

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*

*Jamova 2, p. 3422  
1115 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si*



**VISOKOŠOLSKI  
STROKOVNI ŠTUDIJ  
GRADBENIŠTVA  
KONSTRUKCIJSKA SMER**

Kandidat:

**TADEJ COTELJ**

**Preiskave mulja iz Luke Koper za načrtovanje stabilizacije  
z globinskim mešanjem**

Diplomska naloga št.: 435/KS

**Investigation of silt from Port of Koper for the design of  
ground stabilisation using deep soil mixing**

Graduation thesis No.: 435/KS

**Mentor:**  
izr. prof. dr. Janko Logar

**Predsednik komisije:**  
doc. dr. Tomo Cerovšek

Ljubljana, 2011

## **IZJAVE**

Podpisani Tadej Cotelj izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom Preiskave mulja iz Luke Koper za načrtovanje z globinskim mešanjem.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 20. septembra 2011

Tadej Cotelj

## **IZJAVE OB PREGLEDU NALOGE**

Nalogo so si ogledali profesorji konstrukcijske smeri:

## **BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM**

<b>UDK:</b>	<b>624.01:622'156(497.4Luka Koper)(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Tadej Cotelj</b>
<b>Mentor:</b>	<b>izr. prof. dr. Janko Logar</b>
<b>Somentorica:</b>	<b>doc. dr. Karmen Fifer Bizjak</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Preiskave mulja iz Luke Koper za načrtovanje stabilizacije z globinskim mešanjem</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>145 strani, 52 preglednic, 45 slik, 22 grafikonov</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>globinsko mešanje, stabilizacija zemljine, cement, apno</b>

### **Izvleček**

V diplomski nalogi Preiskave mulja iz Luke Koper za načrtovanje stabilizacije z globinskim mešanjem so opisani uporaba, tehnologija in princip načrtovanja metode globinskega mešanja.

Povzeta so priporočila za izbiro veziva glede na tip zemljine, učinkovanje mineralnih veziv v zemljini in predvideno delovanje kompozitov tal.

Na osnovi preiskave zemljine je bilo predvideno delovanje veziv v zemljini in za namen potrditve predvidenega učinkovanja izdelan program preizkušanja. Po zgledu obstoječih procedur je bila zasnovana in uporabljena procedura priprave laboratorijskih vzorcev. V program je bilo vključena tudi primerjava metod hranjenja na končno trdnost stabilizirane zemljine.

Za oceno učinkovanja globinskega mešanja na zemljini iz Luke Koper in ovrednotenje vpliva hranjenja je bilo preiskovanih štirinajst receptur z različnimi vsebnostmi veziva (apno, cement, apno-cement). Pripravljenih in preizkušenih je bilo 99 vzorcev. Ugotovljen optimalen dodatek veziva pri uporabi metode suhega mešanja je cement z dodatkom pepela (C II/B-V 42,5) pri vsebnosti 16 %, glede na suho težo zemljine.

Z enoosnim tlačnim preskusom je merjena tlačna trdnost optimalne mešanice po 28 dneh 596 kPa in po 91 dneh 941 kPa. Na podlagi korelacij iz literature so bili za optimalno mešanico ocenjeni tudi ostali mehanski parametri, potrebni za načrtovanje.

## BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

**UDC:** 624.01:622'156(497.4Luka Koper)(043.2)  
**Author:** Tadej Cotelj  
**Supervisor:** Assoc. Prof. Janko Logar, Ph. D.  
**Co-supervisor:** Assist. Prof. Karmen Fifer Bizjak, Ph. D.  
**Title:** Investigations of silt from Port of Koper for the design of ground stabilisation using deep soil mixing  
**Notes:** 145 pages, 52 tables, 45 pictures, 22 graphs  
**Key words:** deep soil mixing, soil treatment, cement, lime

### Abstract

This diploma thesis entitled "Investigations of silt from Port of Koper for the design of ground stabilisation using deep soil mixing" describes the use, the technology employed and the design of deep soil mixing.

It summarises the recommendations for the use of binding agents depending on the type of soil, the effects of mineral binding agents within the soil and the behaviour of treated ground.

Based on basic soil properties of the silty clay from Port of Koper the effect of different binding agents was foreseen and the program of laboratory investigations was prepared. The specimen preparation procedure for the laboratory testing of soil was derived from existing procedures given in the literature. The investigation program involved also the effect of boundary conditions during ageing of individual specimens.

Fourteen different mix recipes, using various amounts of different binding agents (lime, cement, lime-cement), were tested to assess the effects of the deep soil mixing method on the soil from Port of Koper. 99 specimens were prepared and tested. The optimum quantity of added cement (C II/B-V 42,5) for the dry mixing method was found to be 16% with respect to the dry soil mass.

For the optimum cement-soil mixture the measured uniaxial compressive strength was 596 kPa and 941 kPa after 28 and 91 days, respectively. For the optimum mixture, the assessment of main material properties of improved soil, needed for the design purposes, was made based on correlations given in the literature.

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se svojemu mentorjuizr. prof. dr. Janku Logarju za strokovno pomoč in potrpežljivost pri nastajanju diplomske naloge. Zahvala tudi somentorici doc. dr. Karmen Fifer Bizjak in celotnemu osebju geotehničnega laboratorija, za omogočitev izvedbe laboratorijskih poskusov in za pomoč pri izvedbi praktičnega dela diplomske naloge.

Zahvalil bi se svoji dekletu Katarini za vso podporo, motivacijo in pomoč pri nastajanju ter urejanju diplomske naloge.

## KAZALO VSEBINE

<b>1</b>	<b>UVOD</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>METODA GLOBINSKEGA MEŠANJA ZEMLJINE</b>	<b>3</b>
2.1	Prednosti in pomanjkljivosti metode globinskega mešanja	5
2.2	Uporaba metode	8
2.3	Globoko suho mešanje s pregledom tehnologije	11
2.3.1	Oprema in izvedba	11
2.3.1.1	Japonska metoda	13
2.3.1.2	Skandinavska metoda	13
2.4	Globoko mokro mešanje z opisom tehnologije	14
2.4.1	Oprema in izvedba	15
2.5	Kombinirano "jet" in mehanično mešanje	18
2.6	Plitvo mešanje	21
2.6.1	Stabilizacija bloka zemljine	22
2.7	Ekonomski vidik	24
<b>3</b>	<b>UČINKOVANJE VEZIV V ZEMLJINI</b>	<b>25</b>
3.1	Reakcije veziv v zemljini	25
3.1.1	Vplivi na učinkovanje stabilizacije zemljine z vezivi	26
3.1.1.1	Vrsta zemljine	26
3.1.1.2	Kemijske reakcije v zemljini	26
3.1.1.3	Organske snovi	28
3.2	Reakcije učinkovanja veziv	28
3.2.1	Apno	29
3.2.1.1	Potek pridobivanja trdnosti	29
3.2.2	Cement	30
3.2.3	Vplivi na pridobivanje trdnosti cementne stabilizacije	31
3.2.4	Dodatki	33
3.2.4.1	Dodatki pri stabiliziranju gline in melja	33
3.2.4.2	Dodatki pri stabiliziranju šote in mulja	33
3.2.4.3	Elektrofiltrski pepel	34
3.2.4.4	Granulirana plavžna žindra	34
3.3	Izbira veziva	34
3.3.1	Časovno priraščanje trdnosti stabilizirane zemljine	34
3.3.2	Priporočila za uporabo apna	37
3.3.2.1	Učinkovanje mešanja zemljine	37
3.3.2.2	Priporočene vsebnosti veziva	37
3.3.2.3	Ocena časovnega prirastka trdnosti apna	37

---

3.3.3	Priporočila za uporabo cementa	38
3.3.3.1	Učinkovanje mešanja zemljine	38
3.3.3.2	Priporočene vsebnosti veziva	38
3.3.3.3	Ocena časovnega prirastka trdnosti cementa	39
3.3.4	Priporočila za uporabo apno-cementa	39
3.3.4.1	Priporočene vsebnosti veziva	40
3.3.5	Priporočila za izbiro vrste veziva, glede na vrsto zemljine	40
3.3.5.1	Ahnberg (2006)	40
3.3.5.2	EuroSoilStab (2002)	41
3.3.5.3	Topolnicki (2004)	42
3.3.5.4	Neorganske zemljine	43
3.3.5.5	Organske zemljine	44
3.3.5.6	Šota	44
3.4	Vpliv razmerja med celotno vodo in zemljino na trdnost	45
3.4.1	Optimalna vlažnost mešanice ( $w_{tot,opt}$ ) v glinah, stabilizirane s cementom	49
3.4.1.1	Enačbe	49
3.4.2	Pregled karakteristik glin, stabiliziranih s cementom, glede na razmerje med skupno vsebnostjo vode v mešanici in mejo židkosti	50
3.4.2.1	Mehka glina Bangkok clay	50
3.4.2.2	Židka glina Ariake clay	53
3.4.2.3	Priporočilo za mešanice v Luki Koper	54
<b>4</b>	<b>EKSPERIMENTALNI DEL</b>	<b>56</b>
4.1	Karakteristike osnovne zemljine iz Luke Koper	56
4.1.1	Priporočene preiskave osnovne zemljine za namen globinske stabilizacije	57
4.1.1.1	Priporočeni parametri za klasifikacijo osnovne zemljine	58
4.1.1.2	Mehanske lastnosti zemljine	58
4.1.1.3	Priporočeni parametri kemijskih lastnosti zemljin	58
4.1.1.4	Priporočeni parametri za določitev okoljskih lastnosti	58
4.1.2	Pregled geotehničnih razmer v Luki Koper	58
4.1.2.1	Referenčne lastnosti na pomolu I Luke Koper	59
4.1.3	Laboratorijske preiskave zemljine	61
4.1.3.1	Odvzem in priprava zemljine za preskuse	61
4.1.3.2	Lastnosti preiskovane zemljine	61
4.2	Izbira veziva in pričakovane reakcije ter učinkovanje različnih veziv z zemljino iz Luke Koper	66
4.2.1	Vplivi lastnosti zemljine na pridobivanje trdnosti	67
4.2.1.1	pH	67
4.2.1.2	Organske snovi	67



4.2.1.3	Zrnavostna porazdelitev	68
4.2.2	Učinkovanje veziva glede na vrsto zemljine	68
4.2.2.1	Apno	68
4.2.2.2	Cement	68
4.2.3	Cement z dodatki	68
4.2.3.1	Dodatki	69
4.2.3.2	Apno-cement	69
4.2.4	Priporočene količine veziv	70
4.3	Vsebnost vode	70
4.3.1	Povzetek ugotovitev iz literature, navedenih v poglavju 3.4.1	71
4.3.2	Optimalna vlažnost mešanice cementa in zemljine iz Luke Koper	71
4.4	Procedura priprave laboratorijskega vzorca za simulacijo metode globinskega mešanja zemljine iz Luke Koper	71
4.4.1	Pregled procedur laboratorijske priprave vzorca	71
4.4.1.1	Ugotovitve in povzetek priporočil	74
4.4.2	Postopek načrtovanja priprave preizkušancev	74
4.4.2.1	Podroben postopek načrtovane priprave preizkušancev	74
4.4.2.2	Preizkus načrtovane priprave preizkušancev	75
4.4.3	Podroben uporabljen postopek priprave preizkušancev	76
4.4.3.1	Predvideno hranjenje vzorcev	77
4.4.3.2	Oprema	78
4.4.3.3	Izbira dimenzij vzorca	79
4.4.3.4	Priprava veziva	79
4.4.4	Uporaba postopka priprave	80
4.4.5	Pomen in uporaba	80
4.4.6	Zemljina	80
4.5	Program preiskav	80
4.5.1	Označevanje mešanic in preizkušancev	81
4.5.2	Priprava programa laboratorijskih preiskav stabilizirane zemljine	82
4.5.2.1	Preizkusne preiskave načrtovane priprave preizkušancev, izbira optimalne vrste cementa	83
4.5.2.2	Izbira optimalnega masnega razmerja apno cementa pri apno-cementni stabilizaciji	85
4.5.3	Analiza in ugotovitve načrtovanja programa laboratorijskih preiskav stabilizirane zemljine	88
4.5.4	Program laboratorijskih preiskav stabilizirane zemljine	89
4.6	Preiskave mešane zemljine	91
4.6.1	Osnovne preiskave	92

---

4.6.1.1	Žgano apno, CL 90 Q	93
4.6.1.2	Cement, C II/B-V 42,5	97
4.6.1.3	Žgano apno, CL 90 Q in cement C II/B-V 42,5 v masnem razmerju apno-cement 0,25/0,75	101
4.6.2	Analiza povprečnih rezultatov mešanic z različnimi vrstami veziv pri različnih vsebnostih	104
4.6.3	Dodatne preiskave – vpliv hranjenja	107
4.6.3.1	Označevanje v grafikonih in preglednicah	108
4.6.3.2	Apno; CL 90 Q (A9)	109
4.6.3.3	Cement; C II/B-V 42.5 (13 %)	112
4.6.3.4	Apno Cement; CL 90 Q, II/B-V 42.5 (14 odstotkov)	115
4.6.4	Analiza povprečnih rezultatov mešanic z različnimi vrstami veziv in vsebnosti in z različnim hranjenjem	117
4.6.5	Zaključki	119
4.6.5.1	Priporočila za nadaljnje preiskave	120
4.7	Ocena vrednosti mehanskih parametrov stabilizirane zemljine iz Luke Koper na podlagi rezultatov enoosnih tlačnih preiskav	121
4.7.1	Ocena pričakovanih vrednosti $q_u$ na terenu za mešanico zemljina/cement (C II/B-V 42-5)/voda = 1.00/0.16/0.47	121
4.7.1.1	Korelacija laboratorijskih in terenskih vrednost	121
4.7.1.2	Interpretacija trdnosti laboratorijskih preizkušancev	122
4.7.1.3	Ocena pričakovane vrednosti enoosne tlačne trdnosti ( $q_{u,ter}$ ) na terenu	123
4.7.2	Ocene mehanskih lastnosti na terenu	124
4.7.2.1	Ocena nedrenirane strižne trdnosti ( $T_u$ )	124
4.7.2.2	Ocena modula stisljivosti (M)	126
4.7.2.3	Ocena modula elastičnosti ( $E_{50}$ )	128
4.7.2.4	Ocene propustnosti (k)	131
4.7.3	Pregled pričakovanih inženirskih parametrov pri stabiliziranju s 16 % suhega cementa (C II/B-V 42,5) na terenu	132
4.7.4	Priporočila za načrtovanje	133
4.7.4.1	Geometrija izvedbe kolov globinskega mešanja	133
4.7.4.2	Vgradnja	136
4.7.4.3	Princip temeljenja in sistem izboljšanja zemljine	138
<b>5</b>	<b>ZAKLJUČEK</b>	<b>141</b>
<b>VIRI</b>		<b>143</b>

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Klasifikacija globinskega mešanja glede na I. stanje veziva, II. princip stabiliziranja, III. lokacijo dodajanja veziva in IV. primeri metod tehnologije (Topolnicki, 2004).	5
Preglednica 2: Pregled prednosti in pomanjkljivosti metode globinskega mešanja (Topolnicki, 2004; EuroSoilStab, 2002)	6
Preglednica 3: Primerjava drugih metod z metodo globinskega mešanja (EuroSoilStab, 2002)	7
Preglednica 4: Splošni podatki o tehnologiji (Topolnicki, 2004)	12
Preglednica 5: Pregled tehnologij mokrega mešanja (Topolnicki, 2004)	16
Preglednica 6: Reakcije, ki vplivajo na povečajne trdnosti (Janz, 2002).	29
Preglednica 7: Lastnosti različnih vrst materialov (Janz, 2002)	29
Preglednica 8: Povzetek dejavnikov, ki vplivajo na mešanico cementa in zemljine (Topolnicki, 2004).	32
Preglednica 9: Ocena časovnega prirastka trdnosti stabilizirane zemljine s prikazom časovnega naraščanja trdnosti v odstotkih, glede na končno trdnost (Janz, 2002).	37
Preglednica 10: Priporočene količine cementa pri stabilizaciji zemljin	38
Preglednica 11: Prikaz časovnega naraščanja trdnosti v odstotkih, glede na končno trdnost pri stabilizaciji gline s cementom (CDM Association of Japan, 1994).	39
Preglednica 12: Ocena učinkovanja veziva na trdnosti zemljine; – brez učinka ali slab učinek; * sorazmerno dober učinek; + dober učinek; ++ zelo dober učinek (Ahnberg; 1995)	40
Preglednica 13: Relativni prirastek trdnosti, glede na laboratorijske teste na skandinavskih zemljinah; +++ zelo dobro vezivo v večini primerov, ++ dobro vezivo v večini primerov, + dobro vezivo v nekaterih primerih, - neustrezno vezivov (EuroSoilStab, 2002)	42
Preglednica 14: Pričakovane končne trdnosti pri stabiliziranju zemljine s cementom na terenu v različnih zemljinah s priporočeno količino veziva, pričakovanimi končnimi trdnostmi in oceno propustnosti. Cementni faktor je vsebnost cementa na kubični meter stabilizirane zemljine (kg/m <sup>3</sup> ) (Topolnicki, 2004).	43
Preglednica 15: Pregled stabiliziranja šot s cementnim vezivom	44
Preglednica 16: Lastnosti preizkušane gline (Soralumpa, 1996)	47
Preglednica 17: Osnovne lastnosti Bangkok clay (Lorenzo, 2006).	51
Preglednica 18: Priporočena vsebnost vode in veziva, glede na $w_L$ (LCM, Gothenburg)	55
Preglednica 19: Priporočeni parametri za klasifikacijo osnovne zemljine (EuroSoilStab, 2002)	58
Preglednica 20: Značilne mehanske lastnosti sloja morske gline (Logar, 2009)	59
Preglednica 21: Pregled lastnosti zemljine iz Luke Koper	62
Preglednica 22: Osnovni podatki edometriškega preskusa s postopnim obremenjevanjem zemljine iz Luke Koper	64

Preglednica 23: Osnovni podatki edometriškega preskusa s postopnim obremenjevanjem zemljine iz Luke Koper	66
Preglednica 24: Priporočene količine stabiliziranje s cementom, glede na vrsto zemljine.	70
Preglednica 25: Pregled priporočenih vrednosti $w_{tot,opt}$	71
Preglednica 26: Povzetek laboratorijskih priprav vzorca za simulacijo metode globinskega mešanja z opisom kalupov, tipov mešalnikov in pogojev hranjenja	72
Preglednica 27: Povzetek laboratorijskih priprav vzorca za simulacijo metode globinskega mešanja s povzetkom procedure in korelacijami z vrednostmi na terenu	73
Preglednica 28: Izračun vsebnosti vode za mešanje s cemento pasto.	76
Preglednica 29: Rezultati enoosnih preiskav stabiliziranja z različnimi tipi cementa; 1,00/C17/0,64; po 28 dneh hranjenja	83
Preglednica 30: Rezultati enoosnih poskusov z različnim razmerjem apna (CL 90 Q) in cementa (C II/B-V 42,5); mešanica 1,00/AC11/0,47; po 28 dneh hranjenja	85
Preglednica 31: Rezultati enoosnih poskusov z različnim razmerjem apna (CL 90 Q) in cementa (C II/B-V 42,5); mešanica 1,00/AC11/0,47; po 91 dneh hranjenja	85
Preglednica 32: Pregled programa preiskav laboratorijsko stabilizirane zemljine.	91
Preglednica 33: Pregled programa preiskav laboratorijsko stabilizirane zemljine.	91
Preglednica 34: Rezultati enoosnih poskusov mešanic z različno vsebnostjo apna; mešanica 1,00/A/0,47; po 28 dneh hranjenja.	95
Preglednica 35: Rezultati enoosnih poskusov mešanic z različno vsebnostjo apna; mešanica 1,00/A/0,47; po 91 dneh hranjenja.	95
Preglednica 36: Rezultati enoosnih poskusov mešanic z različno vsebnostjo cementa; mešanica 1,00/C/0,47; po 28 dneh hranjenja.	99
Preglednica 37: Rezultati enoosnih poskusov mešanic z različno vsebnostjo cementa; mešanica 1,00/C/0,47; po 91 dneh hranjenja.	100
Preglednica 38: Podatki iz enoosnih poskusov mešanic z različno vsebnostjo apno cementa, mešanica 1,00/AC/0,47; po 28 dneh hranjenja.	103
Preglednica 39: Rezultati enoosnih poskusov mešanic z različno vsebnostjo apno cementa; mešanica 1,00/AC/0,47; po 91 dneh hranjenja.	104
Preglednica 40: Povprečne vrednosti trdnosti in porušne deformacije pridobljene z enoosnimi preiskavami mešanic in primerjava vrednosti $q_u$ ; po 28 in 91 dneh hranjenja	105
Preglednica 41: Rezultati enoosnih preiskav mešanice z 9-odstotno vsebnostjo apna (CL 90 Q) pri različnem hranjenju, hranjenje z dostopom do vode na dnu vzorca ( $hr_1$ ), brez dostopa zraka in hranjenje brez dostopa vode in zraka ( $hr_2$ ); mešanica 1,00/A9/0,47; po 28 in po 91 dneh hranjenja	111
Preglednica 42: Rezultati enoosnih preiskav mešanice s 13-odstotno vsebnostjo cementa (C II/B-V 42.5) pri različnem hranjenju, hranjenje z dostopom do vode na dnu vzorca (I), brez dostopa zraka in hranjenje brez dostopa vode in zraka (II); mešanica 1,00/C13/0,47; po 28 in po 91 dneh hranjenja.	114
Preglednica 43: Podatki enoosnih preiskav mešanice s 14-odstotno vsebnostjo apno (CL 90 Q) cementa (C II/B-V 42.5) v razmerju 0.25/0.75 pri različnem hranjenju: hranjenje z	

dostopom do vode na dnu vzorca (I), brez dostopa zraka in hranjenje brez dostopa vode in zraka (II); mešanica 1,00/C14/0,47; po 28 in 91 dneh hranjenja.	117
Preglednica 44: Povprečne vrednosti $q_u$ (kPa) mešanic A9, AC14 in C13; mešanic 1,00/A9/0,47, 1,00/AC14/0,47 in 1,00/C13/0,47; po 28 in po 91 dneh hranjenja.	118
Preglednica 45: Priporočene korelacije laboratorijskih in terenskih vrednosti tlačne trdnosti	122
Preglednica 46: Podatki iz enoosnih poskusov mešanic zemljina/(C II/B-V 42,5)/voda = 1,00/0,16/0,47	122
Preglednica 47: Ocena pričakovane vrednosti $q_u$ mešanice C16 in $v = 47$ odstotkov	123
Preglednica 48: Priporočene korelacije za oceno modula stisljivosti	126
Preglednica 49: Priporočene vrednosti korekcijskega faktorja $f$ za oceno $p'_c$ različnih avtorjev	127
Preglednica 50: Priporočene vrednosti modula elastičnosti ( $E_{50}$ ) različnih avtorjev	129
Preglednica 51: Ocena modula elastičnosti mešanice s 16 odstotki cementa (C II/B-V 42,5)	131
Preglednica 52: Pregled pričakovanih inženirskih parametrov na terenu pri stabilizaciji s 16 odstotki cementa (C II/B-V 42,5)	132

