maksimalne tlačne	-0,58	-0,01
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek minimalnih	-3,48	-0,05
ostanek maksimalnih	2,33	0,04

Preglednica H.12: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije keramične skodelice v melju preizkusa 8.

MELJ		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje minimalne	-5,08	-0,06
največje maksimalne tlačne	-3,35	-0,03
največje maksimalne natezne	0,96	0,01
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek minimalnih	-1,47	-0,02
ostanek maksimalnih	-0,92	-0,01

Preglednica H.13: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije steklene skodelice v produ preizkusa 8.

PROD		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje minimalne	-2,68	-0,05
največje maksimalne tlačne	-0,34	-0,01
največje maksimalne natezne	4,32	0,07
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek minimalnih	-2,56	-0,05
ostanek maksimalnih	3,57	0,06

Preglednica H.14: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije steklene skodelice v melju preizkusa 8.

MELJ		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje minimalne	-4,18	-0,07
največje maksimalne tlačne	-0,53	-0,01
največje maksimalne natezne	2,17	0,04
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek minimalnih	-2,96	-0,05
ostanek maksimalnih	1,95	0,04

Preglednica I.1: Povzetek namestitve preizkušancev v preizkusu 9.

PLAST	VIŠINA NAMESTITVE	PREIZKUŠANEC	MERILNI LISTIČ	IZVOR
prod	54 cm	BR-PR-1	da	sodobni
prod	44,5 cm	KE-PE-4	ne	arheološki
prod	45 cm	KE-SK-4	da	sodobni
prod	44,5 cm	KO-GO-3	ne	arheološki
prod	47 cm	KO-LO-3	da	sodobni
prod	43,5 cm	KO-LOB-4	da	sodobni
prod	44,5 cm	ST-SK-3	da	sodobni
prod	45 cm	ZE-TE-1	da	sodobni
PLAST	VIŠINA NAMESTITVE	PREIZKUŠANEC	MERILNI LISTIČ	IZVOR
melj	91 cm	BR-PR-2	da	sodobni
melj	89 cm	KE-PE-2	ne	arheološki
melj	89 cm	KE-SK-1	da	sodobni
melj	88,5 cm	KO-GO-4	ne	arheološki
melj	81 cm	KO-LO-1	da	sodobni
melj	88,5 cm	KO-LOB-1	da	sodobni
melj	89 cm	ST-SK-4	da	sodobni
melj	90,5 cm	ZE-TE-2	da	sodobni

Preglednica I.2: Vlažnost pred, med, ob koncu ter po preizkusu 9.

MERILEC	PRED	MED	OB KONCU	PO PREIZKUSU
MV 1 (mV)	829	854	879	869
MV 2 (mV)	814	823	837	831
MT 1 (°C)	20,3	20,3	20,3	20,3
MT 2 (°C)	20,7	20,7	20,7	20,7

Preglednica I.3: Delež vode v melju v preizkusu 9.

TEŽA ODVZETEGA VZORCA	TEŽA PO SUŠENJU	KOLIČINA VODE
2000 g	1686 g	18,6 %

Preglednica I.4: Napetosti na opazovanih globinah v preizkusu 9.

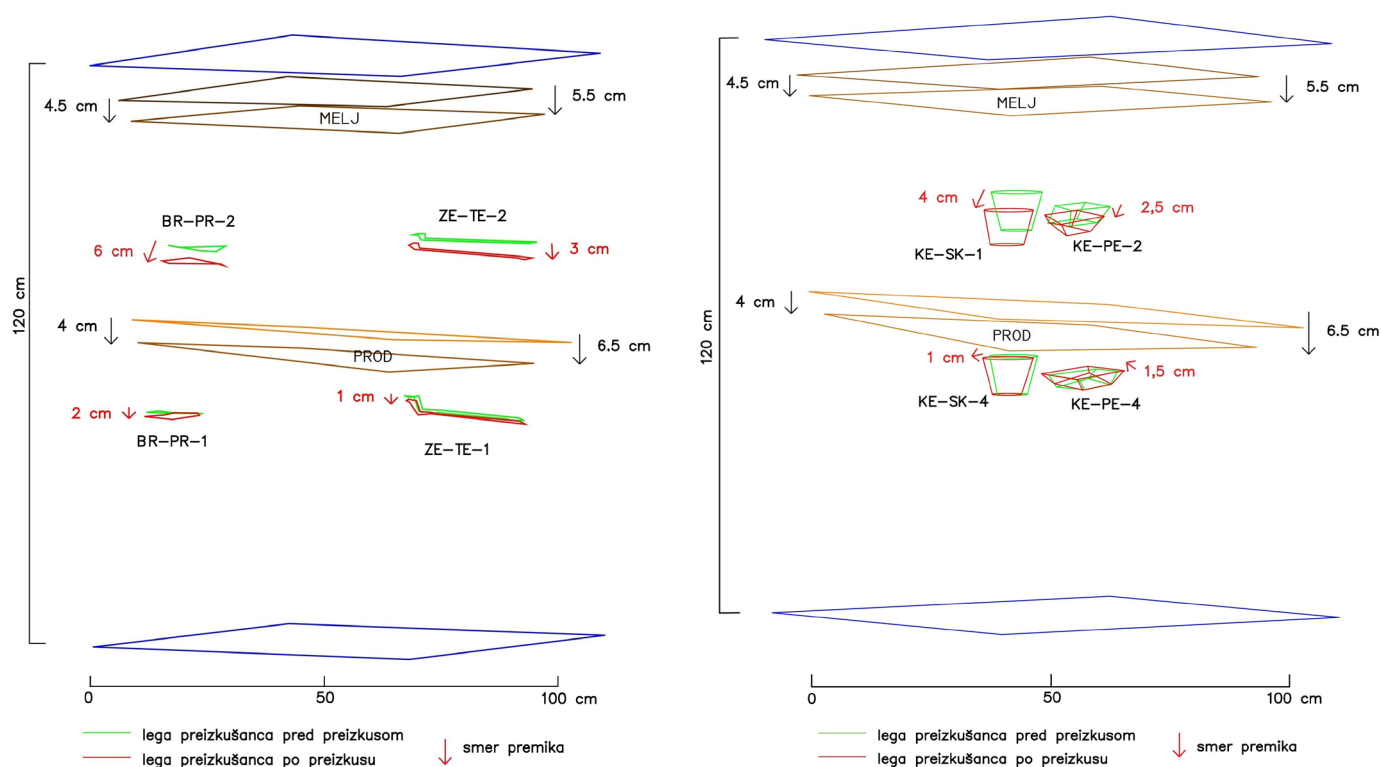
PREIZKUS	PRED (kN/m ²)		SPREMEMBA (kN/m ²)				MAX (kN/m ²)	
	PROD	MELJ	Δ PROD	%	Δ MELJ	%	PROD	MELJ
9	11,5	3,5	40,3	68,0	55,7	94,0	51,7	59,2

Preglednica I.5: Posedanje plasti v preizkusu 9.