## KAZALO SLIK

Slika 1: Prikaz osnovne mehanizacije za izvedbo globinskega mešanja (Topolnicki, 2004; Larsson, 2003)	2
Slika 2: Shematičen prikaz vgradnje apneno-cementnih kolov po skandinavski metodi (Broms, 2004)	4
Slika 3: Primeri uporabe metode globinskega mešanja (Topolnicki, 2004, str. 378)	8
Slika 4: Prikaz izvedbe globinskega mešanja za povečanje globalne varnosti in tesnenja (Topolnicki, 2004, str. 380–382)	10
Slika 5: Mešalna oprema metode DJM: mešalno orodje premera 1,0 m, modificirana izvedba ima premer 1,3 m (Topolnicki, 2004).	13
Slika 6: Izbrana mešalna orodja Skandinavske metode: a) SD 600 mm; b) modificiran SD 600 mm; c) PB3 600 mm; d) šotni mešalec 800 mm (Apneno-cementna metoda ali LCM) (EuroSoilStab, 2002)	14
Slika 7: Tipično mešalno orodje: a) dvoosni standardni CDM 2 * 1,0 m (CDM); b) štirosojni CDM 4 * 1,0 m (CDM); c) triosni SMW 3 * 1,5 m; d) 0,9 m (Geo-Con-Inc.); f) troosni 3* 0,55 m (Bauer); h) enoosni 0,8 m (Keller); h) enoosni 2,4 m (Hayward Baker/Keller) (Larsson, 2003)	18
Slika 8: SWING z odprtimi rezili (Larsson, 2003)	19
Slika 9: Mešalno orodje JACKSMAN: a) primer dvojnih rezil; b) prikaz delovanja sistema XJET (Larsson, 2003; Topolnicki, 2004)	19
Slika 10: Primerjava izboljšane površine izdelane z JACSMAN in CDM metodo (Topolnicki, 2004)	20
Slika 11: TURBOJET oprema (Larsson, 2003)	20
Slika 12: Načina masovne stabilizacije: a) vertikalno mešanje; b) vertikalno in horizontalno mešanje (EuroSoilStab, 2004)	21
Slika 13: SM mešalno orodje, premer 3,7 m (Larsson, 2003)	22
Slika 14: Masovna stabilizacija (Axelsson, 1996)	23
Slika 15: Masovna stabilizacija, razvita v Skandinaviji (Larsson, 2003)	23
Slika 16: Oprema, uporabljena v projektu Fort Point Channel Site v Bostonu (Larsson, 2003).	24
Slika 17: Grob povzetek kemičnih reakcij in produktov, ki potekajo pri uporabi različnih veziv (Ahnberg, 2006, str. 19)	26
Slika 18: Vpliv ionske izmenjave (Janz, 2002)	27
Slika 19: Shematični prikaz pridobivanja trdnosti pri stabilizaciji gline z živim apnom (Broms, 2004, str. 256)	30
Slika 20: Učinek temperature na enoosno tlačno trdnost mešanice gline in cementa (Enami, 1985)	33
Slika 21: Prikaz pričakovanega prirastka trdnosti različnih veziv, mešanih z zemljino, s časom (Ahnberg; 1995).	35

Slika 22:	Trdnosti v odvisnosti od časa. Zemljine so iz Švedske (šota) in Finske. Oznake veziva: C – cement; M – plavžna žindra iz Švedske; V – elektrofiltrski pepel; H – elektrofiltrski pepel iz Finske; F – mavec; T – hidrirano apno z min. 505 Ca(OH) <sub>2</sub> ; L – žgano apno (CaO); K – plavžna žindra iz Finske; (Ahnberg, 2006).	36
Slika 23:	Enoosna tlačna trdnost s cementom mešane mehke glin Bangkok clay; po 28 dneh hranjenja (Udin, 1997)	39
Slika 24:	Merjene enoosne tlačne trdnosti laboratorijsko pripravljenih vzorcev različnih veziv in zemljin po 28 dneh pri vsebnosti veziva 100 kg/m <sup>3</sup> in z masnim razmerjem apno-cemetnega veziva 25/75 (Ahnberg, 1995)	41
Slika 25:	Razmerje med $w_{cr}$ in trdnostjo (krivulja se nanaša na beton) (Janz, 2002)	45
Slika 26:	Vpliv $w_{tot}$ v stabilizirani zemljini po 60 dneh (Endo, 1976)	46
Slika 27:	Trdnosti različnih vrst cementno stabiliziranih zemljin, ki so prikazane kot funkcija razmerja $w_{tot}/C$ , merjene po 28 dneh (Ahnberg, 1995).	46
Slika 28:	Primerjava tlačnih trdnosti zemljine z vmešavanjem različnih $w_{cr}$ cementne paste (Soralumpa, 1996)	48
Slika 29:	Shematičen prikaz vpliva vsebnosti celotne vode pri mešanju glin s cementom (Lorenzo, 2006)	49
Slika 30:	Rezultati enoosnih trdnosti mešanic Bangkok clay pri različni vsebnosti celotne vode in različnih vsebnostih cementa (Lorenzo, 2006)	51
Slika 31:	Rezultati preiskav stisljivosti mešanic Bangkok clay pri različni vsebnosti celotne vode in različnih vsebnostih cementa (Lorenzo, 2006)	52
Slika 32:	Trdnost cementno stabilizirane zemljine s prikazom $w_{tot,opt}$ (kot $C_w / LL$ ) po 28 dneh hranjenja (Lorenzo, 2006)	53
Slika 33:	Razvoj trdnosti cementno mešanih Ariake clay s časom, pri $w_{tot}$ je 1–2-krat $w_L$ ; C je vsebnost cementa v odstotkih, $w_c$ je $w_{tot}$ , (Horpibusuk, 2005).	54
Slika 34:	Sestava tal v prerezu pomolov; merilo višin je 10-krat merilo dolžin (Logar, 2009).	59
Slika 35:	Značilen profil tal v Luki Koper (JZ del pomola I.) s prikazom profila vlažnosti in leznih mej ter profilom nedrenirane strižne trdnosti. (Logar, 2009)	60
Slika 36:	Primerjava edometrijskih modulov $E_{oed}$ , dobljenih z dilatometrom in z laboratorijskimi preiskavami (JZ del pomola I) (Logar, 2009).	61
Slika 37:	Zrnavostna porazdelitev zemljine iz Luke Koper	63
Slika 38:	Slika uporabljenega hranjenja.	78
Slika 39:	Uporabljena oprema v pripravi preizkušancev.	79
Slika 40:	Razmerje vrhunske tlačne trdnosti $q_u$ in modula elastičnosti E50: a) Saito (1980); b) O`Rourke (1998)	130
Slika 41:	Primeri geometrijskih vzorcev globinskega mešanja: (a), (b) pravokotna in trikotna razporeditev; (c) stena dotikajočih kolov; (d) stena dotikajočih kolov; (e) stene dotikajočih kolov; (f) mreža sten dotikajočih kolov; (g) prekrivajoči koli v delni mreži; (h) tangentsna celica; (i) krog; (j) rešetka; (k) skupine kolov; (l) skupine kolov v stiku; (m) blok (Topolnicki, 2004, str.375).	134

- Slika 42: Primer ocene ploščinskega razmerja izboljšanja tal ( $a_p$ ); (a) običajna razporeditev kolov pri izvedbi mreže kolov ( $A$  = horizontalna ploščina vplivnega območja kola); (b) primer razporeditve kolov pod temeljno ploščo ( $A$  = ploščina temeljne plošče;  $A_c$  = horizontalni prerez kola,  $L$  in  $B$  = mera dolžin). (Topolnicki, 2004) 135
- Slika 43: Primeri izvedbe globinskega mešanja z različno dolžino kolov: (a) kombinacija dolgih in kratkih sten; (b) prehodno območje; (c) stopničasti koli; (d) nasip; (e) kombinacija stabiliziranja bloka zemljine in globokih kolov (Topolnicki, 2004). 136
- Slika 44: Mešalke za izvebo globinskega mešanja s horizontalnimi rezili (Larrson, 2003). 137
- Slika 45: Strižna odpoved skupine kolov v bloku 139



## KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1:	Rezultati edometerske preiskave zemljine iz Luke Koper, podane v logaritemskem merilu vertikalne napetosti, glede na količnik por.	64
Grafikon 2:	Rezultati edometerske preiskave zemljine iz Luke Koper	65
Grafikon 3:	Potek enoosnih poskusov mešanic z različnim tipom cementa; mešanica 1,00/C17/0,64; po 28 dneh hranjenja	84
Grafikon 4:	Potek enoosnih poskusov mešanic z različnim tipom cementa; mešanica 1,00/AC11/0,47; po 28 dneh hranjenja	86
Grafikon 5:	Potek enoosnih poskusov mešanic z različnim tipom cementa; mešanica 1,00/AC11/0,47; po 91 dneh hranjenja	87
Grafikon 6:	Pridobivanje trdnosti s časom, mešanice z različnim apno cementnim razmerjem; mešanica 1,00/AC11/0,47	88
Grafikon 7:	Potekov enoosnih preskusov mešanic z različno vsebnostjo apna ; mešanici 1,00/A7/0,47 in 1,00/A11/0,47; po 28 dneh hranjenja (* preskus ni bil izveden skladno s standardom).	93
Grafikon 8:	Potekov enoosnih preskusov mešanic z različno vsebnostjo apna ; mešanici 1,00/A7/0,47 in 1,00/A11/0,47; po 91 dneh hranjenja	94
Grafikon 9:	Potekov enoosnih preskusov mešanic z različno vsebnostjo cementa; mešanice 1,00/C7/0,47, 1,00/C10/0,47 in 1,00/C16/0,47; po 28 dneh hranjenja	97
Grafikon 10:	Potekov enoosnih preskusov mešanic z različno vsebnostjo cementa; mešanice 1,00/C7/0,47, 1,00/C10/0,47 in 1,00/C16/0,47; po 91 dneh hranjenja	98
Grafikon 11:	Potekov enoosnih preskusov mešanic z različno vsebnostjo apno cementa; mešanici 1,00/AC17/0,47 in 1,00/AC20/0,47; po 28 dneh hranjenja.	101
Grafikon 12:	Potekov enoosnih preskusov mešanic z različno vsebnostjo apno cementa; mešanici 1,00/AC17/0,47 in 1,00/AC20/0,47; po 91 dneh hranjenja	102
Grafikon 13:	Rezultati povprečnih vrednosti doseženih $q_u$ posameznih vsebnosti veziv; mešanica 1,00/vezivo/0,47); po 21 in po 91 dneh.	106
Grafikon 14:	Potek enoosnih preiskav mešanice z 9-odstotno vsebnostjo apna (CL 90 Q) pri različnem hranjenju, hranjenje z dostopom do vode na dnu vzorca ( $hr_1$ ), brez dostopa zraka in hranjenje brez dostopa vode in zraka ( $hr_2$ ); mešanica 1,00/A9/0,47; po 91 dneh hranjenja	109
Grafikon 15:	Potek enoosnih preiskav mešanice z 9-odstotno vsebnostjo apna (CL 90 Q) pri različnem hranjenju, hranjenje z dostopom do vode na dnu vzorca ( $hr_1$ ), brez dostopa zraka in hranjenje brez dostopa vode in zraka ( $hr_2$ ); mešanica 1,00/A9/0,47; po 91 dneh hranjenja	110
Grafikon 16:	Potek enoosnih preiskav mešanice s 13-odstotno vsebnostjo cementa (C II/B-V 42.5) pri različnem hranjenju, hranjenje z dostopom do vode na dnu vzorca (I), brez dostopa zraka in hranjenje brez dostopa vode in zraka (II); mešanica 1,00/C13/0,47; po 28 dneh hranjenja	112
Grafikon 17:	Potek enoosnih preiskav mešanice s 13-odstotno vsebnostjo cementa (C II/B-V 42.5) pri različnem hranjenju, hranjenje z dostopom do vode na dnu vzorca (I), brez	

dostopa zraka in hranjenje brez dostopa vode in zraka (II); mešanica 1,00/C13/0,47; po 91 dneh hranjenja	113
Grafikon 18: Potek enoosnih preiskav mešanice s 14-odstotno vsebnostjo apno (CL 90 Q) cementa (C II/B-V 42.5) v razmerju 0.25/0.75 pri različnem hranjenju: hranjenje z dostopom do vode na dnu vzorca (I), brez dostopa zraka in hranjenje brez dostopa vode in zraka (II); mešanica 1,00/C13/0,47; po 28 dneh hranjenja.	115
Grafikon 19: Potek enoosnih preiskav mešanice s 14-odstotno vsebnostjo apno (CL 90 Q) cementa (C II/B-V 42.5) v razmerju 0.25/0.75 pri različnem hranjenju: hranjenje z dostopom do vode na dnu vzorca (I), brez dostopa zraka in hranjenje brez dostopa vode in zraka (II); mešanica 1,00/C14/0,47; po 91 dneh hranjenja.	116
Grafikon 20: Prikaz povprečnih vrednosti $q_u$ mešanic A9, AC14 in C13; mešanice 1,00/A9/0,47, 1,00/AC14/0,47 in 1,00/C13/0,47; po 28 in po 91 dneh hranjenja.	118
Grafikon 21: Prikaz povprečnih doseženih trdnosti po času za mešanico s 16-odstotno vsebnostjo cementa C II/B-V 42,5 in vlažnostjo mešanice 47 odstotkov ; mešanica 1,00/0,16/0,47.	120
Grafikon 22: Prikaz dosežene trdnosti mešanic C16 (I), C13 (I), C13 (II) s časom: pričakovane vrednosti trdnosti C16 (II); C16-teren je grobo ocenjena vrednost tlačnih trdnosti na terenu; C16 (I) in C13(I) merjene vrednosti mešanic hranjeni z dostopom do vode	124

## KRATICE IN OKRAJŠAVE

GM	Metoda globinskega mešanja
MM	Metoda mokrega mešanja
SM	Metoda suhega mešanja
A	Žgano apno CL 90 Q
C	Cement (C II/B-V 42)
AC	Žgano apno (CL 90 Q) in cement (C II/B-V 42.5 N v masnem razmerju 25/75)
$A_v$	Zahtevana vsebnost cementa v odstotkih
SGI	Swedish Geotechnical Institute
$q_u$	Enoosna tlačna trdnost (kPa)
$q_{u,lab}$	Enoosna tlačna trdnost izmerjena v laboratoriju (kPa)
$q_{u,ter}$	Enoosna tlačna trdnost izmerjena na terenu (kPa)
$hr_1$	Metoda hranjenja preizkušancev z dostopom do vode
$hr_2$	Metoda hranjenja preizkušancev v zapečatenih pogojih
$T_{28, design}$	Referenčna vrednost trdnosti s cementom mešane zemljine, dosežene po 28 dneh hranjenja, pri uporabi razmerja $w_{tot}/C$ je 1,0
$a_p$	Razmerje površin, definirano z razmerjem ploščine prečnega prereza kola ali skupine kolov na ploščino vplivnega območja kola ali tlorisa objekta – delež stabilizirane zemljine v tleh
$w$	Naravna vlažnost zemljine, podana v odstotku glede na suho maso zemljine
$w_{cr}$	Vodo cementni faktor cementne paste glede na maso vode in cementa
$w_L$	Meja židkosti
$w_p$	Meja plastičnosti
$W_T$	Masa naravne zemljine
$w_{tot}$	Vsebnost celotne (naravne in dodane) vode v mešanici glede na suho maso zemljine
$w_{tot,opt}$	Optimalna vlažnost zemljine, izražena z deležem celotne voda glede na težo suhe zemljine.
$\Delta W_w$	Dodatna masa vode
E	Modul elastičnosti
$I_p$	Indeks plastičnosti

k	Prepustnost
M	Modul stisljivosti
ZDA	Združene države Amerike

## 1 UVOD

Zaradi vse večje urbanizacije je izbira področij za gradnjo omejena. Tako moramo graditi tudi na območjih, katerih smo se v preteklosti zaradi slabših pogojev v zemljini izogibali, na primer območjih prekritih z mehko glino, meljem ali šoto. Na takih območjih pogosto posegamo po metodah izboljšanja tal za prevzem obtežbe cest, železnic ali drugih objektov.

Ena od metod izboljšanja temeljnih tal, katere uporaba se danes v svetu povečuje, v Sloveniji pa je skorajda nepoznana, je metoda globinskega mešanja, pri kateri izboljšanje zemljine dosežemo z mehanskim mešanjem zemljine z dodanim vezivom (cement, apno in dodatki). Metode globinskega mešanja razlikujemo glede na način dodajanja veziva, ki je lahko dodano v obliki suhega praha ali v obliki vezivne paste (vezivo predhodno mešano z vodo). Glavni podvrsti metode globinskega mešanja sta torej metoda suhega in metoda mokrega mešanja.

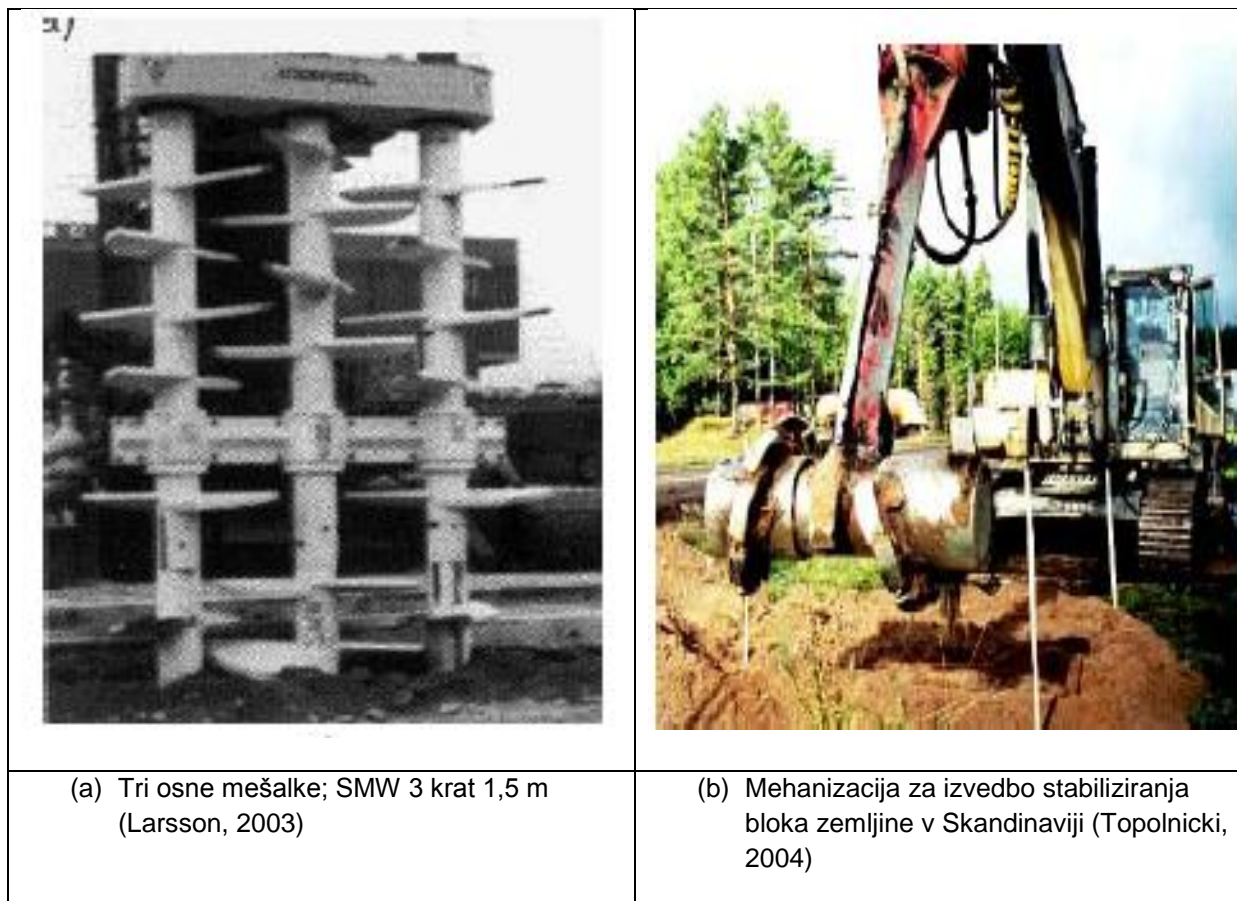
Prvotno je bila uporaba metode omejena na temeljenje objektov z zmanjšanjem posedkov, povečanjem nosilnosti temeljnih tal in preprečitve globalne porušitve tal. Z razvojem pa se je uporaba močno razširila in se danes uporablja za preprečitev utekočinjenja tal, gradnjo vodotesnih zapor v okoljskih projektih, povečanje globalne varnosti pri globokih vkopih, gradbenih jamah in drugih posegih v mehkih zemljinah.

Prvotno je bila skoraj hkrati na Japonskem in v Skandinaviji v sedemdesetih letih prejšnjega stoletja razvita metoda suhega mešanja, namenjena stabilizaciji gline z apnom in cementom. Uporaba metode suhega mešanja se je od svoji začetkov, na račun raziskav in izboljšav tehnologije, kar je posledične omogočilo boljšo in ekonomičnejšo izvedbo, močno razširila.

Metoda mokrega mešanja se je razvila šele v devetdesetih letih prejšnjega stoletja. Omogočila je uporabo metode v večjih globinah in v zemljinah z manjšo vlažnostjo in večjo trdnostjo. Njen razvoj je potekal bliskovito, danes pa je njena uporaba prisotna v skoraj vseh delih sveta. Najširša uporaba je zabeležena na Japonskem, kjer je dan največji prispevek k razvoju metode in izboljšavi tehnologije. Razvita je bila tudi tehnologija za uporabo metode pri izboljšanju morskega in rečnega dna.

Izvedba se glede na tehnologijo močno razlikuje. Prvotno je bila metoda namenjena izgradnji posameznih kolov stabilizirane zemljine z dodajanjem veziva med horizontalnim rotiranjem mešalk pritrjenih na vertikalni osi. V razvoju tehnologije so bila razvita orodja za izdelavo več kolov hkrati (slika 1a), prav tako je omogočena izdelava kolov večjih premerov, tudi do 3,2 m. Z napredkom tehnologije je bila razvita tudi možnost izdelave poševnih kolov in izvedba posebnih sider.

Razvit je bil tudi nov princip mešanja, pri katerem stabiliziramo blok zemljine, kar se lahko izvaja na dva načina: z izvedbo prekrivajočih se kolov ali s povsem novo tehnologijo, razvito v Skandinaviji, kjer se vezivo vnaša z vertikalnim rotiranjem mešalk (slika 1b), kjer smer gibanja mešalk ni omejena.



Slika 1: Prikaz osnovne mehanizacije za izvedbo globinskega mešanja (Topolnicki, 2004; Larsson, 2003)

V diplomski nalogi smo pregledali stanje znanj s področja globinskega mešanja zemljin ter pripravili in uresničili program raziskav učinka različnih veziv na vzorec mulja iz Luke Koper.

Drugo in tretje poglavje diplomskega dela predstavljata pregled literature. V drugem poglavju so opisane prednosti in pomanjkljivosti ter omejitve metode globinskega mešanja, podan je tudi prikaz možnih uporab. V nadaljevanju so podrobneje opisane metode izvedbe z pregledom tehnologij in ekonomski vidik izvedbe globinskega mešanja.

V tretjem poglavju opisujem teoretične osnove vplivov učinkovanja veziv glede na lastnosti zemljine. Opisane so osnovne reakcije veziv v zemljini ter vpliv lastnosti zemljine in vsebnosti vode v mešanici na učinkovanje posameznih veziv. Podana so priporočila za uporabo posameznih veziv s predvidenim priraščanjem trdnosti. Povzeta so tudi priporočila različnih avtorjev za izbiro veziva glede na vrsto zemljine.

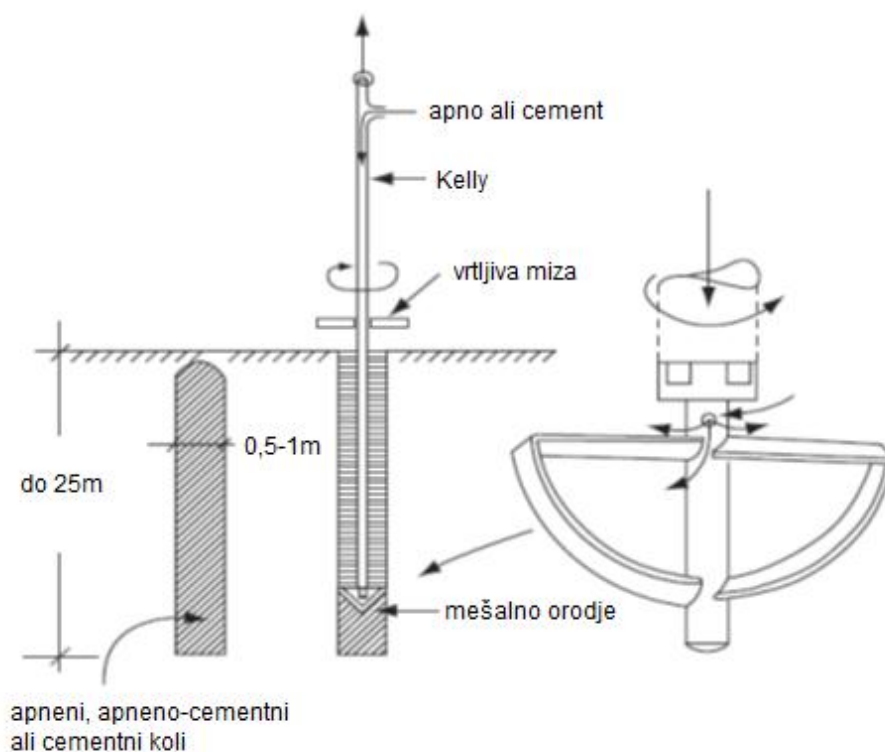
V četrtem poglavju je na podlagi analize učinkovanja veziv glede na lastnosti zemljine pripravljen program preizkušanja izbranega materiala iz Luke Koper. Namen programa je bil oceniti učinkovanje različnih veziv pri mešanju z izbrano zemljino in ovrednotenje vpliva različnega hranjenja preizkušancev do preiskave. Opisan je postopek priprave preizkušancev. V nadaljevanju so podani rezultati preiskav enoosne tlačne trdnosti vseh 99 preizkušancev skupno 14 različnih mešanic in analiza dobljenih rezultatov. Četrto poglavje zaključuje ocena pričakovanih vrednosti mehanskih parametrov izboljšane zemljine na terenu glede na izmerjene vrednosti enoosne tlačne trdnosti v laboratoriju. Podana so tudi priporočila za geotehnično načrtovanje s koli izboljšane zemljine.

## 2 METODA GLOBINSKEGA MEŠANJA ZEMLJINE

Uporaba metode globinskega mešanja (v nadaljevanju GM) za namen izboljšanja inženirskih in okoljskih lastnosti mehkih ali kontaminiranih tal ali kot alternativa globokemu temeljenju se je od svojih začetkov močno razširila in razvila. Metoda je bila razvita na Japonskem in v Skandinaviji v sedemdesetih letih prejšnjega stoletja, pravi razcvet pa je doživela v zadnjih dvajsetih letih, kar je pogojeno z izboljšanjem tehnologije gradnje in posledično boljšo in ekonomičnejšo izdelavo. Uporaba metode je danes zelo razširjena na Japonskem, v Skandinaviji in Združenih državah Amerike (v nadaljevanju ZDA), uporabo pa zasledimo tudi v južni Aziji, na Poljskem, v Franciji, Nemčiji, Veliki Britaniji, Italiji, Avstraliji, Novi Zelandiji, Indoneziji itd. To kaže na večanje mednarodnega interesa za sprejem te relativno nove in hitro razvijajoče se tehnologije.

Prvotno je bila skoraj hkrati na Japonskem in v Skandinaviji razvita metoda suhega mešanja (v nadaljevanju SM), namenjena stabilizaciji gline z apnom in cementom. Od tedaj so se razvile nove tehnologije in uporaba veziva se je razširila na uporabo različnih kombinacij veziv in dodatkov. Največji prispevek k širši uporabi veziv in možnosti uporabe metode v šotah in drugih organskih zemljinah je zagotovo prispeval Swedish deep stabilization research centre (v nadaljevanju SGI), kjer so bile opravljene mnoge preiskave na različnih mehkih zemljinah z različnimi vezivi. V devetdesetih letih prejšnjega stoletja je bila razvita metoda mokrega mešanja (v nadaljevanju MM), ki je danes prevladujoča metoda uporabe GM. Uporaba GM se je v zadnjem desetletju z razvojem tehnologije razširila tudi na uporabo v peskih in gramozih, predvsem v ZDA, čeprav je mnogo širša uporaba metode v mehkih koherentnih zemljinah.

Pri GM se koli vgrajujejo z mešanjem zemljine s horizontalno rotacijo mešalk, pritrjenih na vertikalno os mešalke, ki se vtiska v zemljino. Vezivo se v zemljino običajno vtiska skozi odprtini na osi mešalke. Možno je vgrajevanje več kolov hkrati, izdelava kolov različnih premerov, različne maksimalne dosežene globine in drugih detajlov tehnologij GM. Podrobnosti tehnologij in njihove omejitve so opisane v nadaljevanju drugega poglavja. Osnovna izvedba kolov je shematično prikazana na sliki 2.



Slika 2: Shematičen prikaz vgradnje apneno-cementnih kolov po skandinavski metodi (Broms, 2004)

Metoda se osnovno razdeli glede na stanje veziva pri vtiskanju na MM in SM. Uporaba je pogojena z vlažnostjo zemljine (v nadaljevanju  $w$ ). Z uporabo SM dosegamo višje tlačne trdnosti, in sicer v meljni glini od 1,7- do 3,2-krat večje v primerjavi z uporabo MM, kjer običajno dosegamo boljšo homogenost kolov (Broms, 2004). Izvedba SM je pogojena z vlažnostjo, običajna minimalna vlažnost za izvedbo SM je med 20 in 30 odstotki. Pri MM je običajen vodo/cementni faktor vezivne malte (v nadaljevanju  $w_{cr}$ ) med 0,6 in 1,3 (Broms, 2004). Mešanje je običajno lažje izvedljivo z MM kot s SM, posebej pri nizki naravni vlažnosti in visoki strižni trdnosti zemljine.

Glede na globino mešanja, delimo metodo na globoko mešanje, kjer običajno izdelujemo kole stabilizirane zemljine (trenutno se dosegajo globine do 50 metrov) in na površinsko mešanje, kjer se zemljina meša z vezivi le nekaj metrov globoko. V površinsko mešanje, po Topolnicki (2004), uvrščamo stabiliziranje od 3 do 12 m v globino. Površinsko mešanje se lahko izvede na dva načina, in sicer s tvorjenjem bloka stabilizirane zemljine z instalacijo vertikalnih prekrivajočih se kolov z gibanjem rotacijskega orodja gor in dol kot pri globokem mešanju. Pri tej metodi je ekonomično uporabljati velike premere kolov z več mešalkami. Druga možnost izvedbe je uporaba novejših tehnologij, kjer se uporabljajo različne nastavke mešalk. Pri tej tehnologiji gibanje ni omejeno na vertikalno os, možno je stabiliziranje bloka zemljine do globine petih metrov (slika 1b).

GM bi glede na tehnologijo lahko razdelili na evropsko, kjer prevladuje Skandinavija, japonsko in drugo, kjer prevladujejo ZDA. Podrobnejša razdelitev GM s primeri tehnologij je prikazana v preglednici 1.



Preglednica 1: Klasifikacija globinskega mešanja glede na I. stanje veziva, II. princip stabiliziranja, III. lokacijo dodajanja veziva in IV. primeri metod tehnologije (Topolnicki, 2004).

<b>METODA GLOBINSKEGA MEŠANJA (GM)</b>				
<b>I.</b>	<b>suho mešanje (SM)</b>	<b>mokro mešanje (MM)</b>		
<b>II.</b>	mehanično mešanje		mehanično + mešanje jet	
<b>III.</b>	na koncu vrtalne gredi	po celi dolžini gredi	na koncu vrtalne osi	
<b>IV.</b>	DJM združenje (Japonska)	CDM združenje (Japonska)	SMW (Japonska, ZDA)	SWING (Japonska)
	nordijska metoda (Švedska, Finska)	SCC (Japonska)	DSM (ZDA)	JACSMAN (Japonska)
	TREVIMIX (Italija)	SSM (ZDA)	MULTIMIX (Italija, ZDA)	GEOJET (ZDA)
	stabilizacija bloka zemljine (Švedska, Finska)	sistem Keller (ZDA, EU)	COLDMIX (Francija)	HYDRAMECH (ZDA)
		MECTOOL (ZDA)	Baueurjev sistem trojnih gredi (Nemčija)	TURBOJET (Italija)
	stabilizacija bloka zemljine (Japonska, ZDA)	FMI (Nemčija)		

Pri prebiranju literature moramo biti pozorni, saj nekateri avtorji predvsem na Japonskem in v ZDA med GM uvrščajo tudi B"jet" tehnologijo. S tem nazivom označujemo tehnologijo vbrizgavanje veziva in vode v tla pod visokimi pritiski.

## 2.1 Prednosti in pomanjkljivosti metode globinskega mešanja

Na stopnjo izboljšanja zemljine vpliva več dejavnikov, kot so karakteristike in sestava tal, karakteristike veziva, pogoji in postopek vgradnje, pogoji strjevanja itd. Vsi ti vplivi so pomembni za zavedanje prednosti in pomanjkljivosti metode. Prednosti in slabosti so v primerjavi z drugimi metodami pogojene tudi z omejitvijo tehnologij, ki so natančneje povzete

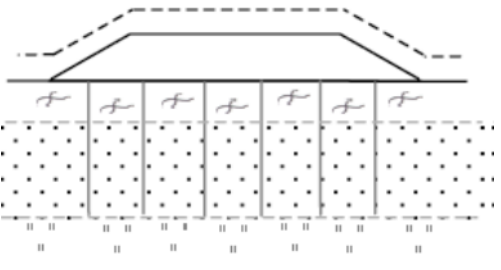
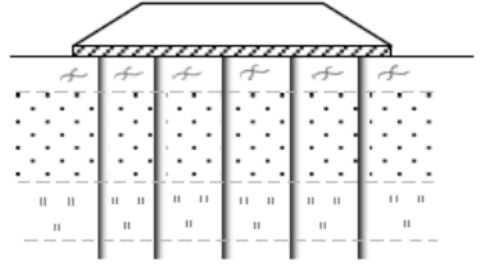
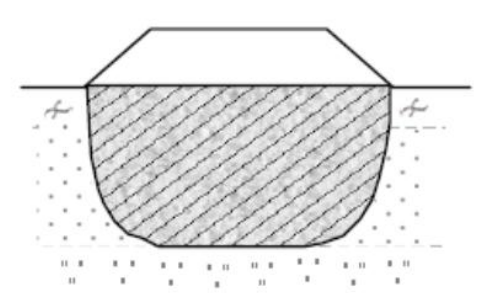
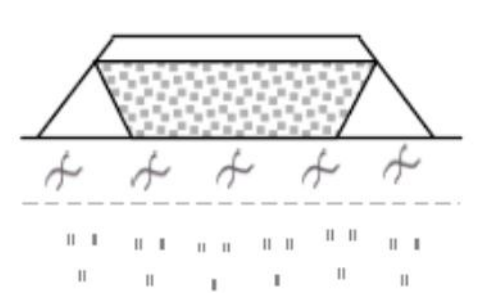
v nadaljevanju poglavja. Pregled prednosti in pomanjkljivosti GM prikazuje preglednica 2, preglednica 3 pa primerja GM z drugimi metodami.

*Preglednica 2: Pregled prednosti in pomanjkljivosti metode globinskega mešanja (Topolnicki, 2004; EuroSoilStab, 2002)*

---

<b>Prednosti</b>	<b>Pomanjkljivosti</b>
Visoka produktivnost. Ekonomična za večje projekte.	Omejena globina (odvisna od tehnologije).
Je lahko potencialno uporabna na vseh tipih zemljine, z omejitvami.	Apliciranje ni mogoče v zelo suhih, togih zemljinah in zemljinah, ki vsebujejo grušč.
Inženirske parametre je možno natančno določiti s terenskimi preiskavami.	Kakovost izboljšane zemljine ni konstantna.
Ni vibracij.	Treba je preveriti zmrzlinško odpornost.
Nizka kvarljivost opreme za suho mešanje.	Večja kvarljivost opreme za mokro mešanje.
Se lahko uporabi tudi na obalnem območju in pod morskim dnom.	Teža opreme je lahko problematična za mehka tla (odvisno od metode).
Minimalni okoljski vpliv.	Omejena možnost stabiliziranja posameznega sloja v globini.
Ekonomičnost.	Omejena možnost zvišanja stabilnosti visokih nasipov.
Majhna poraba materiala in energije.	Zračni pritisk lahko povzroči dvigovanje tal med izvedbo.
Možno projektiranje stopnje izboljšanja z uravnavanjem količine veziva.	Sprememba doseženega učinkovanja stabiliziranja s časom, kar lahko tudi izkoristimo.
Ni odvečnega materiala.	