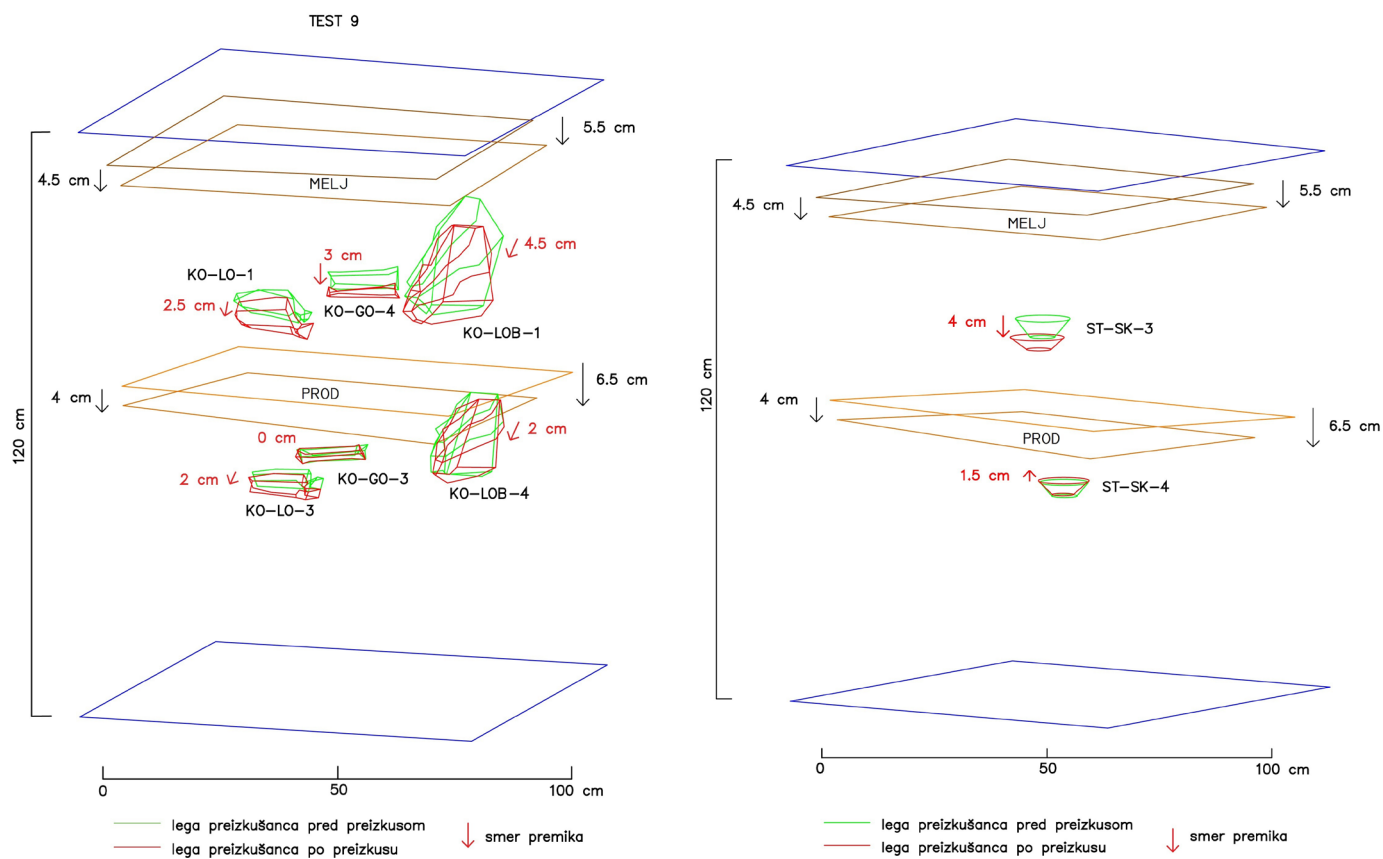
PREIZKUS	PROD	MELJ
9	4–6,5 cm	4,5–5,5 cm

Preglednica I.6: Premiki in poškodbe preizkušancev v preizkusu 9.

PROD	PREMIKI		POŠKODBE	
PREIZKUŠANEC	razdalja	smer	vrsta	stopnja
BR-PR-1	2 cm	naravnost navzdol		
ZE-TE-1	1 cm	naravnost navzdol		
KE-PE-4	1,5 cm	vstran navzgor		
KE-SK-4	1 cm	vstran navzdol		
KO-GO-3	0 cm	/	razpoke in razpad	4
KO-lo-3	2 cm	vstran navzdol	odkrušen rob	1
KO-LOB-1	2 cm	vstran navzdol	krušenje robov, razmik in ugrez kosti	3
ST-SK-4	1,5 cm	naravnost navzgor		
MELJ	PREMIKI		POŠKODBE	
PREIZKUŠANEC	razdalja	smer	vrsta	stopnja
BR-PR-2	6 cm	vstran navzdol		
ZE-TE-2	3 cm	naravnost navzdol		
KE-PE-2	2,5 cm	vstran navzdol		
KE-SK-1	4 cm	vstran navzdol		
KO-GO-4	3 cm	naravnost navzdol		
KO-lo-1	2,5 cm	naravnost navzdol	krušenje robov, razpoke	3
KO-LOB-4	4,5 cm	vstran navzdol	krušenje robov, razmik in ugrez kosti	3
ST-SK-3	4 cm	naravnost navzdol		



Slika I.1: Shematski prikaz premikov in poškodb preizkušancev v preizkusu 9.



Slika I.1: Shematski prikaz premikov in poškodb preizkušancev v preizkusu 9.

Preglednica I.7: Napetosti in deformacije železnih preizkušancev v preizkusu 9.

PROD		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje	30,62	0,13
zmanjšanje	4,66	0,024
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek	25,3	0,103
MELJ		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje natezne	6,43	0,024
največje tlačne	-42,16	-0,17
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek	-39,72	-0,162

Preglednica I.8: Napetosti in deformacije bronastih preizkušancev v preizkusu 9.

PROD		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ϵ (‰)
največje	23,85	0,18
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ϵ (‰)
ostanek	13,39	0,10
MELJ		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ϵ (‰)
največje	7,48	0,056
zmanjšanje	2,74	0,02
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ϵ (‰)
ostanek	-0,24	-0,002

Preglednica I.9: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije lopatice v produ preizkusa 9.

PROD – L1 – LOPATICA		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ϵ (‰)
največje minimalne	-33,93	-2,82
največje maksimalne	2,34	0,95
maksimalne na meji plastičnosti	1,33	0,21
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ϵ (‰)
ostanek minimalnih	-30,48	-2,54
ostanek maksimalnih	2,15	0,86

Preglednica I.10: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije lopatice v produ preizkusa 9.

MELJ		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ϵ (‰)
največje minimalne	-7,34	-0,78
preskok minimalnih	iz -1,84 na -1,59	iz -0,18 na -0,23
največje maksimalne	3,94	0,60
maksimalne na meji plastičnosti	2,66	0,29
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ϵ (‰)
ostanek minimalnih	-2,96	-0,31
ostanek maksimalnih	1,48	0,24

Preglednica I.11: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije lobanje v produ preizkusa 9.

ROD		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ϵ (‰)
največje minimalne	-38,4	-3,35
zmanjšanje minimalnih	1,5	0,17
največje maksimalne	3,54	0,42
največje maksimalne	0,39	1,31
maksimalne na meji plastičnosti	3,11	0,27
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ϵ (‰)
ostanek minimalnih	-26,71	-2,26
ostanek maksimalnih	-2,55	1,13

Preglednica I.12: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije lobanje v melju preizkusa 9.

MELJ		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje minimalne	-15,57	-1,35
preskok minimalnih	iz -9,9 na -9,7	iz -0,81 na -0,88
največje maksimalne	-1,97	0,17
največje maksimalne	-0,67	0,49
največje maksimalne natezne	0,3	0,37
maksimalne na meji plastičnosti	-1,8	0,1
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
največje minimalne	-7,22	-0,71
največje maksimalne	2,11	0,44

Preglednica I.13: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije keramične skodelice vrodu preizkusa 9.

PROD		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje minimalne	-11,59	-0,13
največje maksimalne	-5,44	-0,04
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek minimalnih	-2,77	-0,04
ostanek maksimalnih	0,24	0,01

Preglednica I.14: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije keramične skodelice v melju preizkusa 9.

MELJ		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje minimalne	-3,19	-0,04
zmanjšanje minimalnih	-1,68	-0,02
največje maksimalne natezne	1,59	0,03
največje maksimalne tlačne	-0,74	0,01
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek minimalnih	-0,99	-0,03
ostanek maksimalnih	5,59	0,07

Preglednica I.15: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije steklene skodelice vrodu preizkusa 9.

PROD		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje minimalne	-53,46	-0,93
največje maksimalne	48,74	0,88
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek minimalnih	-41,68	-0,73
ostanek maksimalnih	40,25	0,72

Preglednica I.16: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije steklene skodelice v melju preizkusa 9.

MELJ		
OBREMENJEVANJE	σ (MPa)	ε (‰)
največje minimalne	-6,44	-0,09
maksimalne tlačne ob prvem preskoku	-0,29	-0,01
maksimalne tlačne ob drugem preskoku	-0,41	-0,02
maksimalne natezne	1,95	0,05
KONEC RAZBREMENJEVANJA	σ (MPa)	ε (‰)
ostanek minimalnih	-4,46	-0,07
ostanek maksimalnih	1,74	0,04

J. PRILOGA – Preizkus 10

Preglednica J.1: Povzetek namestitve preizkušancev v preizkusu 10.

PREIZKUS	VIŠINA NAMESTITVE	PREIZKUŠANEC	MERILNI LISTIČ	IZVOR
10	20 cm	KE-MOD	da	sodobni
10	20 cm	KE-PRZG	da	arheološki
10	20 cm	KE-ANT	da	arheološki
10	20 cm	KO-GO-1	da	arheološki
10	20 cm	KO-ST-2	da	sodobni

Preglednica J.2: Poškodbe preizkušancev v preizkusu 10.

PREIZKUŠANEC	POŠKODBE		
	vrsta	stopnja	število odlomkov
KE-MOD	razpoka, razlom	5	4
KE-PRZG	razpoka, razlom	5	10
KE-ANT	razpoka, razlom	5	7
KO-GO-1	razpoka, razlom	5	2
KO-ST-2	brez	0	1

Preglednica J.3: Minimalne in maksimalne napetosti in deformacije sodobne stegenice preizkusa 10.

SODOBNA STEGENICA		
NAJVEČJE UGOTOVLJENE	σ (MPa)	ε (‰)
minimalne	-5,7	-0,78
maksimalne	9,6	1,01

Preglednica J.4: Minimalne in maksimalne napetosti in deformacije antične cevaste kosti preizkusa 10.

ANTIČNA CEVASTA KOST		
PRESKOK	σ (MPa)	ε (‰)
1. minimalne	-0,52	-0,06
1. maksimalne	3,76	0,27
2. minimalne	-0,35	-0,08
2. maksimalne	3,35	0,23
NAJVEČJE UGOTOVLJENE		
minimalne	2,23	0,07
maksimalne	3,9	0,26

Preglednica J.5: Minimalne in maksimalne napetosti in deformacije sodobnega keramičnega odlomka v preizkusu 10.