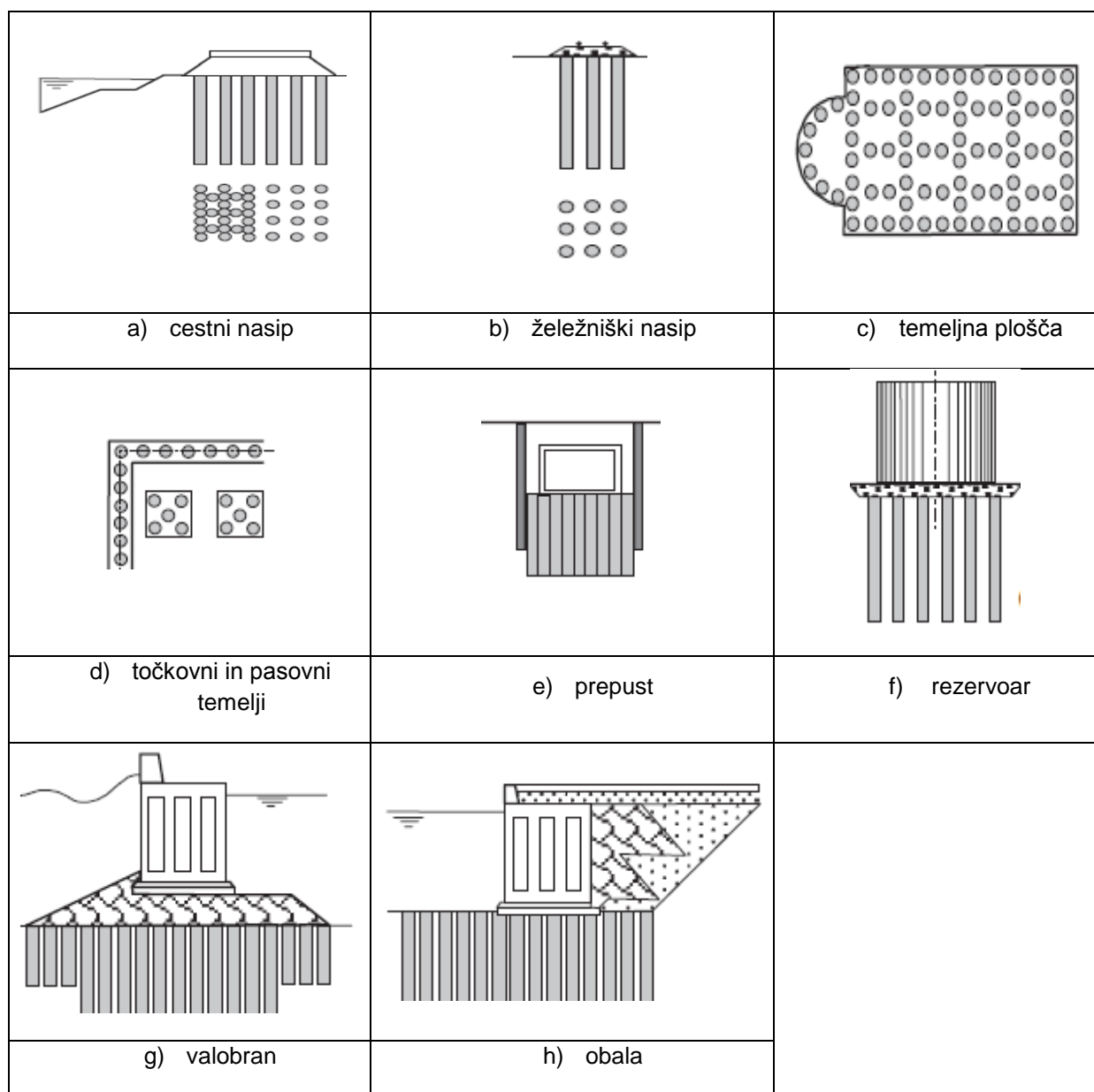
Preglednica 3: Primerjava drugih metod z metodo globinskega mešanja (EuroSoilStab, 2002)

VERTIKALNE DRENAŽE	PRIMERJAVA Z GLOBINSKIM MEŠANJEM
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- cenejša izvedba,</li> <li>- več težav z zagotavljanjem stabilnosti,</li> <li>- večji posedki,</li> <li>- počasnejša izvedba;</li> </ul>
<p><b>PILOTIRANJE</b></p>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- dražja izvedba,</li> <li>- velika razlika posedkov zemljine v okolici in pilotov,</li> <li>- hitrejša izvedba,</li> <li>- doseg večjih globin;</li> </ul>
<p><b>ZAMENJAVA TAL</b></p>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- cena je odvisna od posameznega primera,</li> <li>- vključuje večjo količino zemljine,</li> <li>- večje tveganje odpovedi temeljnih tal,</li> <li>- velik vpliv na okolje;</li> </ul>
<p><b>ZMANJŠANJE TEŽE NASIPA</b></p>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- običajno dražje,</li> <li>- možna je kombinacija metod.</li> </ul>

## 2.2 Uporaba metode

Metoda je primerna za različne namene izboljšanja temeljnih tal od temeljenja objektov do izvedbe specialnih sider. Kot primer so v nadaljevanju prikazane nekatere možne uporabe GM s kratkimi opisi.

Pri uporabi GM za temeljenje objektov je njen glavni namen zmanjšanje posedkov, povečanje nosilnosti temeljnih tal in preprečitev globalne porušitve tal. Temeljenje objektov z GM se običajno uporablja pri projektih cestnih in železniških nasipov, stavb, industrijskih hal, rezervoarjev, opornih zidov, podzemnih objektov, pri obalnih in podmorskih aplikacijah, kot so obale, pomoli, valobrani ter zaščita obalnih brežin. Primere uporabe GM prikazuje slika 3.

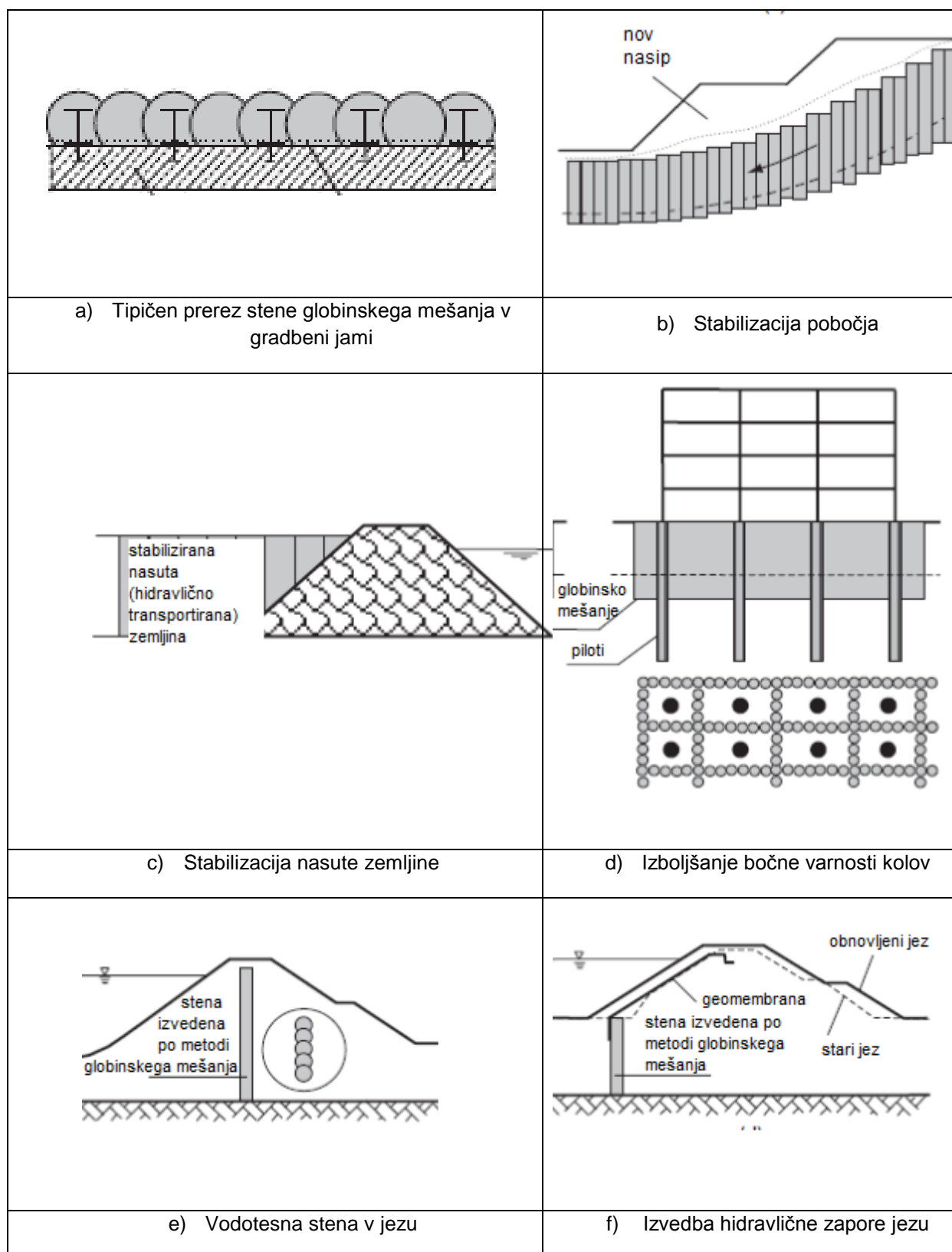


Slika 3: Primeri uporabe metode globinskega mešanja (Topolnicki, 2004, str. 378)

GM se uporablja tudi za povečanje globalne varnosti pri globokih vkopih in gradnjah gradbenih jam ali drugih posegov v mehkih zemljinah. Pri taki uporabi je običajna izvedba

stene ali mreže prekrivajočih se kolov. Andromalos (2000) je razvil nov inovativen koncept gradnje varovanja vertikalnih izkopov brez uporabe opornikov in sidranja. Razvita je bila tudi metoda izdelave specialnih sider z uporabo GM (Porbaha, 1998). GM lahko s primerno razporeditvijo kolov uporabljamo tudi za stabilizacijo pobočij in vkopov (Topolnicki, 2004).

Metoda se uporablja za poboljšanje zemljine, preprečitev utekočinjenja tal in gradnjo vodotesnih zapor v okoljskih projektih. Tipičen primer poboljšanja zemljine so projekti gradnje cest in predorov v mehkih zemljinah in stabilizacija nasutij mehke zemljine, rečnih in morskih bregov in izboljšanje trdnosti sedimentov morskega dna. Na sliki 4 je kot primer pokazana uporaba GM za povečanje globalne varnosti in tesnjenja.



Slika 4: Prikaz izvedbe globinskega mešanja za povečanje globalne varnosti in tesnenja (Topolnicki, 2004, str. 380–382)

Ostajajo tudi druge možnosti uporabe, ki se redkeje izvajajo.

## **2.3 Globoko suho mešanje s pregledom tehnologije**

SM je bila skoraj paralelno razvita na Švedskem in Japonskem v 60. letih 20. stoletja. V začetnem razvoju se je za vezivo uporabljalo predvsem apno, kasneje je v uporabo prišel cement, danes pa se večinoma uporablja mešanice različnih veziv. Metoda je razširjena po svetu, za njeno izvedbo pa se uporablja različna oprema. Princip je pnevmatično ali mehansko vtiskanje suhega veziva v zemljinu s pomočjo rotacijske penetracije.

### **2.3.1 Oprema in izvedba**

Mešalno orodje je vtisnjeno v zemljinu do želene globine kola. Skozi odprtine, locirane tik nad horizontalnimi rezili mešalk, se v zemljinu s pomočjo pritiska zraka vpihuje suho vezivo, medtem ko mešalno orodje rotira in se počasi dviga. Med številnimi metodami prevladujeta dve tehniki za izvedbo SM, in sicer japonska in skandinavska metoda.

V preglednici 4 navedeni podatki o mešalni opremi prikazujejo omejitve GM glede na tehnologijo izdelave.

Preglednica 4: Splošni podatki o tehnologiji (Topolnicki,2004)

Ime		Dry Jet Mixing (DJM)	Skandinavska metoda	Trevamix
Podjetje		DJM združenje (64 podjetij)	Različna (Skandinavija/Daljni vzhod), ZDA	TREVI (Italija)
Opis		Mešalke rotirajo med vtiskanjem, medtem vpihujemo zrak, da se izognemo zamašitvi odprtin. Med dviganjem mešalke rotirajo v nasprotno smer.	Potrebujemo zadostno količino proste vode za hidratacijo. Nizka kvarljivost opreme. Visoka produktivnost. Močna podpora računalniške kontrole. SGI.	Vezivo se dodaja tudi med vtiskanjem. Za izvedbo je potrebna vlažnost 60 do 145 %, podaja pa relativno velik cementni faktor in premer.
Detajli vgradnje	Mešalke	1–2; z medsebojno osno razdaljo 0,8–1,5 m; mešalka ima 2 do 3 pare rezil.	Ena mešalka; različni tipi mešalnih in rezalnih rezil.	1–2; bolj pogosto dve na medsebojni osni razdalji 1,5–3,5 m.
Detajli vgradnje	Premer	1,0 m; modificiran 1,3 m.	0,5–1,2 m; običajno 0,6 ali 0,8 m	0,8 ali pogosteje 1,0 m.
	Realistična maksimalna globina	33 m	30 m (Keller 25 m), običajno 20 m	30 m
	Obrati na minuto	Vtiskanje: 24–32; dviganje: 48–64	100–200; običajno 130–170	40
	Produktivnost	Vtiskanje 3 m/min; dvigovanje 0,5 m/min. Oteževalni pogoji znižajo produktivnost za 35–45 %	Vtiskanje 2–3 m/min; dvigovanje 0,6–0,9 m/min. 400–1000 m na izmeno (premer 0,6)	Vtiskanje 0,4 m/min; dvigovanje 0,6 m/min; 139 m na izmeno
Vezivo	Material	Običajno cement, uporablja pa se tudi živo apno v neorganskih glinah.	Cement in apno v razmerju 50/50 ali 75/25	Običajno cement, manj apno
	Vsebnost cementa (kg/m <sup>3</sup> )	100–400 cementa v peskih; 200–600 cementa v šotah in 50–300 apna v glini.	Tipični 70–150; 150–250 v organskih zemljinah.	150–300; tipično 250
Poročane lastnosti	Enoosna tlačna trdnost	1–10 MPa	Tipično 0,2–0,5 MPa (do maksimalno 2 MPa). Strižna trdnost je 0,1–0,3 MPa (do 1 MPa na terenu)	1,8–4,2 MPa (tipično 2,5 MPa)
	k	Višja kot pri mokrem mešanju cementa	Za apnene kole k = 1000 * k zemljine; za apno-cement k = 400–500 k zemljine	Ni podatka.
	E	50 do 200 * q <sub>u</sub>	50 do 200 * q <sub>u</sub>	1,0-2,33*10 <sup>3</sup> MPa (gline); 3,125 MPa (peski)
Vir		Yang (1998)	Holm (1994)	Holm (1999)



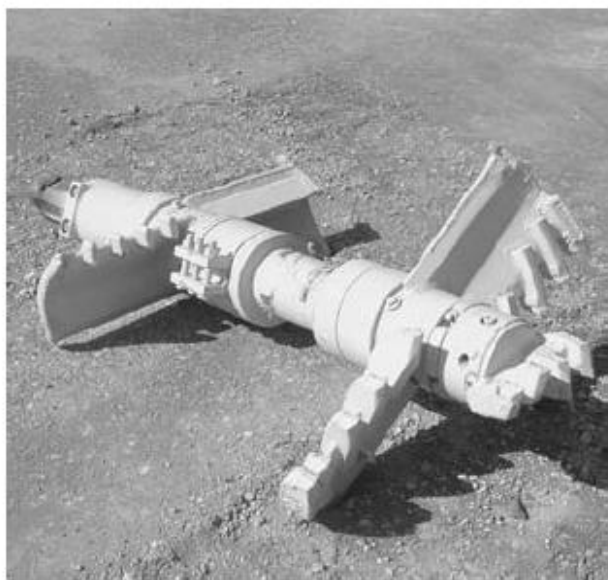
### 2.3.1.1 Japonska metoda

Mešalni stroji za DJM so opremljeni z enim ali dvema mešalnima osema in so sposobni vgradnje kolov do maksimalne globine 16-33 m (Terashi, 1997). Običajna uporaba mešanja je na dveh oseh, običajni premer 1 m, skupna dolžina enega mešanja pa 2 m. Dodajanje veziva se kontrolira s spreminjanjem rotacijske hitrosti.

Z običajnimi stroji s torzijsko kapaciteto 20–30 kNm je pričakovana meja za izvedbo 70 kPa nedrenirane strižne trdnosti (v nadaljevanju  $q_u$ ) gline (Topolnicki, 2004) in SPT vrednost  $N = 15$  v peskih (Terashi, 1997).

Tipična hitrost vtiskanja v mehkih zemljinah je 1–1,5 m/min s 24–32 obrati na minuto (električni motorji), pretok zraka, potreben za preprečitev zamašitve, je 2 m<sup>3</sup>/min. Tipična hitrost dviganja je 0,7 ali 0,9 m/min z 48 ali 64 obrati na minuto (električni motorji) in pretokom zraka v plitkih globinah 5–3 m<sup>3</sup>/min.

Mešalno opremo metode DJM prikazuje slika 5.



Slika 5: Mešalna oprema metode DJM: mešalno orodje premera 1,0 m, modificirana izvedba ima premer 1,3 m (Topolnicki, 2004).

### 2.3.1.2 Skandinavska metoda

Skandinavski stroji so lažji od japonskih in uporabljajo le eno mešalno os. Zgrajeni so predvsem za delovanje na mehkih do zelo mehkih zemljinah s  $q_u$  manjšo od 25 kPa (maksimalno 50 kPa). Značilni premeri so 0,6 ali 0,8 m. Največja globina je 25 m. Izvedba omogoča izdelavo kolov pod naklonom do 1 : 4 (maksimalno 1 : 1).

Značilna torzijska kapaciteta pri 180 obratih na minuto je 7 kNm in se zviša na 30–40 kNm pri 20–30 obratih na minuto. Značilna hitrost dviganja je 15–25 mm na obrat in rotacijo približno 150–180 obratov na minuto.

Mešalno opremo Skandinavske metode prikazuje slika 6.



(a)



(b)



(c)



(d)

---

Slika 6: Izbrana mešalna orodja Skandinavske metode: a) SD 600 mm; b) modificiran SD 600 mm; c) PB3 600 mm; d) šotni mešalec 800 mm (Apeno-cementna metoda ali LCM) (EuroSoilStab, 2002)

## 2.4 Globoko mokro mešanje z opisom tehnologije

Je relativno nova metoda, katere uporaba se hitro širi po celem svetu. Pri tej metodi v tla vmešavamo vezivo v obliki paste. Je bolj prilagodljiva za uporabo v različnih tipih zemljine, dosegamo bolj homogeno mešanico zemljine na terenu, a manjše trdnosti v primerjavi s suho metodo. Njena uporaba izkazuje ugodne rezultate. Tehnologija je bolj raznolika kot pri suhi metodi, dosega se tudi večje globine, in sicer je meja dosežene globine okrog petdeset metrov.

MM lahko izvajamo na mehkih glinah, peskih, drobno zrnatih peskih in organskih zemljinah (šota, mulj itd.). Uporaba v organskih zemljinah zahteva posebno pozornost pri izbiri veziva (specialna veziva) in izvedbenih procesih.

Glede na navedbe Johansson (2002) se MM deli na dve glavni podskupini: mehnično mešanje in kombinirano mehnično ter "jet" mešanje.

Izvedba je možna na terenu ali v vodi.

#### **2.4.1 Oprema in izvedba**

Opremo povzema Topolnicki (2003) in podaja pregled tehnoloških omejitev (preglednica 5). Tipično mešalno orodje prikazuje slika 7.