SODOBNI KERAMIČNI ODLOMEK		
PRESKOK	σ (MPa)	ε (‰)
1 – pri minimalnih	-18,11	-0,24
1 – pri maksimalnih	0,08	0,31
2 – pri minimalnih	-5,49	-0,05
2 – pri maksimalnih	-5,33	-0,05

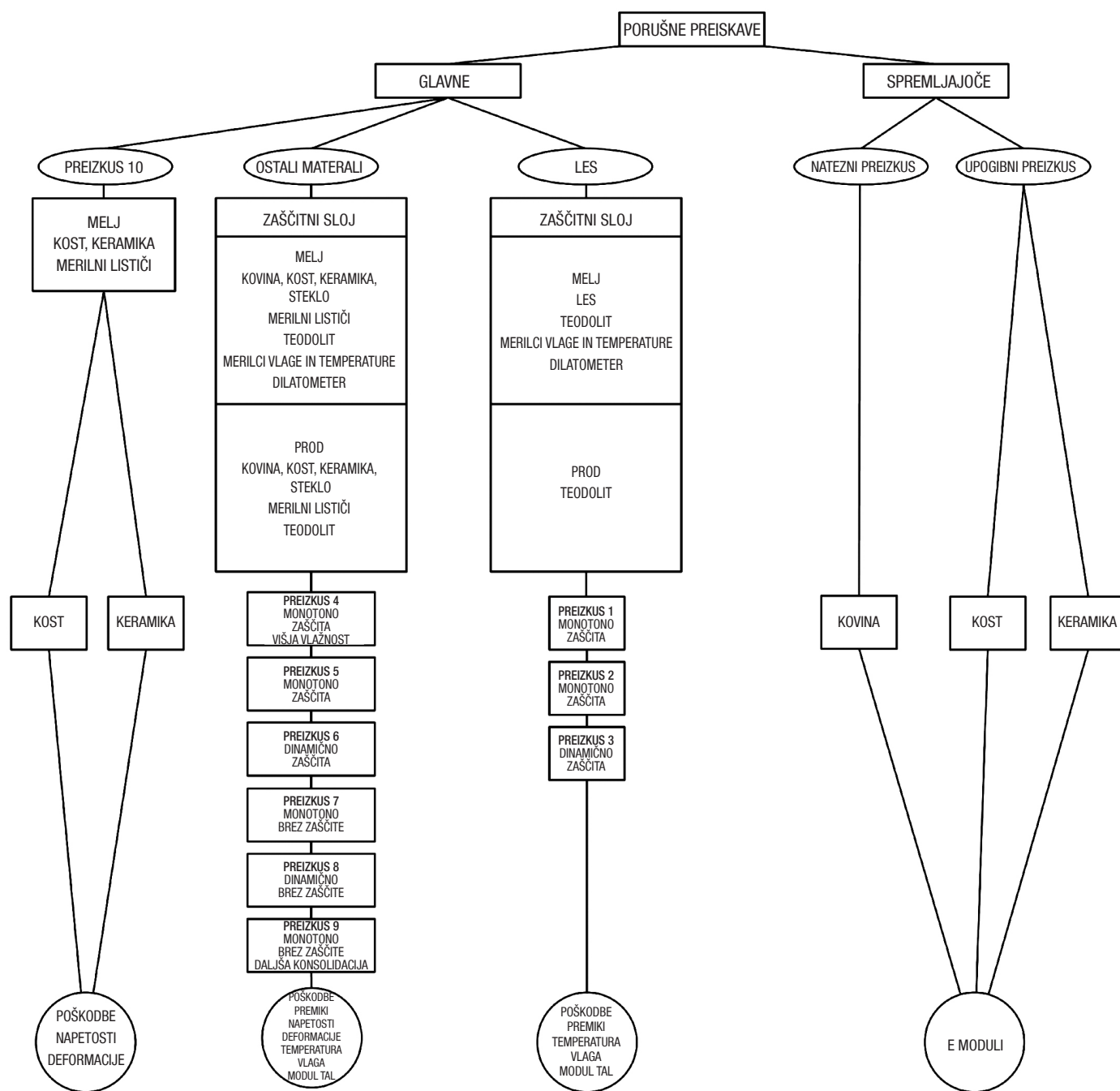
Preglednica J.6: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije antičnega keramičnega odlomka v preizkusu 10.

ANTIČNI PREIZKUŠANEC		
PRESKOK	σ (MPa)	ε (‰)
1 – pri minimalnih	-5,99	-0,37
1 – pri maksimalnih	-3,5	-0,07
2 – pri minimalnih	-7,35	-0,44
2 – pri maksimalnih	-3,6	-0,16
3 – pri minimalnih	6,56	0,18
3 – pri maksimalnih	11,8	0,69
4 – pri minimalnih	8,5	0,12
4 – pri maksimalnih	20	1,23

Preglednica J.7: Minimalne in maksimalne glavne napetosti in deformacije prazgodovinskega keramičnega odlomka v preizkusu 10.

PRAZGODOVINSKI PREIZKUŠANEC		
PRESKOK	σ (MPa)	ε (‰)
1 – pri minimalnih	-2,3	-0,16
2 – pri minimalnih	8,6	0,22
3 – pri minimalnih	43,5	0,88
3 – pri maksimalnih	143,9	8,92

K. PRILOGA – Povzetek metodologije porušnih preiskav



L. PRILOGA – Premiki in poškodbe preizkušancev v preizkusih 4–9

PREIZKUS / PLAST	PREIZKUŠANEC	IZVOR	PREMIK (cm)	POŠKODBA	STOPNJA POŠKODBE
4/ PROD	BR-PR- 1	SODOBNI	4,5		0
4/ PROD	ZE-TE- 1	ARHEOLOŠKI	3		0
4/ PROD	KE-PE- 1	ARHEOLOŠKI	3,5	globoka razpoka	3
4/ PROD	KE-TE- 2	ARHEOLOŠKI	4		0
4/ PROD	KE-LO- 1	SODOBNI	3,5	odlomljen rob	2
4/ PROD	KO-ST- 2	SODOBNI	4		0
4/ PROD	ST-KO- 1	SODOBNI	4,5	razpoka po dnu in odkrušen rob	2
4/ MELJ	BR-PR- 2	SODOBNI	6,5		0
4/ MELJ	ZE-TE- 2	ARHEOLOŠKI	6		0
4/ MELJ	KE-PE- 2	ARHEOLOŠKI	6,5		0
4/ MELJ	KE-TE- 1	ARHEOLOŠKI	5		0
4/ MELJ	KE-LO- 2	SODOBNI	8,5		0
4/ MELJ	KO-ST- 1	SODOBNI	7,5		0
4/ MELJ	ST-KO- 2	SODOBNI	7	razpoke, razlom	4
5/ PROD	BR-PR-5	SODOBNI	3		0
5/ PROD	ZE-KO- 1	SODOBNI	1		0
5/ PROD	KE-PE-3	ARHEOLOŠKI	1,5	plitva razpoka	2
5/ PROD	KE-TE-3	ARHEOLOŠKI	2,5		0
5/ PROD	KE-SK- 1	SODOBNI	1	rahlo odkrušen rob	1
5/ PROD	KO-LO- 1	SODOBNI	2,5	plitva, kratka razpoka	1
5/ PROD	KO-LOB- 1	SODOBNI	2	odkrušen rob, povečanje razpok, plitva razpoka	2
5/ PROD	ST-VK- 1	SODOBNI	2	razpoke, razlom	4
5/ PROD	ST-SK- 1	SODOBNI	1,5	razpoke, razpad	5
5/ MELJ	BR-PR-6	SODOBNI	6,5		0
5/ MELJ	ZE-KO- 2	SODOBNI	5		0
5/ MELJ	KE-PE-4	ARHEOLOŠKI	4		0
5/ MELJ	KE-TE-4	ARHEOLOŠKI	4		0
5/ MELJ	KE-SK- 2	SODOBNI	4,5	razpoke, razlom	4
5/ MELJ	KO-LO- 2	SODOBNI	5	plitva razpoka	2
5/ MELJ	KO-LOB- 2	SODOBNI	7	povečanje razpok, ugrez dela kosti, razpoke, krušenje kosti	3
5/ MELJ	ST-VK- 2	SODOBNI	6	razpoke, razlom	4
5/ MELJ	ST-SK- 2	SODOBNI	4,5		0
6/ PROD	BR-PR- 2	SODOBNI	6		0
6/ PROD	ZE-TE- 2	ARHEOLOŠKI	4		0
6/ PROD	KE-PE- 2	ARHEOLOŠKI	6		0
6/ PROD	KE-SK-4	SODOBNI	4,5		0
6/ PROD	KO-GO- 2	ARHEOLOŠKI	5	površinska razpoka	2
6/ PROD	KO-LO-4	SODOBNI	5,5	odkrušen rob	1
6/ PROD	KO-LOB-4	SODOBNI	6	razpoke, ugrez dela kosti	3
6/ PROD	ST-SK-4	SODOBNI	4,5	razpoke, razpad	5
6/ PROD	ST-VK-4	SODOBNI	6	razpoka	3

PREIZKUS / PLAST	PREIZKUŠANEC	IZVOR	PREMIK (cm)	POŠKODBA	STOPNJA POŠKODBE
6/ MELJ	BR-PR- 1	SODOBNI	4		0
6/ MELJ	ZE-TE- 1	ARHEOLOŠKI	3		0
6/ MELJ	KE-PE- 1	ARHEOLOŠKI	3,5	poglobitev obstoječe razpoke, razlom	4
6/ MELJ	KE-SK-3	SODOBNI	3		0
6/ MELJ	KO-GO- 1	ARHEOLOŠKI	3		0
6/ MELJ	KO-LO-3	SODOBNI	2		0
6/ MELJ	KO-LOB-3	SODOBNI	3,5	ugrez dela kosti, kršenje kosti, povečanje razpok	3
6/ MELJ	ST-SK-3	SODOBNI	3		0
6/ MELJ	ST-VK- 2	SODOBNI	4,5	razpoka, razlom	4
7/ PROD	BR-PR-5	SODOBNI	4,5		0
7/ PROD	ZE-KO- 1	SODOBNI	5		0
7/ PROD	KE-PE-4	ARHEOLOŠKI	5		0
7/ PROD	KE-SK- 1	SODOBNI	4		0
7/ PROD	KO-GO-3	ARHEOLOŠKI	4	globoka razpoka	3
7/ PROD	KO-LO- 1	SODOBNI	4		0
7/ PROD	KO-ST- 1	SODOBNI	4,5		0
7/ PROD	ST-KO-3	SODOBNI	4,5	razpoka, razlom	4
7/ MELJ	BR-PR-6	SODOBNI	9		0
7/ MELJ	ZE-KO- 2	SODOBNI	8,5		0
7/ MELJ	KE-PE- 2	ARHEOLOŠKI	10,5		0
7/ MELJ	KE-SK-3	SODOBNI	1, 1		0
7/ MELJ	KO-GO-4	ARHEOLOŠKI	6,5		0
7/ MELJ	KO-LO- 2	SODOBNI	8		0
7/ MELJ	KO-ST- 2	SODOBNI	10		0
7/ MELJ	ST-KO-4	SODOBNI	9,5	razpoka po dnu	2
8/ PROD	BR-PR- 1	SODOBNI	- 1		0
8/ PROD	ZE-TE- 1	ARHEOLOŠKI	-0,5		0
8/ PROD	KE-PE-3	ARHEOLOŠKI	-0,5		0
8/ PROD	KE-LO- 2	SODOBNI	- 1,5		0
8/ PROD	KO-GO- 1	ARHEOLOŠKI	- 2	tanke razpoke	2
8/ PROD	KO-LO-3	SODOBNI	- 1,5	odkrušen rob	1
8/ PROD	ST-SK-3	SODOBNI	1		0
8/ MELJ	BR-PR- 2	SODOBNI	3,5		0
8/ MELJ	ZE-TE- 2	ARHEOLOŠKI	3,5		0
8/ MELJ	KE-PE- 2	ARHEOLOŠKI	3,5		0
8/ MELJ	KE-SK-4	SODOBNI	3		0
8/ MELJ	KO-GO- 2	ARHEOLOŠKI	4	povečanje razpoke	1
8/ MELJ	KO-LO-4	SODOBNI	4	odkrušen rob, povečanje obstoječe razpoke	2
8/ MELJ	ST-SK- 2	SODOBNI	4,5		0
9/ PROD	BR-PR- 1	SODOBNI	2		0
9/ PROD	ZE-TE- 1	SODOBNI	1		0
9/ PROD	KE-PE-4	ARHEOLOŠKI	1,5		0
9/ PROD	KE-SK-4	SODOBNI	1		0
9/ PROD	KE-GO-3	ARHEOLOŠKI	0	razpoke in razpad	4