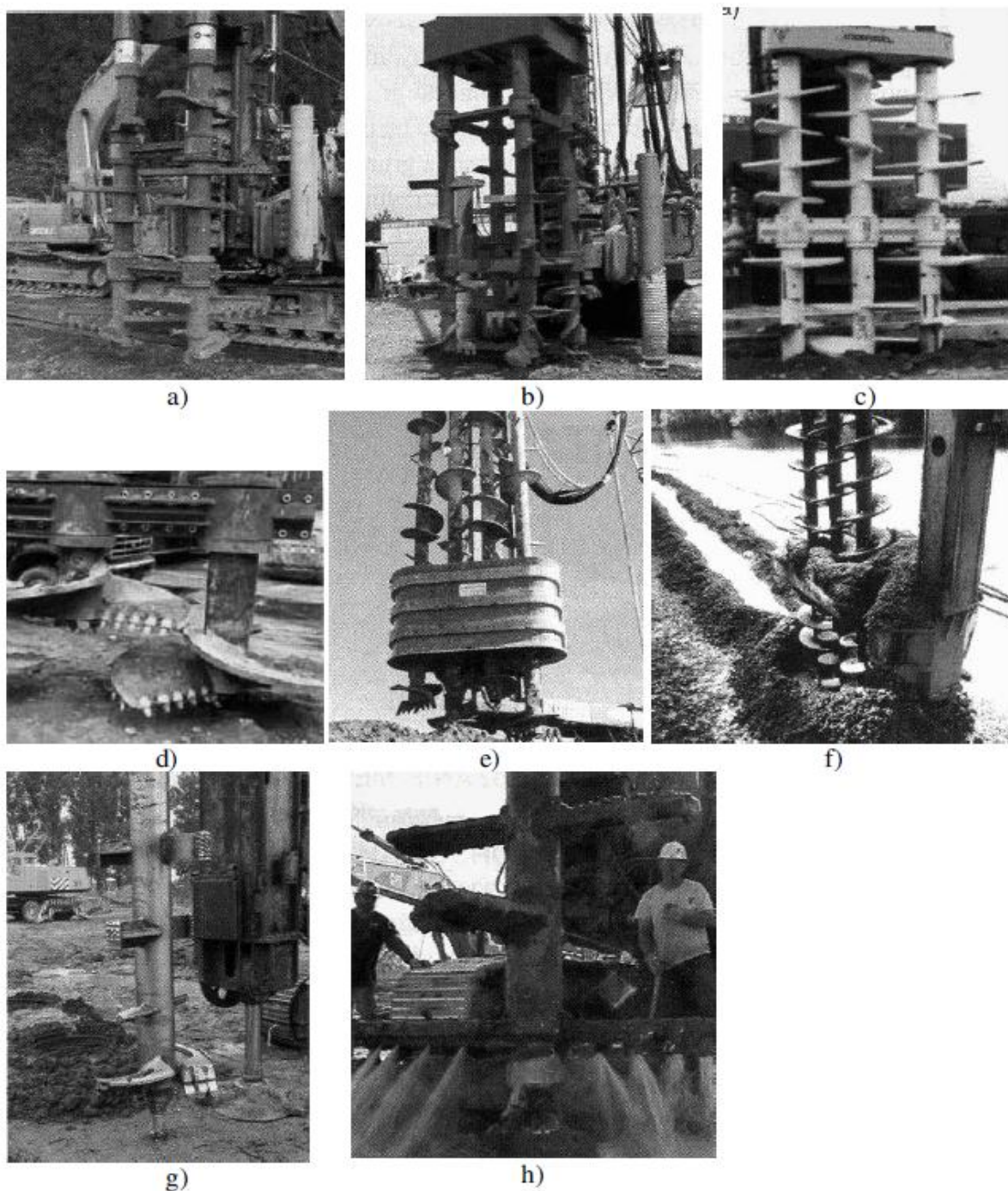
Preglednica 5: Pregled tehnologij mokrega mešanja (Topolnicki, 2004)

Tehnična specifikacija	CDM (STANDARD + Mega)	CDM Land 4	SCC	HB-Keller (ZDA/ Evropa)
Mešalke	2; 1 starejši sistem	4	1; možna dva	1
Premer (m)	1,0 standardna; 1,2/1,3 modificiran	1,0/1,2	0,6–1,5 ; 1,2 z dvema mešalkama	0,5–2,4 (ZDA); 0,6–0,8 (Evropa)
Realistična maksimalna globina (m)	50 (55) ; 30: M 1,2; 20: M 1,3	25	20	20 (ZDA); 12 (Evropa)
Hitrost pri vtiskovanju (P) in dvigovanju (R)	P: (0,3) 0,5–1 R: 0,7–1 (2)	P: 0,7–1,0 R: 1,0	P: 1,0 R: 1,0	P: 0,3–0,5 R: 0,3–0,5
Vtiskovalna (P)/ dvigajoča (R) hitrost rotacije	P: 20 R: 40	P: 20 R: 40	30–60	P: 20–25 R: višja
Dodajanje veziva med vtiskanjem (P) in dviganjem (R)	P ali R	P ali R	običajno P	P (+R) : ZDA P + R : Evropa
Vodo/cementni faktor	0,6–1,3	0,6–1,3	0,6–0,8 gline; 1,0–1,2 peski	1,0–1,5 (ZDA) 0,5 (Evropa)
Količina dodanega veziva (kg/m <sup>3</sup> )	70–300; povprečno 140–200	70–300; povprečno 140–200	150–400	150–275 (ZDA) 250–450 (Evropa)
Produktivnost na izmeno	100–200 m <sup>3</sup>	500–700 m <sup>3</sup>	100 m <sup>2</sup> stene 400 m kolov	250–750 m <sup>3</sup> (ZDA); 75–125 m <sup>3</sup> (Evropa)
Tehnična specifikacija	Bauer	SMW	DSM	COLDMIX
Mešalke	3; možen 1	1–3,5; običajno 3	1–6; običajno 4	2, 3, 4
Premer (m)	3*0,37; 3*0,55; 3*0,88	0,55–1,5; običajno 0,9	0,8–1; običajno 0,9	2: 0,23–0,75; 3: 0,36–0,50; 4: 0,50–0,75
Realistična maksimalna globina (m)	0,37 : 10,5; 0,55 : 15,7; 0,88 : 25	35 (50)	35	20
Hitrost pri vtiskanju (P) in dvigovanju <sup>®</sup>	P: 0,2–1,0 R: 0,7–1,0 (5)	P: 0,5–1 R: 1,5–2,0	P: 0,6–1,0 R: 1,0–2,0	P: 0,8 R: 1,0
Vtiskovalna P/ dvigajoča hitrost rotacije R	20–40 (80)	P: 14–20 R: višja	15–25	8,0–30,0

se nadaljuje...

...nadaljevanje Preglednice 5

<b>Dodajanje veziva med vtiskanjem P / dviganjem R</b>	P ali/in R (30–50 %)	P in R	P (+R)	P (+R)
<b>Vodo/cementni faktor</b>	0,6–2,5	0,7–2,5	1,2–1,75	0,7–2,5
<b>Količina dodanega veziva (kg/m<sup>3</sup>)</b>	80–500	200–750	120–400	100–550
<b>Produktivnost na izmeno</b>	30–300 m <sup>3</sup>	100–200 m <sup>3</sup>	200–300m <sup>2</sup> stene	100–300 m



Slika 7: Tipično mešalno orodje: a) dvoosni standardni CDM 2 \* 1,0 m (CDM); b) štiroosni CDM 4 \* 1,0 m (CDM); c) triosni SMW 3 \* 1,5 m; d) 0,9 m (Geo-Con-Inc.); f) troosni 3\* 0,55 m (Bauer); h) enoosni 0,8 m (Keller); h) enoosni 2,4 m (Hayward Baker/Keller) (Larsson, 2003)

## 2.5 Kombinirano "jet" in mehanično mešanje

Kot dodatek mehaničnemu mešanju v teh metodah uporabljamo tehnologijo "jet" za zmanjšanje odpora pri vtiskanju, za izboljšanje mešanja in/ali za zvečanje premera. Opisanih je nekaj tehnologij.

- Metoda SWING je najstarejša metoda za mešanje, dosega premere kolov 3 m in več. Pri vtiskanju razrahljamo zemljino z vbrizganjem vode v zemljino, med dviganjem pa vtiskamo pasto z zračnim pritiskom (slika 8).



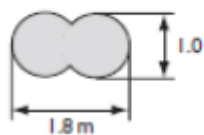
Slika 8: SWING z odprtimi rezili (Larsson, 2003)

- Sistem JACKSMAN (slika 9) sestavljata dve osi, vsaka ima po deset rezil. Tlak vode v šobah je 30 MPa, vtiskanje malte  $4 * 150$  l/min, zračni pritisk 0,7 MPa, hitrost dviganja med 0,5 in 1,0 m/min. Primerjavo z metodo CDM prikazuje slika 10.



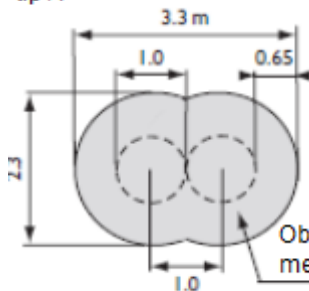
Slika 9: Mešalno orodje JACKSMAN: a) primer dvojnih rezil; b) prikaz delovanja sistema XJET (Larsson, 2003; Topolnicki, 2004)

Konvencionalna CDM metoda



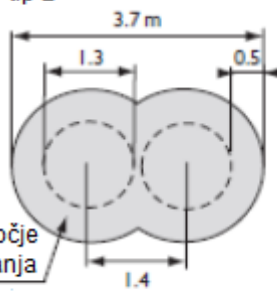
Izboljšano področje: 1,5 m<sup>2</sup>

JACSMAN  
tip A



Izboljšano področje: 6,4 m<sup>2</sup>

tip B



Izboljšano področje: 7,2 m<sup>2</sup>

Slika 10: Primerjava izboljšane površine izdelane z JACSMAN in CDM metodo (Topolnicki, 2004)

- TURBOJET (GEOJET v ZDA)

Premeri so 0,6–1,5 m, običajno 0,9–1,2 m, največja globina pa je 25 m. Opremo prikazuje slika 11.



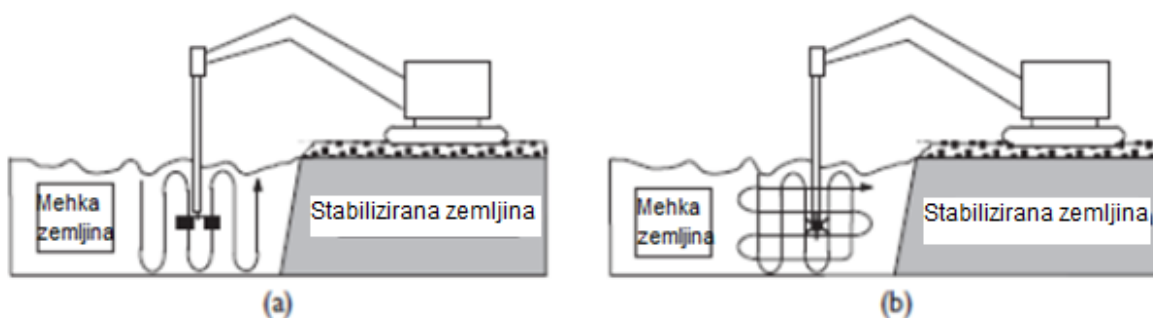
Slika 11: TURBOJET oprema (Larrson, 2003)

Obstaja še več tehnologij gradnje, na primer Geo-Jet, LDis, HYDRAMECH itd.



## 2.6 Plitvo mešanje

Cilj plitvega mešanja je najpogosteje ustvarjanje bloka stabilizirane zemljine. Plitvo mešanje ponuja ekonomične rešitve za izboljšanje zemljine, ko imamo opravka z velikimi količinami zelo mehke zemljine z visoko vlažnostjo, kot so šote in mulji. Pogoji ekonomičnosti uporabe je uporaba do globine nekaj metrov in uporaba velikih premerov mešalk ali s pred nedavnim v Skandinaviji razvito novejšo tehnologijo. V preteklosti je bil princip plitvega mešanja uporaba tehnologije globokega mešanja z večjimi premeri in večosnim mešanjem. Metodo sem razdelil na glavne podsisteme, prikazano na sliki 12 .

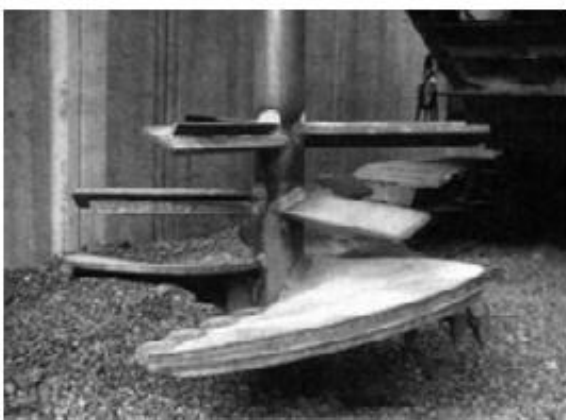


Slika 12: Načina masovne stabilizacije: a) vertikalno mešanje; b) vertikalno in horizontalno mešanje (EuroSoilStab, 2004)

Tipične podatke o opremi za izvedbo navaja Holm (1999): maksimalna globina 5 m, vezivo negašeno apno in cement ter cement in plavžna žilindra, količina dodanega veziva 200–400 kg/m<sup>3</sup>, trdnost stabilizirane šote je 50–100 kPa.

V nadaljevanju so predstavljene nekatere tehnologije.

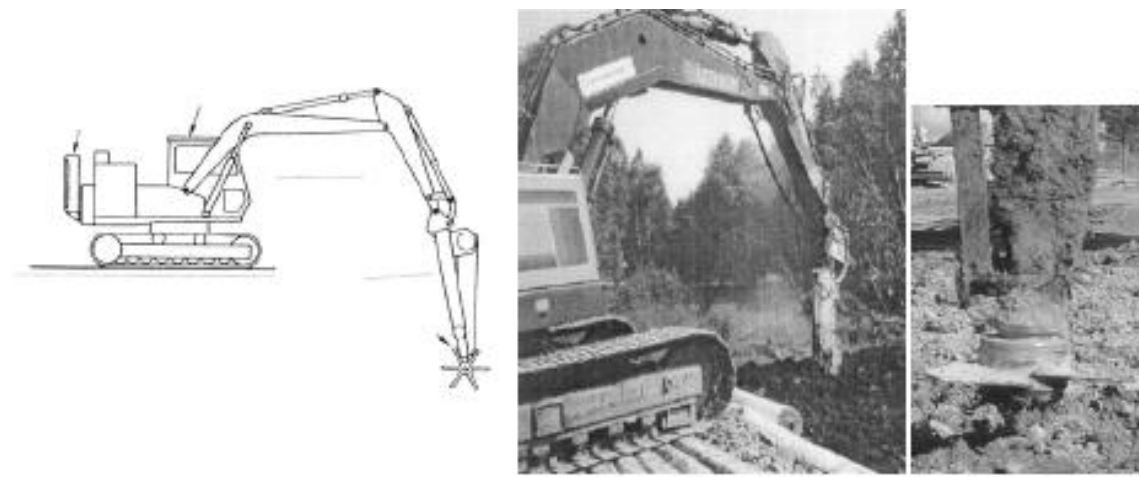
Metoda plitvega mešanja z vertikalnim mešanjem je lahko prilagojena tudi za uporabo suhega veziva (slika 13). Premer mešalk je 1,8–3,7 m.



Slika 13: SM mešalno orodje, premer 3,7 m (Larsson, 2003)

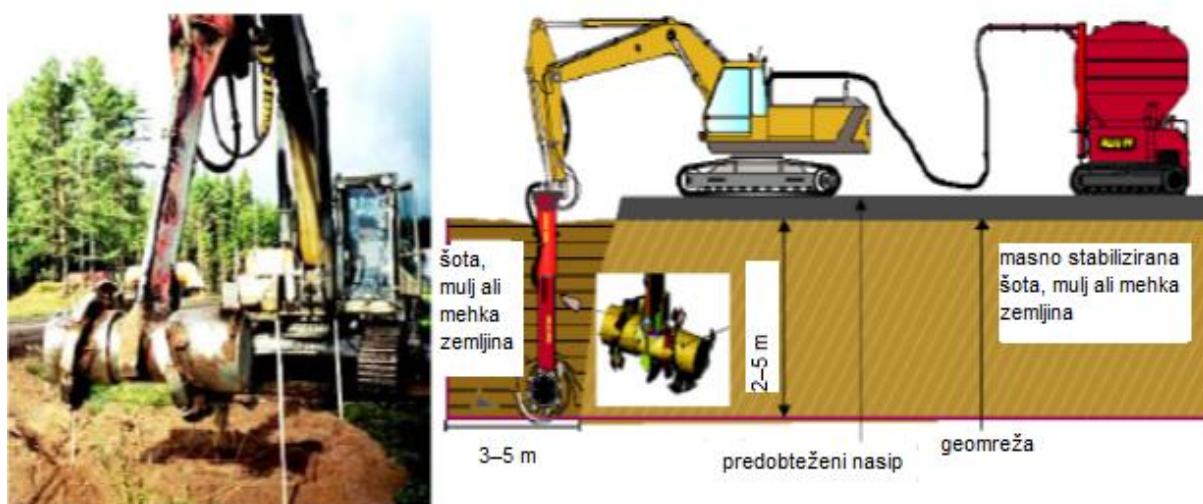
### 2.6.1 Stabilizacija bloka zemljine

V Skandinaviji so razvili posebna mešalna orodja, ki temeljijo na vertikalnem in horizontalnem premikanju mešalke, kar je pri večjih globinah težje. Namen je stabilizirati blok zemljine. Mešalke večinoma rotirajo okrog horizontalne osi. Masovno stabilizacijo prikazuje slika 14.



Slika 14: Masovna stabilizacija (Axelsson, 1996)

- Topolnicki (2004) navaja podatek o produktivnosti te metode med 200 in 300 m<sup>3</sup> na izmeno, količina veziva je v Skandinaviji 150–250 kg/m<sup>3</sup>, premer mešalk 0,6–1,0 m in rotacija 80 ali 100 obratov na minuto. Metodo pogojuje trdnost zemljine  $\geq 25$  kPa. Metodo prikazuje slika 15.



Slika 15: Masovna stabilizacija, razvita v Skandinaviji (Larsson, 2003)

- Podobno tehnologijo so razvili tudi v ZDA. Tehnologija je bila izdelana in uporabljena za namene projekta Fort Point Channel Site v Bostonu. Uporabljeno opremo prikazuje slika 16.



Slika 16: Oprema, uporabljena v projektu Fort Point Channel Site v Bostonu (Larsson, 2003).

## 2.7 Ekonomski vidik

Ekonomičnost metode je odvisna od vrste veziva in količine veziva kot posledici načrtovanja trdnosti, izbrane tehnologije in geometrije. Za končno izbiro metode je potrebna primerjava z drugimi metodami izboljšanja zemljine in precenitev prednosti in slabosti v konkretnem projektu.

GM je z uporabo apna in/ali cementa konkurenčna v primerjavi z drugimi stabilizacijskimi metodami, ko je uporaba omejena na izboljšanje stabilnosti in posedkov (Broms, 2004).

Ekonomična je uporaba večjih premerov, saj cena na enoto pada z večanjem premerov kolov in z uporabo tehnologije z večosnim mešanjem. Veliki premeri se lahko uporabijo le v mehkih zemljinah (omejen navor mehanizacije). Pri izvedbi SM je priporočena uporaba kolov s premerom manjšim od 0,8 m, saj je porazdelitev veziva pri večjih primerih neenakomerna.

Primerjava izvedbe nasipa na mehkih tleh z apnenimi koli ali na pilotih je pokazala trikrat cenejšo izvedbo apnenih kolov (Nord, 1990; Carlsten, 1993) in 30-odstotno znižanje cene pri uporabi apneno-cementnih kolov (Holm, 1999).

### **3 UČINKOVANJE VEZIV V ZEMLJINI**

Odločitev za vrsto in količino veziva je bistvenega pomena za ekonomičnost in učinkovitost metode globokega mešanja. Kot nepogrešljiv dejavnik pri izbiri veziva je razumevanje delovanja veziva v zemljini (glej poglavje 3.1 in poglavje 3.2). V poglavju 3.3 so predstavljena priporočila različnih avtorjev za izbiro veziva glede na lastnosti in tip zemljine, glede na učinkovanje veziv z zemljino. Bistvenega pomena za končno izbiro veziva so laboratorijske preiskave stabilizirane zemljine.

Za razumevanje delovanja veziv v zemljini in poznavanje omejitev pri izbiri veziva je v uvodnem poglavju 3.1 podan pregled osnovnih reakcij delovanja veziva v zemljini.

To poglavje obravnava opis osnovnih reakcij veziva pri stabilizaciji zemljine, ocene pričakovanega časovnega poteka pridobivanja trdnosti in druge podatke, ki so pomembni za razumevanje delovanja procesa strjevanja zemljine ob dodatku veziva.