PREIZKUS / PLAST	PREIZKUŠANEC	IZVOR	PREMIK (cm)	POŠKODBA	STOPNJA POŠKODBE
9/ PROD	KO-LO-3	SODOBNI	2	odkrušen rob	1
9/ PROD	KO-LOB- 1	SODOBNI	2	krušenje robov, razmik in ugrez kosti	3
9/ PROD	ST-SK-4	SODOBNI	1,5		0
9/ MELJ	BR-PR- 2	SODOBNI	6		0
9/ MELJ	ZE-TE- 2	SODOBNI	3		0
9/ MELJ	KE-PE- 2	ARHEOLOŠKI	2,5		0
9/ MELJ	KE-SK- 1	SODOBNI	4		0
9/ MELJ	KE-GO-4	ARHEOLOŠKI	3		0
9/ MELJ	KO-LO- 1	SODOBNI	2,5	krušenje robov, razpoke, razlom	3
9/ MELJ	KO-LOB-4	SODOBNI	4,5	krušenje robov, razmik in ugrez kosti	3
9/ MELJ	ST-SK-3	SODOBNI	4		0

M. PRILOGA – Primerjava rezultatov

Preglednica M.1: Povprečno zgoščevanje proda in melja v preizkusih 1–3.

PREIZKUS	POVPREČJE PROD (cm)	%	POVPREČJE MELJ (cm)	%	SKUPAJ	%
1	6,5	14,4	14,3	31,7	20,8	46,1
2	3,8	8,3	5	11,1	8,8	19,4
3	1,8	3,9	5,8	12,8	7,5	16,7

Preglednica M.2: Povprečno zgoščevanje proda in melja v preizkusih 4–9.

PREIZKUS	POVPREČJE PROD (cm)	%	POVPREČJE MELJ (cm)	%	SKUPAJ (cm)	%
4	5,5	12,2	6,5	14,4	12,0	13,3
5	3,3	7,2	11,5	25,6	14,8	16,4
6	4,8	10,6	5,5	12,2	10,3	11,4
7	7,8	11,9	12,8	28,3	20,5	18,6
8	2,0	3,1	3,5	7,8	5,5	5,0
9	5,3	8,1	5,0	11,1	10,3	9,3

Preglednica M.3: Totalne napetosti (σ) v zemljini na opazovanih globinah pred obremenjevanjem.

PREIZKUS	σ (kPa) NA OPAZOVANIH GLOBINAH	
	PROD	MELJ
1	/	8,2
2	/	8,7
3	/	8,7
4	16,8	8,6
5	17,7	8,4
6	16,9	8,7
7	12,0	3,8
8	11,5	3,5
9	11,5	3,5

Preglednica M.4: Največje dosežene totalne napetosti (σ_{MAX}) v zemljini na opazovanih globinah med obremenjevanjem.

PREIZKUS	σ_{MAX} (kPa) NA OPAZOVANIH GLOBINAH	
	PROD	MELJ
1	/	78,0
2	/	64,6
3	/	36,4
4	52,3	57,8
5	58,0	64,1
6	39,5	38,9
7	52,3	59,5
8	35,1	36,3
9	51,7	59,2

Preglednica M.5: Spremembe totalnih napetosti ($\Delta\sigma$) v zemljinah na opazovanih globinah med obremenjevanjem.

PREIZKUS	Δ PROD (kPa)	%	Δ MELJ (kPa)	%
1	/	/	69,9	89,5
2	/	/	55,9	86,5
3	/	/	27,7	76,1
4	35,5	61,5	49,2	85,1
5	40,3	62,9	55,7	86,9
6	22,6	58,1	30,2	77,6
7	40,3	67,7	55,7	93,6
8	23,7	65,2	32,8	90,3
9	40,3	68,0	55,7	94,0

Preglednica M.6: Povprečni premiki vodoravno in navpično nameščenih preizkušancev v preizkusih 1–3.

PREIZKUS	POVPREČJE VODORAVNI PREIZKUŠANCI (cm)	POVPREČJE NAVPIČNI PREIZKUŠANCI (cm)
1	11,2	8,8
2	4,2	4,75
3	4,4	1,2

Preglednica M.7: Povprečni premik preizkušancev v produ in melju v preizkusih 4–9.

PREIZKUS	POVPREČJE PROD (cm)	POVPREČJE MELJ (cm)
4	3,9	6,7
5	1,9	5,1
6	5,3	3,2
7	4,4	9,1
8	- 0,9	3,7
9	1,4	3,7

Preglednica M.8: Ostanek deformacij v železnih preizkušancih po koncu razbremenjevanja.

PREIZKUS/PLAST	TLAK %	NATEG %
4 PROD		14,0
4 MELJ		56,0
5 PROD	100	
5 MELJ		100
6 PROD		39,2
6 MELJ	17,9	
7 PROD	22,3 ⁴⁷	
7 MELJ	ni podatka	ni podatka
8 PROD		4,8
8 MELJ		20,4
9 PROD		20,6
9 MELJ	31,2	

⁴⁷ Zaradi tehničnih težav deformacij med razbremenjevanjem nismo merili, tako da so navedene največje ugotovljene deformacije. Kljub temu, da je zaradi odsotnosti podatka o preostalih deformacijah neposredna primerjava podatkov nemogoča, navedbe vrednosti služijo kot orientacija o velikosti v preizkušancu nastalih deformacij.

Preglednica M.9: Ostanek deformacij v bronastih preizkušancih po koncu razbremenjevanja.

PREIZKUS/PLAST	TLAK %	NATEG %
4 L1		100
4 L2	44,3	
5 L1		32,8
5 L2	11,9	
6 L1	100	
6 L2	1,5	
7 L1		21,2*
7 L2	16,4*	
8 L1	28,9	
8 L2		12,4
9 L1		14,9
9 L2	1,0	

Preglednica M.10: Ostanek deformacij v lobanjah po koncu razbremenjevanja.