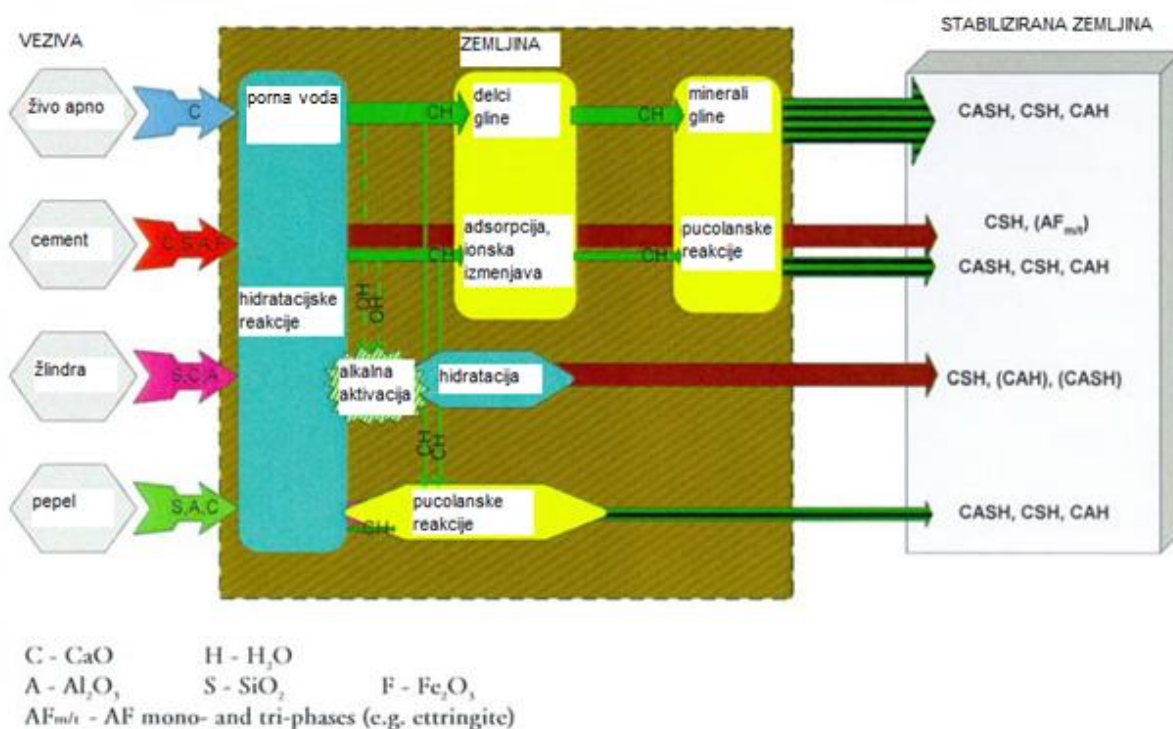
V poglavju 3.2 je povzeto delovanje posameznih veziv in zajema priporočila za izbiro veziva, glede na lastnosti zemljine, vplivi na pridobivanje trdnosti veziva, mešanega z zemljino, časovno priraščanje trdnosti mešanic ter učinek dodatkov veziv.

Priporočila za izbiro veziva glede na lastnosti in tip zemljine po navajanju različnih avtorjev opisuje poglavje 3.3.

#### **3.1 Reakcije veziv v zemljini**

Pri stabilizaciji mehke zemljine z vmešavanjem veziva lahko pričakujemo spremembe zrnastostne porazdelitve delcev zemljine in znižanje vlažnosti zemljine. Posledično te spremembe zvišajo trdnost zemljine in zmanjšajo stisljivost s časom, izjemo predstavlja uporaba žganega apna, ki zniža prepustnost.

Reakcije, ki nastanejo pri mešanju zemljine z različnimi vezivi, so odvisne od načina, intenzivnosti in trajanja mešanja, a temeljijo na nekaterih skupnih karakteristikah. Slika 17 prikazuje osnovne kemijske procese in glavne produkte pri mešanju zemljine z različnimi materiali, kot so živo apno, cement, žindra in elektrofiltrski pepel. Ob stiku veziva z zemljino pride do hidratacije, kjer se porablja pora voda. Pri hidrataciji vedno nastaja toplota. Dvig temperature pospeši vse nadaljnje reakcije.



Slika 17: Grob povzetek kemičnih reakcij in produktov, ki potekajo pri uporabi različnih veziv (Ahnberg, 2006, str. 19)

### 3.1.1 Vplivi na učinkovanje stabilizacije zemljine z vezivi

#### 3.1.1.1 Vrsta zemljine

Pri glini, židki glini in glinenem melju hitro dosežemo izboljšanje zemljine, medtem ko je pri organski glini in šoti treba dodati večje količine veziva (Ahnberg, 1994).

#### 3.1.1.2 Kemijske reakcije v zemljini

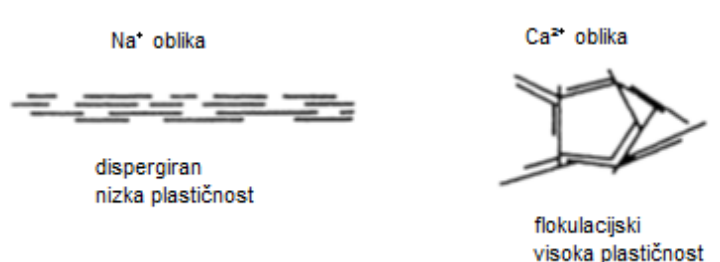
Povečana trdnost je posledica kemijskih reakcij, ki potečejo ob mešanju zemljine z vezivi (apno, cement, apno-cement). To podpoglavje zajema opis ionske izmenjave, pucolanske reakcije, karbonizacije, vpliva pH in sulfatov.

- Ionska izmenjava

Na površini delcev zemljine so pozitivni ioni (kationi), običajno kalija ali natrija. Pri mešanju zemljine z vezivom nastajajo kalcijevi ioni, ki zamenjajo obstoječe katione na površini delcev. Ta proces imenujemo ionska izmenjava. Kalcijevi ioni spremenijo strukturo gline (slika 18), povzročijo flokulacijo in spremembo zrnivosti zemljine. Po navedbah Assarssona (1977) je potrebna količina kalcijevih ionov enaka 0,1 g Ca(OH)<sub>2</sub> na kilogram gline. Posledica je zvišanje meje plastičnosti (v nadaljevanju  $w_p$ ) in znižanje indeksa plastičnosti (v nadaljevanju  $I_p$ ), sledi iz enačbe:

$$I_p = w_l - w_p,$$

kjer je  $w_L$  meja židkosti.



Slika 18: Vpliv ionske izmenjave (Janž, 2002)

Obseg ionske izmenjave je odvisen od ionske izmenjalne kapaciteta delcev glin in geološkega izvora glin (Ahnberg, 1995). Ionska izmenjalna kapaciteta je odvisna od razvitosti površine zrn veziva, mera finosti je  $m^2/kg$ . Z manjšanjem velikosti zrn se izpostavlja razvita površina poveča. Večja je specifična površina zrn, hitrejši je potek reakcije (Janž, 2002).

- **Pucolanska reakcija**

Strižna trdnost stabilizirane zemljine veliko pridobi s časom, večinoma kot posledica pucolanske reakcije. Pucolani so minerali, ki po reakciji z vodo in kalcijem sprožijo cementiranje. Ponavadi so sestavljeni iz silikatov ali aluminatov. Apno potrebuje za potek pucolanske reakcije minerale iz zemljine, medtem ko cement sam vsebuje pucolane in za sprožitev reakcije potrebuje le vodo. Pucolanske reakcije so odvisne od časa in temperature in potekajo počasneje pri mešanju za apnom.

Pri pucolanski reakciji  $Ca(OH)_2$ , ki ne vstopa v proces ionske izmenjave, reagira s silicijevim dioksidom ( $SiO_2$ ) in aluminijevim oksidom ( $Al_2O_3$ ), ki sta prisotna v mineralih zemljine. Posledica reakcije je cementiranje. Pri reakciji se formirajo kalcijev aluminosilikat hidrat (v nadaljevanju CASH gel), kalcijev silikat hidrat (v nadaljevanju CSH gel) in/ali kalcijev alumino hidrat (v nadaljevanju CAH).

Hilt in Davids (1965) sta ugotovila, da glin z minerali montmorillonita in kaolina reagirajo lažje in so bolj učinkoviti pucolani v primerjavi z minerali illita.

- **Karbonizacija**

Pri karbonizaciji se tvori netopen kalcijev karbonat kot posledica reakcije med ogljikovim dioksidom iz atmosfere ali zemljine in apnom. Karbonizaciji se je treba pred mešanjem izogibati, saj zmanjša reaktivnost apna, zato je pomembno, da z apnom med transportom in hranjenjem ustrezno ravnamo. Paziti moramo, da ni predolgo izpostavljen zraku (Chou, 1987). Po mešanju apna z zemljino lahko ta proces pripomore k dolgotrajnemu povečanju trdnosti (Arman, 1970)

- **Vpliv pH**

Pri dodatku večje količine apna zemljini se pH poviša na približno 12,5. Pri tako alkalnem pH se poveča topnost silicijevih in aluminijevih mineralov. S tem se pospeši pucolanska reakcija (Chou, 1987). Eadges in Grim (1960) navajata, da zvišanje pH vrednosti v glini povzroči raztapljanje silikatov, ki s kalcijevimi kationi tvorijo kalcijev silikat. Ta reakcija poteka v zemljini toliko časa, kolikor časa so v zemljini prisotni  $Ca(OH)_2$  in silikati. Elias (2001) trdi, da je učinkovito pridobivanje trdnosti v zemljini z apneno stabilizacijo učinkovito v zemljinah s pH vrednostjo nad 5.

- **Sulfati**

Pri mešanju apna, cementa ali mešanice apno-cement z zemljino, ki vsebuje sulfate, se lahko tvorita minerala etringit in thaumasit (Hunter, 1988). Tvorba teh mineralov lahko povzroči nabrekanje mešanic, prekinitev kemijskih vezi in posledično zmanjšanje trdnosti (Jacobson, 2003).

Uporaba apna v sulfatnih zemljinah lahko privede do dviga objektov nad stabilizirano zemljino, na primer dviganja cestišča. Hunter (1998) navaja pogoje za dvig apneno stabilizirane zemljine: koncentracija topnega sulfata je približno enoodstotna (10.000 mg sulfata na kilogram suhe zemljine), vsaj deset odstotkov suhe zemljine sestavljajo minerali glin, mešanica je polno nasičena. Če v zemljini ni prisotnih sulfatov, ne pride do dviga.

### 3.1.1.3 Organske snovi

Organske snovi lahko negativno vplivajo na pridobivanje trdnosti (Arman, 1970). Po dodajanju veziva zemljini se nekaj kalcijevih ionov porabi za ionsko izmenjavo z organskimi snovmi, zato jih je manj na voljo za pucolansko reakcijo (Arman, 1970). Pri glinah z veliko vsebnostjo organskih snovi je treba dodati večje količine mešanice apno-cement (Ahnberg, 1999). Hebib (2002) poudarja, da je zelo pomembno, kakšna vrsta organske snovi je v zemljini, zato ni možno narediti splošnih ugotovitev o pravilni uporabi vrste ali količine veziva. V zemljini se pojavlja pet vrst organskih snovi: ogljikovi hidrati; maščobe, smole in voski; proteini; ogljikovodiki ter ogljik (Mitchell, 1993). Organske snovi so zelo nepredvidljive, kar še dodatno otežuje stabilizacijo.

Pri stabilizaciji zemljine s cementom naj bi dodatek apna povečal topnost organskih snovi in s tem negativno vplival na pridobivanje trdnosti, medtem ko naj bi dodajanje sulfatov zmanjšalo topnost organskih snovi in s tem zmanjšalo njihov vpliv na stabilizacijo (Laguros, 1983).

Mulji in šote v primerjavi z glinami in melji vsebujejo bistveno manj glinenih delcev, ki vstopajo v proces pucolanskih reakcij, vsebujejo pa veliko organskih snovi. Zato pucolanska reakcija v teh zemljinah malo prispeva k pridobitvi na trdnosti. Organske in druge kisline reagirajo s  $\text{Ca(OH)}_2$  in tvorijo soli, ki so netopni produkti (kislina + baza = voda + soli). Zaradi prisotnosti kislin pH pade, kar vpliva na potek hidratacije in povzroči počasnejše pridobivanje trdnosti.

## 3.2 Reakcije učinkovanja veziv

Materiale, ki jih uporabljamo pri stabilizaciji, delimo na hidravlične in nehidravlične. Med hidravlične materiale spada cement, med nehidravlične pa apno, latentno hidravlični in pucolanski materiali. Za vse materiale je značilno, da reagirajo z vodo in tvorijo produkte, ki zvišajo trdnost zemljine. Hidravlični materiali so v kombinaciji z vodo samozadostni za zviševanje trdnosti, medtem ko nehidravlični materiali poleg vode potrebujejo še dodatno snov. Apno v reakciji z vodo najprej tvori  $\text{Ca(OH)}_2$ , ki vstopa v reakcijo s pucolani in tako zvišuje trdnost zemljine. Latentno hidravlični materiali in pucolanski materiali potrebujejo  $\text{Ca(OH)}_2$  iz veziva (apna, cementa ali apno-cementa). Latentno hidravlični materiali potrebujejo  $\text{Ca(OH)}_2$  le za aktivacijo, medtem ko pucolanski materiali potrebujejo  $\text{Ca(OH)}_2$  ves čas reakcije. Reaktivnost vseh materialov je odvisna od razmerja med kalcijevim oksidom in silicijevim dioksidom ( $\text{CaO/SiO}_2$ ). Višje je razmerje, bolj je material hidravličen.



Hitrost reakcije je pri vseh odvisna od razvite površine zrn. Čim manjša so zrna, večja je površina. Osnovni pregled materialov predstavljata preglednici 6 in 7.

*Preglednica 6: Reakcije, ki vplivajo na povečajne trdnosti (Janz, 2002).*

MATERIAL	REAKCIJA	KOREAGENTI	ČAS
cement	hidratacija	voda	dnevi
apno	hidratacija + pucolanska	voda + pucolani	meseci
granulirana plavžna žlindra	latentno hidravlična	voda + $\text{Ca(OH)}_2$ (iz cementa ali apna)	tedni
elektrofiltrski pepel in mikrosilika	pucolanska	voda + $\text{Ca(OH)}_2$ (iz cementa ali apna)	meseci

*Preglednica 7: Lastnosti različnih vrst materialov (Janz, 2002)*

MATERIAL	VELIKOST ZRN ( $\mu\text{m}$ )	STRUKTURA	$\text{CaO/SiO}_2$	DELEŽ $\text{SiO}_2$ (%)	RAZVITA POVRŠINA ZRN
Portland cement (hidravlični)	1–100	kristalina	~3	~20	300–500
granulirana plavžna žlindra (latentno hidravlični)	1–100	amorfn	~1	~35	300–500
elektrofiltrski pepel (pucolanski)	1–100	amorfn	~0	50–60	300–500
mikrosilika (pucolanski)	0,01–1	amorfn	~0	85–95	20.000

### 3.2.1 Apno

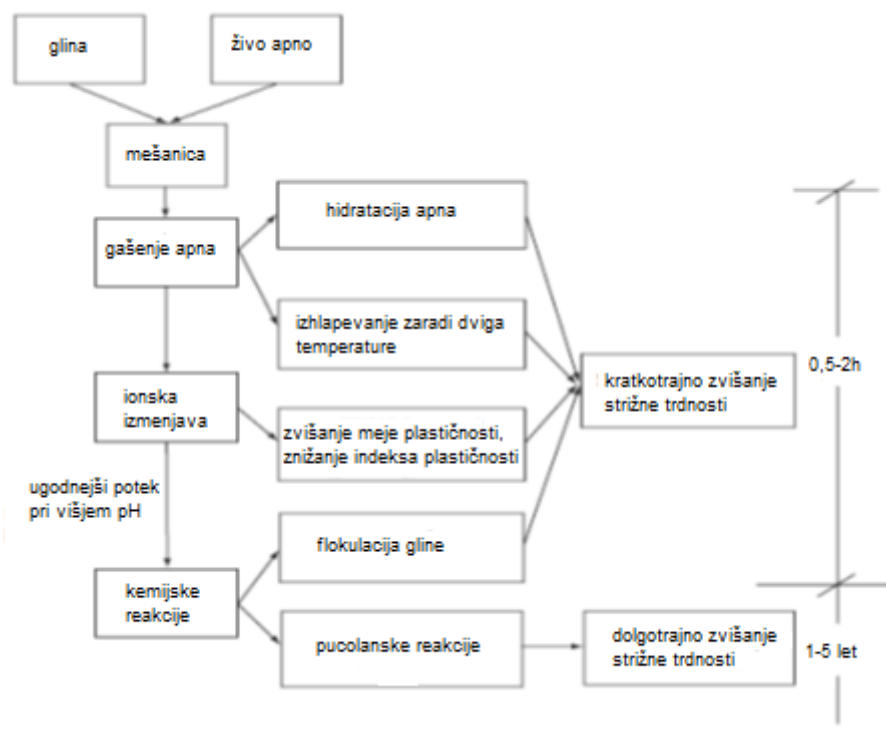
Apno je dosegljivo za uporabo v dveh oblikah, in sicer kot žgano apno ( $\text{CaO}$ ) ali hidrirano apno ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). Dosegljivo je tudi hidravlično apno, a izkušnje kažejo, da je njegova uporabnost pri globinskem stabiliziranju zemljine omejena.

Apno ima pri mešanju z zemljino visok potencial za tvorjenje reakcijskih produktov, saj vsebuje velike količine  $\text{CaO}$ . Pucolanska reakcija je relativno dolgotrajna zaradi omejene dostopnosti aluminatov in silikatov v zemljini.

Pri reakciji z vezivi, ki vsebujejo  $\text{CaO}$ , sta aluminat in silikat lažje dosegljiva, če pri stabilizaciji uporabimo elektrofiltrski pepel.

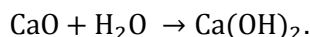
#### 3.2.1.1 Potek pridobivanja trdnosti

Shematični prikaz pridobivanja trdnosti pri mešanju gline z apnom prikazuje slika 19.



Slika 19: Shematični prikaz pridobivanja trdnosti pri stabilizaciji gline z živim apnom (Broms, 2004, str. 256)

Prva reakcija je reakcija hidratacije, kjer po reakciji žganega apna s porno vodo nastane hidrirano apno:



Pri reakciji se sprošča toplota. Dvig temperature pospeši nadaljnje reakcije in zmanjša vlažnost zemljine. Zmanjšanje vlažnosti se odraža v povečanju stabilnosti zemljine. Učinek je kratkotrajen. Prav tako pri reakciji naraste pH, kar pospeši pucolansko reakcijo.

Hidratacija apna povzroči povečanje volumna (Boyton, 1980). Taylor (1997) navaja, da je sprememba volumna zaradi hidratacije apna minimalna. Gašenje apna na terenu lahko povzroči povečanje bočnega pritiska in odvisno od razmer v zemljini in geometrije prilagojene površine, lahko povzroči tudi pomike ali konsolidacijo okoljske zemljine.

Sledi reakcija ionske izmenjave, ki povzroči flokulacijo. Oboje ima kratkotrajen učinek na zvišanje strižne trdnosti.

Zadnja reakcija, ki poteče pri mešanju z apnom, je pucolanska reakcija:



Posledica je dolgotrajno zvišanje trdnosti.

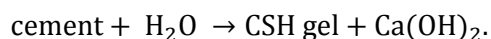
### 3.2.2 Cement

Običajno je za namene stabiliziranja uporabljen navaden Portland cement (CEM I 42,5 in CEM II 42,5, klasifikacija EN 197). Izbira cementa pa se med posameznimi državami razlikuje (Janž, 2002). Odločitev pogojuje tudi razmerje med ceno in stopnjo dosežene

trdnosti. Pogosto se uporablja v mešanici z apnom za izvedbo apneno-cementnih kolov (švedska metoda).

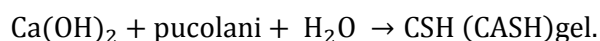
Cement je hidravlično vezivo. Učinkovanje cementa poveže delce zemljine, toda ne vpliva na strukturo gline v tolikšni meri kot apno. Znižanje vlažnost zemljine je relativno majhno. Učinkovanje cementa je v manjši meri odvisno od reagiranja z minerali v zemljini kot pri stabiliziranju zemljine z apnom.

Pri uporabi cementa za stabilizacijo zemljine najprej poteče hidratacija:



CSH gel se tvori na površini cementnih delcev, poveže delce zemljine med seboj in poveča njeno trdnost. Ker poteka proces hidratacije veliko hitreje kot pucolanska reakcija pri apnu, se trdnost pri stabiliziranju s cementom na začetku poveča veliko hitreje.

Ker se pri hidrataciji tvori  $\text{Ca(OH)}_2$  kasneje poteče tudi pucolanska reakcija, a v veliko manjši meri kot pri apnu:



V kalcij-aluminat-cementih višja vsebnost aluminata povzroči hitrejši potek reakcij kot pri običajnih cementih Portland.

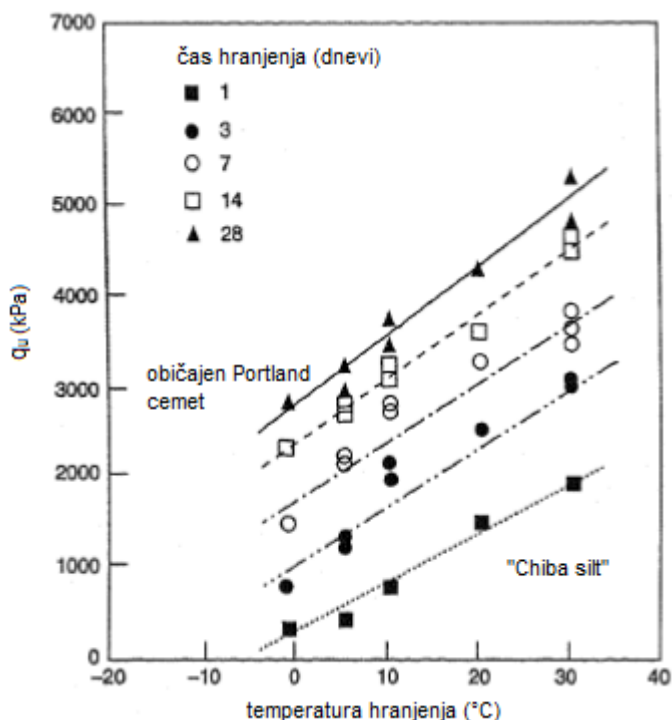
### **3.2.3 Vplivi na pridobivanje trdnosti cementne stabilizacije**

Vplive na pridobivanje trdnosti cementne stabilizacije prikazuje preglednica 8.

Preglednica 8: Povzetek dejavnikov, ki vplivajo na mešanico cementa in zemljine (Topolnicki, 2004).

DEJAVNIKI	Pričakovan vpliv na stabilizirano zemljino
<b>Zrnata zemljina</b>	Zvišuje trdnost zemljine in dovoljuje znižanje vsebnosti cementa v primerjavi z stabiliziranjem drobno zrnate zemljine. Znižuje čas pridobivanja trdnosti, omogoča lažje prodiranje cementa skozi zemljino, onemogoča doseg nizke prepustnosti stabilizirane zemljine.
<b>Glinena zemljina</b>	Zahteva višjo vsebnost cementa v primerjavi s peski, Razvoj trdnosti je počasnejši, vključena je pucolanska reakcija, oviran je prodor cementa v zemljino, znižuje prepustnost stabilizirane zemljine
<b>Fina zrna zemljine</b>	25 odstotkov najmanjših zrn kontrolira trdnost, meljne zemljine imajo nižjo trdnost v primerjavi s čistimi peski.
<b>Prisotnost vode</b>	Tlačna trdnost se znižuje skoraj linearno z višanjem vsebnosti vode. Tok vode lahko povzroči izpiranje cementa.
<b>Vsebnost cementa, suhega (tipični 100–400 kg/m<sup>3</sup>)</b>	V glinah in melju: skoraj linearno pridobivanje trdnosti z višanjem vsebnosti cementa. Višji cementni faktorji izboljšajo trajnost in znižajo propustnost.
<b>Vodo-cementni faktor (<math>w_{cr}</math>) (tipični 0,8–1,2; 0,5–2,5)</b>	Višji faktorji $w_{cr}$ zaradi večje poroznosti cementnega kamna, znižuje enosno tlačno trdnost pridobljeno pri 28 dneh. Nizki $w_{cr}$ faktor minimalizira dodano vodo, potrebno je boljše mešanje.
<b>Prisotnost zraka (suho, mešanje jet)</b>	Znižuje trdnost, lahko vpliva na zmrzlinško odpornost.
<b>Mešanje</b>	Potrebno je boljše mešanje. Učinkovito mešanje z visoko rotacijsko hitrostjo je običajno lažje z uporabo tanjših rezil. Z uporabo večjega števila rezil se zviša tlačna trdnost in zniža variacija trdnosti.
<b>Proces vgradnje</b>	Nizke trdnosti so bile ugotovljene v prekrivajočih conah kolov, ko je časovni zamik med izdelavama kolov pri izgradnji na terenu večji.

Vpliv temperature je pri stabilizaciji s cementom večji kot pri drugih vezivih. Pridobljena trdnost se niža skoraj linearno z nižanjem temperature (slika 20), zato se priporoča hranjenje laboratorijskih cementnih mešanic pri temperaturi, ki odraža realno temperaturo na terenu (Ahnberg, 2006).



Slika 20: Učinek temperature na enosno tlačno trdnost mešanice gline in cementa (Enami, 1985)

### 3.2.4 Dodatki

Dodatki vplivajo na pridobivanje trdnosti, a se pri mokrem mešanju redko uporabljajo z izjemo hidravličnih zapor in okoljskih aplikacij (Topolnicki, 2004).

Latentno hidravlični in pucolanski materiali pri reakcijah potrebujejo  $\text{Ca(OH)}_2$ , katerega vir je hidratacija cementa ali apna, zato se nikoli ne uporabljajo kot samostojna veziva, ampak vedno kot dodatki vezivom. Posledično steče pucolanska reakcija, pri kateri se porablja  $\text{Ca(OH)}_2$ .

#### 3.2.4.1 Dodatki pri stabiliziranju gline in melja

Glina in melj vsebujeta pucolane, zato v njih poteka pucolanska reakcija. Če v osnovno vezivo vključimo dodatke, se porablja  $\text{Ca(OH)}_2$  in se posledično v glini ali melju tvori manj CASH gela. Torej, če v zemljino vmešamo vezivo z dodatkom, posledično v zemljini ne more poteči pucolanska reakcija v celoti, zato nastane manj končnih produktov. Zato velja načelo, da se pri glinah in meljih ne uporabljajo dodatki.

#### 3.2.4.2 Dodatki pri stabiliziranju šote in mulja

Šota in mulj sta organski zemljini. Pri njih dodatki spodbujajo pucolansko reakcijo in posledično izboljšajo stabilizacijo, saj organske zemljine običajno ne vsebujejo zadostne količine pucolanov, da bi se porabil ves  $\text{Ca(OH)}_2$ , ki se tvori pri hidrataciji.

### 3.2.4.3 Elektrofitrski pepel

Elektrofitrski pepel spada med pucolanske materiale. Sam ni zelo reaktiven. Večinoma se uporablja kot dodatek cementu ali apnu. Običajno njegova prisotnost zniža ceno veziva (EuroSoilStab, 2002).

Kot dodatek cementu zviša kemično stabilnost in količino proizvedene toplote pri hidrataciji. Predvideno je zmanjšanje prepustnosti.

EuroSoilStab (2002) poroča o širokem razponu pucolanske reaktivnosti elektrofitrskih pepelov in priporoča kemijsko analizo posameznega produkta.

### 3.2.4.4 Granulirana plavžna žindra

Granulirana plavžna žindra je latentno hidravlični material.

Plavžna žindra je reaktivna le v granulirani obliki. Za oblikovanje steklene strukture je potrebna hitra ohladitev plavžne žindre, kar je bistveno za doseg reaktivnosti delcev. Bolj fina so zrna, bolj reaktivna je žindra.

Kemična sestava je podobna cementu, sestava in reaktivnost žindre pa se razlikuje med posameznimi plavži. Uporablja se vedno kot dodatek in je cenejši nadomestek cementa.

V glini je dolgotrajno zvišanje trdnosti večje z dodatkom granulirane plavžne žindre kot samo s cementom. Pri uporabi žindre je količina produktov reakcije običajno nižja kot z uporabo samo cementa (Taylor 1997), saj ima bistveno nižje razmerje  $\text{CaO/SiO}_2$ .

## 3.3 Izbira veziva

Izbiri veziva pogojujejo procesi strjevanja različnih veziv v zemljinah, vključno s fizikalno-kemijskimi lastnostmi zemljine, ki imajo velik vpliv. Reakcije, ki pogojujejo proces strjevanja, so podane v poglavju 3.1. Upoštevati je treba tudi učinkovanje posameznih veziv in dodatkov ter faktorje, ki vplivajo na njihovo reaktivnost.

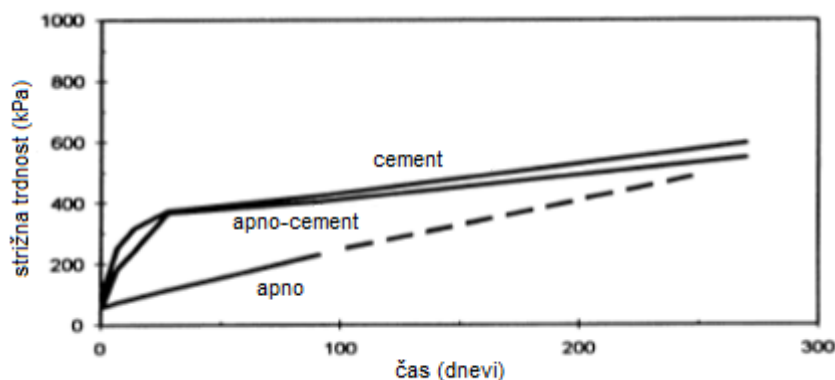
Bistvena je interpretacija teh procesov in učinkovanj za izbiro veziva, glede na lastnosti zemljine, čemur je poglavje 3.3 namenjeno. Vključena so tudi priporočila različnih avtorjev za izbiro veziva glede na vrsto zemljine.

Pri izbiri veziva se je pomembno zavedati, da na lastnosti stabilizirane zemljine pomembno vpliva tudi vsebnost vode v mešanici zemljina-vezivo-voda in masno razmerje voda-vezivo pri uporabi MM. Vpliv teh lastnosti je obravnavan v poglavju 3.4.

### 3.3.1 Časovno priraščanje trdnosti stabilizirane zemljine

Za izbiro veziva je pomembna primerjava priraščanja trdnosti posameznih veziv, mešanih z zemljino, s časom. V poglavju so povzete ocene priraščanja trdnosti s časom osnovnih veziv (apno, cement, apno-cement). Potek priraščanja trdnosti pogojujejo reakcije v mešanici zemljine in veziva, glej 3.1.

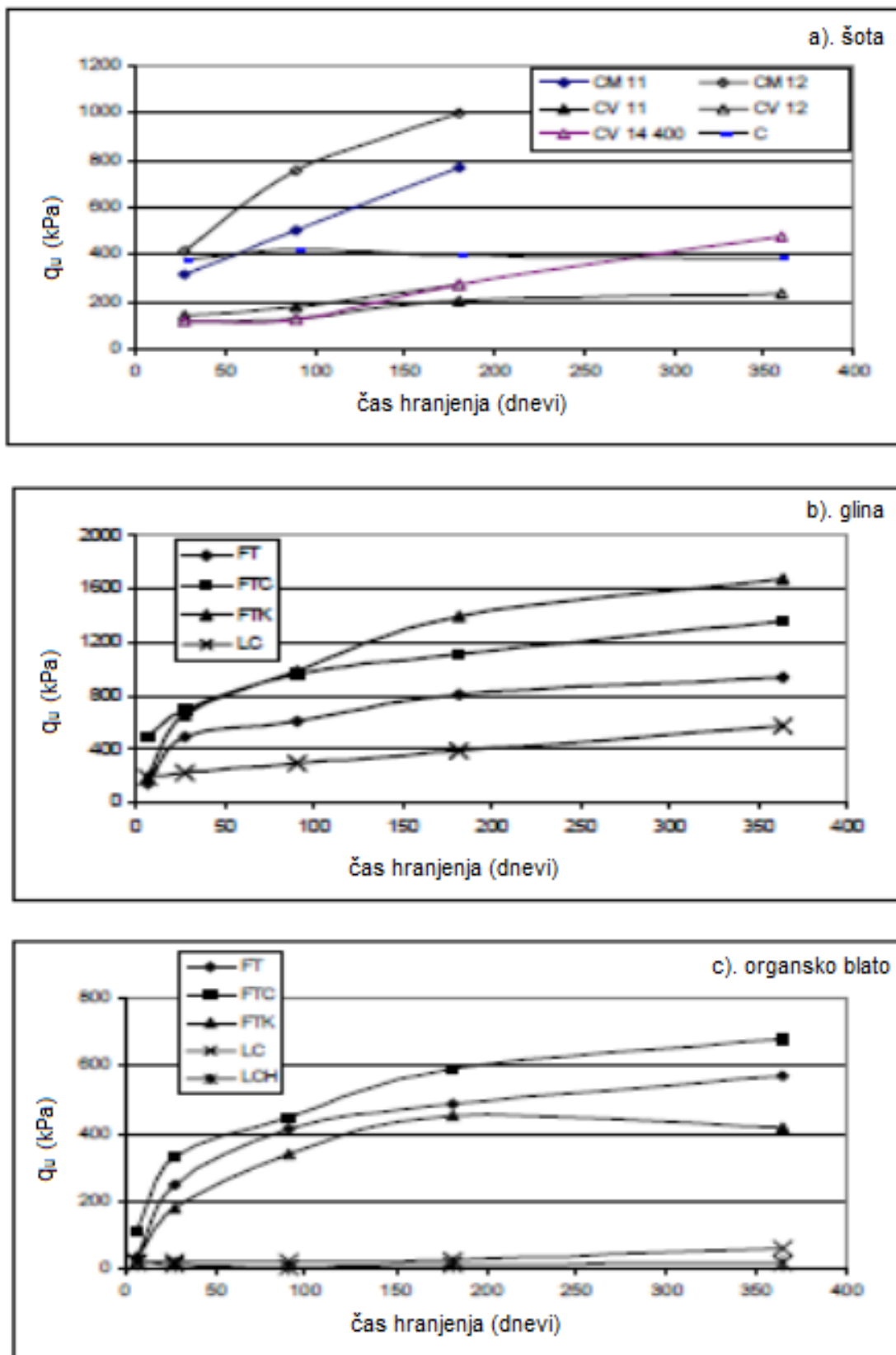
Časovni prirastek trdnosti običajno narašča hitreje s cementom kot z apnom (slika 21).



Slika 21: Prikaz pričakovanega prirastka trdnosti različnih veziv, mešanih z zemljino, s časom (Ahnberg; 1995).

Za stabilizacijo z apnom je karakteristična vrednost za izračun trdnosti po 91 dneh, za stabilizacijo s cementom kot prevladujočim vezivom pa po 28 dneh hranjenja (Broms, 2004; Ahnberg, 2006; EuroSoilStab, 2002).

Zaradi različnega poteka pridobivanja trdnosti EuroSoilStab (2002) za potrditev učinkovanja posameznega veziva priporoča preizkušanje po 91 dneh hranjenja, kar potrjujejo s prikazom poteka pridobivanja trdnosti s časom, z uporabo različnih veziv (slika 22).



Slika 22: Trdnosti v odvisnosti od časa. Zemljine so iz Švedske (šota) in Finske. Oznake veziva: C – cement; M – plavžna žilindra iz Švedske; V – elektrofiltrski pepel; H – elektrofiltrski pepel iz Finske; F – mavec; T – hidrirano apno z min. 505 Ca(OH)<sub>2</sub>; L – žgano apno (CaO); K – plavžna žilindra iz Finske; (Ahnberg, 2006).



### 3.3.2 Priporočila za uporabo apna

Predogled v poglavju 3.2.1.

Žgano apno se uporablja pri SM zemljine. Hidrirano apno se uporablja za MM s cementom (apneno-cementni koli) ali z drugimi vezivi in dodatki.

Žgano apno se priporoča za stabiliziranje glin in meljne glin, ko je vsebnost organskih snovi nizka in je  $w < 100$  odstotkov, kjer pričakovana strižna trdnost dosega vrednosti od 100 do 150 kPa (Broms, 2004). V neorganski glini lahko pričakujemo povečanje trdnosti pri stabilizaciji z žganim apnom za 10- do 20-krat (Ahnberg, 2006).

Miura (1987) je ugotovil, da prisotnost okoli treh odstotkov soli izboljšuje vpliv na trdnost stabilizacije z apnom.

Apno ni učinkovito za stabilizacijo organskih zemljin in zemljin z visoko vsebnostjo zrn peska. Večja vsebnost organskih delcev v zemljini zmanjša učinkovanje apna. Humusne kisline reagirajo s  $\text{Ca(OH)}_2$  in tvorijo netopne produkte, ki z gostijo delce in s tem zavirajo pridobivanje trdnosti s pucolansko reakcijo.

#### 3.3.2.1 Učinkovanje mešanja zemljine

Pri uporabi žganega apna v neorganski glini se trdnost poviša za 10- do 20-krat. Propustnost zemljine se zmanjša in deluje kot drenaža. Interaktivnost izvedenih kolov z mešanjem zemljine z okoljsko zemljino je dobra.

#### 3.3.2.2 Priporočene vsebnosti veziva

Za neorganske glin se priporoča 6–12 odstotkov suhe teže (Broms, 2004).

#### 3.3.2.3 Ocena časovnega prirastka trdnosti apna

Oceno časovnega prirastka apna prikazuje preglednica 9.

*Preglednica 9: Ocena časovnega prirastka trdnosti stabilizirane zemljine s prikazom časovnega naraščanja trdnosti v odstotkih, glede na končno trdnost (Janz, 2002).*

Prirastek trdnosti (% končne trdnosti)	Čas hranjenja (dnevi)
50	30
75	90
90	365

Naraščanje trdnosti je hitrejše na terenu kot v laboratoriju, kar je posledica višjih temperatur in pritiskov v zemljini. Eriksson in Carelsten (1995) navajata, da je končna trdnost dosežena po dvestotih dneh.

### 3.3.3 Priporočila za uporabo cementa

EuroSoilStab (2002) navaja, da je mogoče razmeroma uspešno uporabljati cement v zemljini z vsebnostjo do 30 odstotkov organskih snovi. Topolnicki (2004) navaja, da je stabiliziranje zemljine s cementom ekonomično za zemljine z vsebnostjo organskih snovi do 6 odstotkov v kombinaciji s pH vrednostjo pod 5.

V muljih in šotah je cement manj občutljiv na prisotnost organskih snovi kot apno, saj se gel CHS tvori tudi, če kisline reagirajo s  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Kot posledica nizke vsebnosti glinenih delcev in posledično nizkega potenciala pridobivanja trdnosti na račun reakcije pucolanov v glini in  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  se pri stabilizaciji muljev in šote priporoča uporaba pucolanskih dodatkov.

Za stabilizacijo šote Axelsson (2000) priporoča uporabo cementa z dodatkom granulirane plavžne žindre.

#### 3.3.3.1 Učinkovanje mešanja zemljine

Poviša se trdnost, propustnost se zniža. Slabša je interakcija mešanih kolov in okoljske zemljine kot pri mešanju z apnom.

Pri uporabi cementa za stabilizacijo gline z GM se med zemljino in cementnim kolom ustvari tanka plast relativno nepovezane gline, ki včasih predstavlja mejno cono med kolom in okoliško zemljino in tako zmanjšuje interakcijsko delovanje zemljine in stabiliziranih kolov (Janz, 2002). Razlog ni popolnoma pojasnjen, predlagani razlagi sta dve. Prva razlaga je, da neprepustnost in krčenje kola kot cementnega hidrata ustvarja vertikalni z vodo zapolnjen prostor med kolom in zemljino (Larsson, 2005). Druga razlaga je, da glina postane bolj krhka, ko se razsoli. Larsson (2003) ta pojav povezuje s krčenjem in neprepustnostjo kola.

Učinek nepovezanosti cementnega kola v glini in gline se lahko omili z uporabo apnenocementnih kolov.

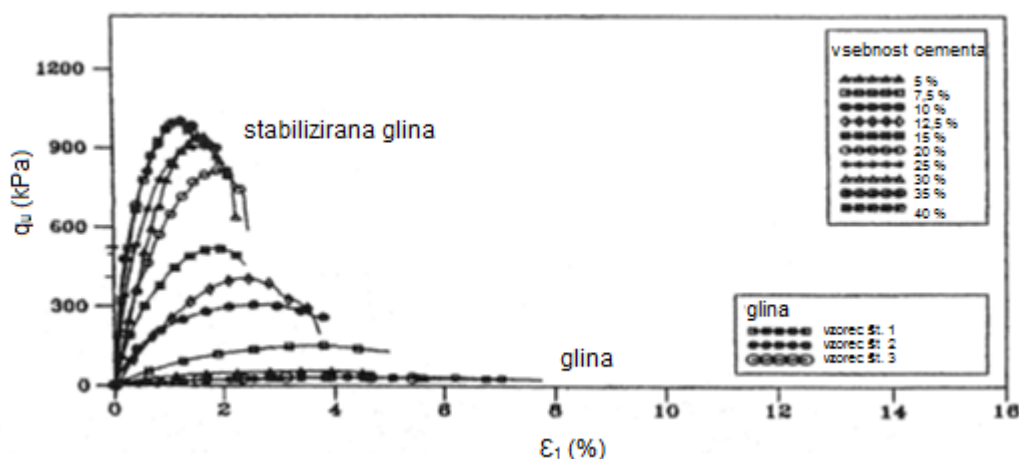
#### 3.3.3.2 Priporočene vsebnosti veziva

Pregled terenskih izvedb stabiliziranja s cementom je glede na vrsto zemljine podan v preglednici 10. Vključuje tudi vsebnosti veziva, dosežene trdnosti in prepustnosti.