PREIZKUS/PLAST	TLAK %	NATEG %
5L1	4,6	
5L2 min	78,0	
5L2 max		52,5
6L1 min	100	
6L1 max		100
6L2 min	23,4	
6L2 max	2,6	
9L1 min	45,7	
9L1 max		63,8
9L2 min	14,3	
9L2 max		24,9

Preglednica M.11: Ostanke deformacij v lopaticah po koncu razbremenjevanja.

PREIZKUS/PLAST	TLAK %	NATEG %
5 PROD min	14,8	
5 PROD max		8,0
5 MELJ min	66,9	
5 MELJ max		31,5
6 PROD min	51,6	
6 PROD max		71,2
6 MELJ min	72,4	
6 MELJ max		38,7
7 PROD min	32,3*	
7 PROD max		17,9*
7 MELJ min	85,0*	
7 MELJ max		31,1*
8 PROD min	57,9	
8 PROD max		100
8L MELJ min	57,9	
8 MELJ max		6,4
9 PROD min	100	
9 PROD max		28,5
9 MELJ min	12,2	
9 MELJ max		7,9

Preglednica M.12: Ostanke deformacij v keramičnih preizkušancih po koncu razbremenjevanja.

PREIZKUS/PLAST	TLAK %	NATEG %
4 PROD min	7,8	
4 PROD max		5,4
4 MELJ min	26,7	
4 MELJ max		2,4
5 PROD min	66,7	
5 PROD max		15,1
5 MELJ min	100	
5 MELJ max		100
6 PROD min	44,4	
6 PROD max		9,3
6 MELJ min	26,7	
6 MELJ max		1,2
7 PROD min	266,7*	
7 PROD max		80,5*
7 MELJ min	128,9*	
7 MELJ max	23,3*	
8 PROD min	54,4	
8 PROD max		9,3
8 MELJ min	16,7	
8 MELJ max	7,8	
9 PROD min	37,8	
9 PROD max		2,4
9 MELJ min	28,9	
9 MELJ max		17,1

Preglednica M.13: Vrednosti napetosti in deformacij ob nastanku poškodb na steklenih preizkušancih.

PREIZKUS/PLAST	σ (MPa)	ε (‰)	σ_{POV} (kN/m ²)
4 MELJ min	-5,68	-0,63	135
4 MELJ max	12,32	0,19	135
5 PROD min	-6,20	-0,10	95
5 PROD max	9,95	0,15	95
5 MELJ min	-33,44	-0,45	220
5 MELJ max	-14,64	-0,15	220
6 PROD min	-6,53	-0,10	135
6 PROD max	6,92	0,12	135
6 MELJ min	-98,80	-1,31	100
6 MELJ max	11,89	0,34	100
7 MELJ min	-1,10	-0,01	190
7 MELJ max	-0,77	-0,01	190

Preglednica M.14: Preostale deformacije v steklenih preizkušancih po koncu razbremenjevanja.

PREIZKUS/PLAST	TLAK %	NATEG %
4 PROD min	0,8	
4 PROD max		0,4
4 MELJ min	54,3	
4 MELJ max		7,8
5 PROD min	1,5	
5 PROD max		2,7
5 MELJ min	13,9	
5 MELJ max		100
6 PROD min	8,8	
6 PROD max		4,9
6 MELJ min	100	
6 MELJ max	11,2	
7 PROD min	1,6*	
7 PROD max		0,7*
7 MELJ min	1,2*	
7 MELJ max		1,8*
8 PROD min	4,2	
8 PROD max		2,4
8 MELJ min	4,2	
8 MELJ max		1,6
9 PROD min	62,9	
9 PROD max		29,4
9 MELJ min	6,0	
9 MELJ max		1,6

Prepustnost zemljin je določena s koeficientom vodoprepustnosti (k), ki se od zemljine do zemljine razlikuje. V grobem je mogoče oceniti približno vrednost koeficienta glede na vrsto zemljine, pri čemer večji koeficient pomeni večjo prepustnost, ločnica med bolj in manj prepustnimi zemljinami pa je pri $k=10^{-7}$ (cm/s) (Preglednica N.1).

Preglednica N.1: Groba ocena prepustnosti glede na vrsto zemljine.⁴⁸

VRSTA ZEMLJINE	k (cm/s)
čisti gramoz	100 – 1
debel pesek, peščen gramoz	$1-10^{-2}$
droben pesek, peščen melj	$10^{-2}-10^{-3}$
melj, zaglinjen melj	$10^{-3}-10^{-5}$
glina	$< 10^{-6}$

Nekoliko natančnejše vrednosti je z uporabo Hazenove (Hazen 1892) ali USBR⁴⁹ enačbe mogoče izračunati na osnovi zrnivosti:

$$k(\text{cm/s}) = 1,16d_{10}^2(\text{mm}) \text{ ali } k(\text{cm/s}) = 0,36d_{20}^{2,3}.$$

Za laboratorijsko izmero prepustnosti služita edometrski preizkus s spremenljivim hidravličnim padcem, ki je uporaben predvsem za manj prepustne zemljine, in permeametrski preizkus s konstantnim hidravličnim padcem, ki je primeren za bolj prepustne zemljine. Ker je lahko izmera v laboratoriju precej nezanesljiva, je priporočljiva tudi izvedba terenskih preiskav s črpalnim, nalivalnim ali disipacijskim preizkusom s konusnim penetrometrom (CPT). Pri črpalnem preizkusu iz vodnjaka črpamo vodo vse do vzpostavitve stacionarnega toka, vodoprepustnost zemljin pa je določena s pomočjo merjenja nižanja vode v odvisnosti od časa. Pri nalivalnem preizkusu cev vodnjaka zapolnimo z vodo, izmerimo začetno gladino vodostaja (H_0) in merimo spremembo gladine skozi čas. CPT preizkus deluje z vtiskovanjem sonde v tla, ustavljanjem sonde na želenih globinah ter izmerah pornege tlaka v odvisnosti od časa.⁵⁰

Preiskovanje deformabilnosti in trdnosti zemljin poteka z laboratorijskimi in terenskimi raziskavami. Laboratorijske preiskave deformabilnosti izvajamo z edometrom, ki omogoča vpogled v odnos med napetostmi in deformacijami v osnosimetričnem napetostnem in linearnem deformacijskem stanju (brez bočnih deformacij). Končni rezultat je modul stisljivosti oz. ocena posedanja posameznih plasti tal skozi čas. Ker je edometer primeren le za koherentne zemljine, so za izračun modula stisljivosti nekoherentnih grobozrnatih zemljin potrebne terenske preiskave. Laboratorijske preiskave trdnosti zemljin ter odnosa med napetostmi in deformacijami temeljijo na triosnih preiskavah. Triosna drenirana preiskava poteka s tlačnim obremenjevanjem vzorca v triosnem aparatu, pri čemer je napetostno in deformacijsko stanje osnosimetrično, opazujemo pa skrčke vzorca in spremembo prostornine v izbranih napetostnih stanjih. Triosna nedrenirana preiskava poteka podobno kot drenirana, razlika je le v zaprtosti drenaž in tako preprečenih volumskih deformacijah vzorca. Preizkusa omogočata pridobitev kompresijskega (K) in strižnega (G) modula ter

48 <http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/kmtal-gradiva/Gradiva%20za%20vec%20predmetov/Skripta%20Janko%20Logar/TE-RENSKE%20PREISKAVE.pdf>.

49 United States Bureau of Reclamation Standards.

50 <http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/kmtal-gradiva/Gradiva%20za%20vec%20predmetov/Skripta%20Janko%20Logar/TE-RENSKE%20PREISKAVE.pdf>; <http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/kmtal-gradiva/Gradiva%20za%20vec%20predmetov/MT%20-%20FIZIKALNE%20LASTNOSTI.pdf>; Das in Baaranja 2003.

nadaljnji izračun deformacijskih parametrov modula elastičnosti (E) in Poissonovega količnika (ν) zemljine (Preglednica N.2).

Preglednica N.2: Groba ocena modula stisljivosti in Poissonovega količnika za različne vrste zemljin (Das in Baaranja 2003, 352, Preglednici 11.4, 11.5).

VRSTA ZEMLJINE	E (kN/m ²)	ν
Mehka glina	1.800–3.500	0,15–0,25
Trda glina	6.000–14.000	0,2–0,25
Rahel pesek	10.000–28.000	0,2–0,4
Gost pesek	35.000–70.000	0,3–0,45

Terenske preiskave deformabilnosti in trdnosti zemljin potekajo s pomočjo standardnega penetracijskega (SPP), konusnega penetracijskega (CPT), presiometriškega ali dilatometriškega preizkusa. SPP je primeren predvsem za nekoherentne zemljine in poteka s spuščanjem uteži iz višine v tla ter štetjem udarcev do dosega predpisane globine (30 cm) ali z izmero penetracije po določenem številu udarcev (50). CPT je primeren za koherentne in nekoherentne zemljine. Ker ne omogoča neposredne pridobitve mehanskih parametrov zemljin, je običajno v uporabi zgolj kot drugim terenskim in laboratorijskim spremljajoča preiskava. Izvedba preizkusa poteka z vtiskovanjem sonde v tla s konstantno hitrostjo (2 cm/s) vse do trdne podlage ter s sočasno meritvijo odpora proti penetraciji, odpora ob plašču sonde in pornega tlaka. Presiometriška preiskava je primerna za koherentne in nekoherentne zemljine. Temelji na razširitvi cilindrične sonde v vnaprej izvrtani vrtini in sočasnem beleženju tlaka v sondi, potrebnega za deformacijo in porušitev obodne zemljine. Dilatometriški preizkus je primeren predvsem za finostrnate zemljine in je zaradi uporabe v pričujoči raziskavi natančneje opisan pri poglavju o izvedenih preiskavah.

Zahvale

Objava te knjige predstavlja zaključek dolgoletnega raziskovalnega procesa, katerega uspeh ni bil mogoč brez strokovne podpore, dragocenih nasvetov in pomoči številnih posameznikov, ki so pomembno prispevali k oblikovanju te raziskave.

V prvi vrsti se moram iskreno zahvaliti prof. dr. Predragu Novakoviću in prof. dr. Vlatku Bosiljkovu, ki sta kot mentorja doktorske disertacije, na kateri temelji pričujoča knjiga, verjela v moje zmožnosti ter sta me s svojo potrpežljivostjo, široko razgledanostjo in konstruktivno kritiko motivirala in usmerjala. Knjiga prav tako ne bi bila mogoča brez široke podpore celotne Arhejeve ekipe, ki me je vključila v svoje vrste ter z razumevanjem, odprtimi pogovori in podporo nudila edinstvene pogoje za delo ter karierni in osebni razvoj. Posebna zahvala gre Jašarju Skorupanu, ki mi je s svojo vsestranskostjo, praktičnostjo in širino močno olajšal izpeljavo številnih delov raziskave. Prav tako gre zahvala ekipama iz Katedre za preizkušanje materialov in Katedre za geotehniko Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, ki sta nesebično priskočili na pomoč z znanjem in opremo ter tako omogočili izvedbo preizkusov.

Prisrčna hvala tudi družini in prijateljem za sprejemanje moje odsotnosti in raztresenosti ter njihov posluh in neomajno podporo v času vseh vzponov in padcev. Verjetno ostaja dolg, ki ga ne bom mogla nikoli povsem poplačati.

Na koncu bi se želela zahvaliti Ministrstvu RS za Gospodarstvo, razvoj in tehnologijo ter Evropskemu socialnemu skladu, ki sta v raziskavi videla potencial ter tako preko Krepitve razvojnih oddelkov v podjetjih ter Inovativne sheme za sofinanciranje doktorskega študija finančno omogočila izvedbo projekta. Velika zahvala gre tudi programu Fulbright, ki mi je omogočil edinstveno izkušnjo raziskovanja in pridobivanja novih znanj na ameriški univerzi Quinnipiac v Connecticutu, mojemu tamkajšnjemu svetovalcu asist. prof. dr. Ariju Perez Mejii ter celotni ekipi oddelka za inženirstvo.