Preglednica 10: Priporočene količine cementa pri stabilizaciji zemljin

ZEMLJINA	VSEBNOST VEZIVA	AVTOR	VEZIVO
glinasti melji	4–13 %	H. Ahnberg (2006)	CEM I 42,5 in CEM II 42,5
glina	6–16 %	H. Ahnberg (2006)	
šota	150–250 kg/m <sup>3</sup>	Axelsson (2000)	cement z dodatkom žindre
mulj	100–200 kg/m <sup>3</sup>	Axelsson (2000)	
japonske zemljine	20–30 %	Okumura (1999)	cement
Bangkok clay	10–20 %	Udin (1997)	cement

Večje trdnosti se dosegajo z uporabo hitro vezočega cementa kot z običajnimi cementi Portland (Ahnberg, 2006).



Slika 23: Enoosna tlačna trdnost s cementom mešane mehke gline Bangkok clay; po 28 dneh hranjenja (Udin, 1997)

### 3.3.3.3 Ocena časovnega prirastka trdnosti cementa

Oceno časovnega prirastka trdnosti cementa prikazuje preglednica 11.

Preglednica 11: Prikaz časovnega naraščanja trdnosti v odstotkih, glede na končno trdnost pri stabilizaciji gline s cementom (CDM Association of Japan, 1994).

Prirastek trdnost (% končne trdnosti)	Čas hranjenja (dnevi)	KORELACIJE
50	3	$q_{u28} = (1,49-1,56) q_{u7}$
75	7	$q_{u91} = (1,85-1,97) q_{u7}$
90	90	$q_{u91} = (1,20-1,33) q_{u28}$

### 3.3.4 Priporočila za uporabo apno-cementa

Je relativno nova metoda stabilizacije zemljin z GM, ki izhaja iz Skandinavije. Kombinacija cementa in apna pogosto prinaša višje končne trdnosti v primerjavi s stabilizacijo s posameznim vezivom. Apneno-cementna metoda se večinoma izvaja v skandinavskih državah, in sicer večinoma pri SM z uporabo žganega apna. Pri MM se uporablja hidrirano apno.

Apno-cementno vezivo je učinkovito tudi pri stabilizacijah organskih zemljin (Broms, 2004; Ahnberg, 2006).

Uporaba apno-cementnega veziva je za stabilizacijo priporočena, ko je  $w = 40-80$  odstotkov, trdnost pred stabilizacijo je  $10-20$  kPa (Broms, 2004). Po nekaterih navedbah lahko z uporabo apno-cementnega veziva učinkovito stabiliziramo zemljine z razmerjem  $w/w_1$  do 1,5 (Broms, 2004).

Hidratacija cementa daje hitro pridobljeno trdnost, medtem ko apno proizvaja toploto, ki pospešuje pucolansko reakcijo. Hidratacija apna proizvede velike količine  $\text{Ca(OH)}_2$ , ki je potreben za aktivacijo pucolanske reakcije in ionsko izmenjavo v glini. Učinek na stabilnost je pozitiven.

Količina apna ne sme presegati količine, ki je potrebna za reakcijo pucolanov s  $\text{Ca(OH)}_2$  (Janz, 2002). Ko pucolanska reakcija poteče, apno ne vpliva več na pridobivanje trdnosti.

Po navedbah Janza (2002) je optimalno masno razmerje veziva za doseganje najvišje trdnosti 10–40 odstotkov apna in 60–90 odstotkov cementa. Količino apna zmanjšujemo z večanjem vsebnosti organskih snovi v zemljini. Učinkovito masno razmerje veziva apno-cement je 25/75 in 50/50 (Janz, 1999; Ahnberg, 2006).

### 3.3.4.1 Priporočene vsebnosti veziva

Broms (2004) za stabiliziranje z apno-cementom priporoča mešanje z dodatkom 10–20 odstotkov veziva, glede na suho maso zemljine.

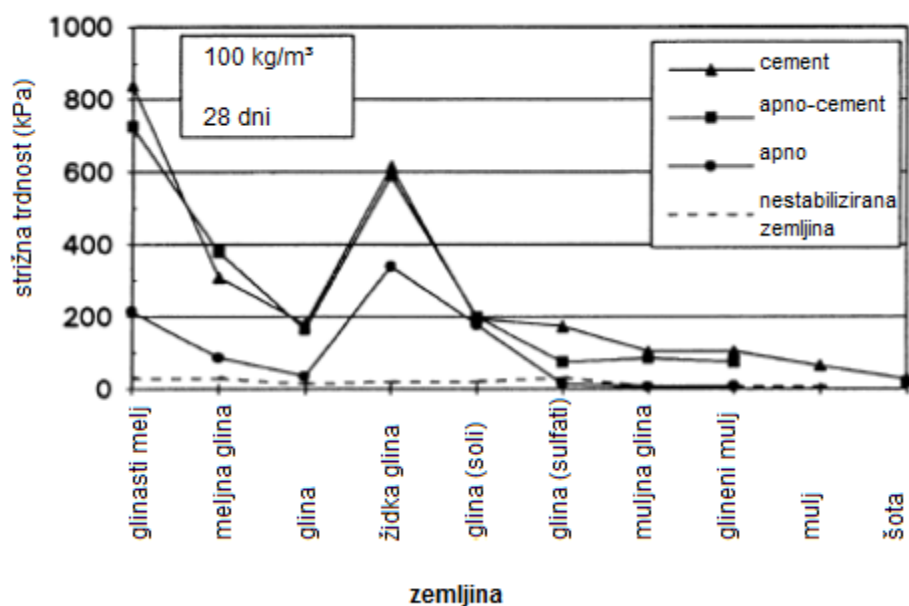
### 3.3.5 Priporočila za izbiro vrste veziva, glede na vrsto zemljine

#### 3.3.5.1 Ahnberg (2006)

Oceno učinkovanja različnih veziv v kombinaciji z različnimi vrstami zemljin prikazuje preglednica 12. Ocena je podana na podlagi doseženih vrednosti, podanih na sliki 24. Masno razmerje apno/cement je 25/75.

*Preglednica 12: Ocena učinkovanja veziva na trdnosti zemljine; – brez učinka ali slab učinek; \* sorazmerno dober učinek; + dober učinek; ++ zelo dober učinek (Ahnberg; 1995)*

STABILIZATOR	VEZIVO									
	Glinasti melji	Meljna glina	glina	Židka glina	Glina, ki vsebuje soli	Glina, ki vsebuje sulfate	Muljna glina	Glineni mulj	Mulj	Šota
Apno	*	+	*	+	+	-	*	*	-	-
Cement	+	+	+	+	+	+	+	*	*	*
Apno-cement	++	++	+	++	+	+	+	+	+	+



Slika 24: Merjene enoosne tlačne trdnosti laboratorijsko pripravljenih vzorcev različnih veziv in zemljin po 28 dneh pri vsebnosti veziva  $100 \text{ kg/m}^3$  in z masnim razmerjem apno-cestnega veziva 25/75 (Ahnberg, 1995)

### 3.3.5.2 EuroSoilStab (2002)

Priporočila za izbiro vrste veziva po EuroSoilStab (2002) prikazuje preglednica 13.

*Preglednica 13: Relativni prirastek trdnosti, glede na laboratorijske teste na skandinavskih zemljinah; +++ zelo dobro vezivo v večini primerov, ++ dobro vezivo v večini primerov, + dobro vezivo v nekaterih primerih, - neustrezno veziov (EuroSoilStab, 2002)*

<b>VEZIVO</b>	<b>MELJ</b>  vsebnost organskih snovi 0–2 %	<b>GLINA</b>  vsebnost organskih snovi 0–2 %	<b>ORGANSKA ZEMLJINA ( npr. MULJ)</b>  vsebnost organskih snovi 2–30 %	<b>ŠOTA</b>  vsebnost organskih snovi 50–100 %
Cement	++	+	+	++
Cement mavec +	+	+	++	++
Cement plavžna žindra +	++	++	++	+++
Apno + cement	++	++	+	-
Apno + mavec	++	++	++	-
Apno + žindra	+	+	+	-
Apno + mavec + žindra +	++	++	++	-
Apno + mavec + cement +	++	++	++	-
Apno	-	++	-	-

### 3.3.5.3 Topolnicki (2004)

Pričakovane končne trdnosti pri stabiliziranju zemljine s cementom na terenu v različnih zemljinah s priporočeno količino veziva, pričakovanimi končnimi trdnostmi in oceno propustnosti prikazuje preglednica 14.

*Preglednica 14: Pričakovane končne trdnosti pri stabiliziranju zemljine s cementom na terenu v različnih zemljinah s priporočeno količino veziva, pričakovanimi končnimi trdnostmi in oceno propustnosti. Cementni faktor je vsebnost cementa na kubični meter stabilizirane zemljine (kg/m<sup>3</sup>) (Topolnicki, 2004).*

TIP ZEMLJINE	Cementni faktor (kg/m <sup>3</sup> )	q <sub>u</sub> (MPa), vrednost po 28 dneh	Prepustnost, k (10 <sup>-9</sup> m/s)
mulj	250–400	0,1–0,4	10
šota, organski melji/gline	200–350	0,3–1,2	5
mehke zemljine	150–300	0,6–1,7	5
meljna glina, organska glina	120–300	0,7–2,5	5
melji in meljni peski	120–300	1,0–3,0	10
fini in srednji peski	120-300	1,5-5,0	50
grobo zrnati peski in grušč	120–250	3,0–7,0	100

#### 3.3.5.4 Neorganske zemljine

Žgano apno je učinkovito za normalno konsolidirane ali rahlo prekonsolidirane gline s srednjim ali nizkim indeksom plastičnosti in visokim razmerjem občutljivosti.  $I_p > 10$  % je pogoj, da je apno učinkovito. Strižna trdnost se poveča za 10- do 20-krat, maksimalna pričakovana vrednost je 200–300 kPa.

Apno učinkuje na frakcije gline z ionsko izmenjavo. Negašeno apno zmanjša  $w$ . Cement učinkuje na frakcije melja in peska. Tako lahko predvidevamo, da sta kot vezivo apno-cement in cement bolj učinkovita za melje in peske kot tudi za organske zemljine, kjer je vsebnost gline nizka.

Višja trdnost je običajno pridobljena z uporabo apno-cementa ali cementa kot z apnom. Z apnom je dosežena višja trdnost pri glinah z visoko vsebnostjo soli (optimalna  $> 3$  %), zaradi obsežnejše poculanske reakcije kot posledice vsebnosti kloridnih ionov.

Natrijev in kalcijev sulfat zmanjšata trdnost zaradi tvorjenja etringita. Prirastek trdnosti je pri uporabi apna počasen v primerjavi z apno-cementom in cementom. Stabilizacija z žganim apnom je priporočljiva za gline in meljne gline, ko je  $w < 90$ – $100$  % in je vsebnost organskih snovi nizka (Broms, 2004).

Z žganim apnom stabilizirana zemljina dosega visoko propustnost in duktilnost, predvidena dosežena strižna trdnost je manjša od 150 kPa.

### 3.3.5.5 Organske zemljine

Običajno na pridobljeno trdnost pri stabilizaciji bolj kot količina vpliva vrsta organskih snovi v zemljini. Reakcija organskih materialov s hidriranimi produkti znižuje pH vrednost in obseg pucolanske reakcije.

Babasaki (1996) poroča, da je zvišanje enoosne tlačne trdnosti stabiliziranja organskih zemljin z vlažnostjo zemljine nad dvesto odstotkov majhno tudi z uporabo 35 odstotkov cementa.

Broms (2004) poroča, da sta apno-cement in cement učinkovita tudi za organske glin, kjer z apnom samim ne dosežemo pomembnega povečanja trdnosti. Apno-cementno stabiliziranje je učinkovito v zemljinah s trdnostjo nad 5 kPa.

Učinkovitost stabiliziranja organskih zemljin je odvisna tudi od vsebnosti vode v zemljini. Predvsem od razmerja  $w / w_L$ . Glej poglavje 3.3.2.

### 3.3.5.6 Šota

Navedene so klasifikacije, glede na razgradnjo (H1–H10) po stopnjah Von Posta. Vlankasta šota (H1–H4) ima prepoznavno strukturo rastlin v primerjavi z amorfno šoto (H8–H10), kjer je rastlinska struktura nejasna.

Dosežena trdnost stabilizirane šote se zmanjša z zmanjšanjem vsebnosti cementa, zvišanjem razgradnje šote in vsebnosti humusne kisline in delcev (Kujala, 1984). Zvišanje je majhno in počasno, ko sta vsebnost humusa visoka in pH nizek. Celotna vsebnost humusa 1,5–2,0 odstotka lahko bistveno zmanjša vpliv na trdnost.

Potrebna je visoka vsebnost cementa (Axelsson, 1996). Trdnost od 30 do 50 kPa lahko dosežemo v 14 dneh z 200 kg cementa na 1 m<sup>3</sup> zemljine. Axelsson (1999) priporoča za stabilizacijo šote uporabo cementa z dodatkom žindre, in sicer količinsko 150–250 kg/m<sup>3</sup>. Najvišje zvišanje pri šoti je bilo zabeleženo z uporabo veziva hitro vezočega cementa in granulirane plavžne žindre v masnem razmerju 50/50.

Literatura navaja, da je možno povečati trdnost tudi z uporabo mešanice veziv cementa in mavca. Povečanje trdnosti je slabo z uporabo apna in elektrofiltrskega pepela (Axelsson, 2002).

V preglednici 15 so podane nekatere karakteristike stabiliziranja šote po navedbah različnih avtorjev.

Preglednica 15: Pregled stabiliziranja šot s cementnim vezivom

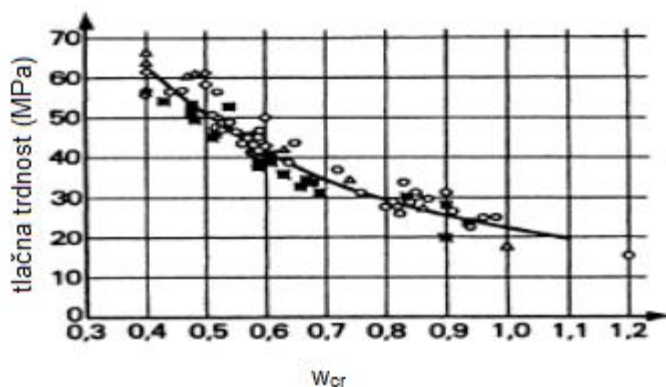
AVTOR	VSEBNOST CEMENTA (kg/m <sup>3</sup> )	ČAS HRANJENJA (dnevi)	DOSEŽENA TRDNOST (kPa)	KLASIFIKACIJA ŠOTE PO VAN POSTU	VLAŽNOST ŠOTE (%)
Huttunen, Kujala (1996)	400	180	305	H2	1265
	400	180	112	H3	981
Haikkala (1997)	300	30	105		
	150	30	35–75		
Axelsson (1996)	150	28	80		
	250	28	280		



### 3.4 Vpliv razmerja med celotno vodo in zemljino na trdnost

Ker je vpliv razmerja celotna voda-zemljina najboljše raziskan in pojasnjen za cementno stabilizacijo, se poglavje nanaša večinoma na cementno stabilizacijo. Če vezivo ni eksplicitno navedeno, se vezivo nanaša na cement ali cementno stabilizacijo.

Ysberg (1979) navaja, da se vpliv masnega razmerja celotne vode mešanice ( $w_{tot}$ ) na suho zemljino, na trdnost stabilizirane zemljine, kaže podobno kot vpliv vodo cementnega razmerja ( $w_{cr}$ ) na trdnost betona, slika 25.



Slika 25: Razmerje med  $w_{cr}$  in trdnostjo (krivulja se nanaša na beton) (Janz, 2002)

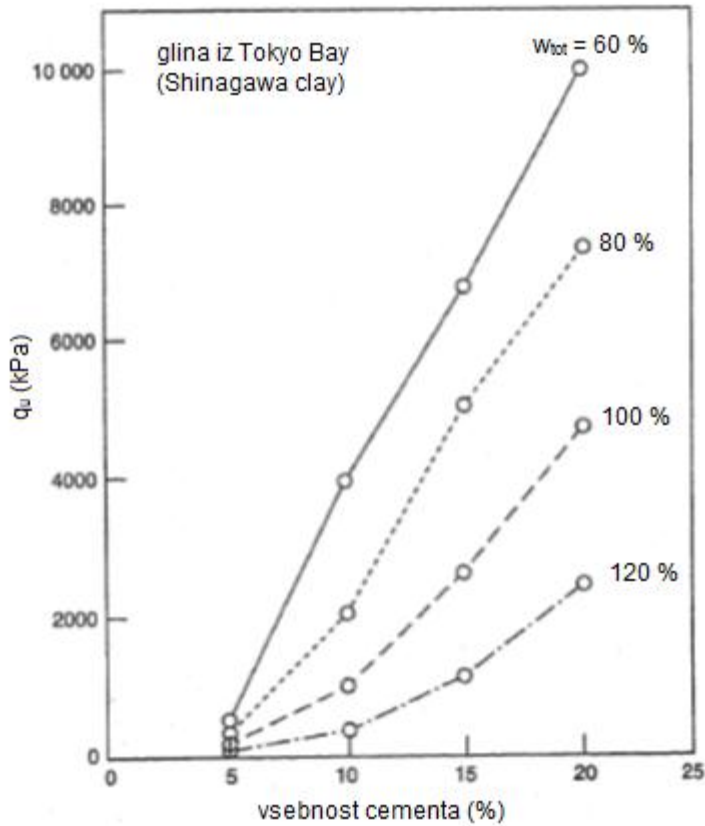
Pridobivanje trdnosti v organskih zemljinah, stabiliziranih s cementom, je v velikem obsegu pogojeno z masnim razmerjem celotne vode na cement (v nadaljevanju  $w_{tot}/C$ ) (Ahnberg, 1995; Rathmajer, 1997; Kukko, 1985). Holm (1994) poroča, da pri stabilizaciji s cementom trdnost narašča približno linearno z nižanjem razmerja  $w_{tot}/C$ . Ansano (1997) je ugotovil, da je zvišanje trdnosti večinoma odvisno od razmerja  $w_{tot}/c$  (uporaba enačbe je omejena na organske zemljine stabilizirane s cementom) in podal naslednjo korelacijo trdnosti, glede na razmerje  $w_{tot}/C$  po 28 dneh hranjenja:

$$\tau_{28} = \frac{\tau_{28,design}}{\frac{w_{tot}}{c}},$$

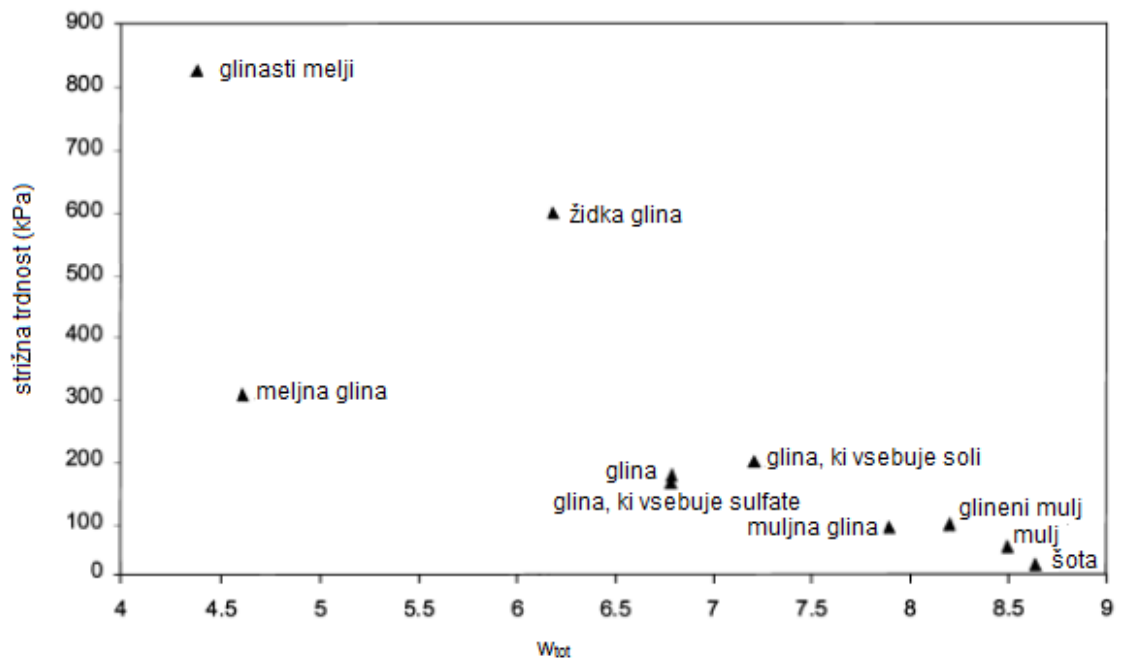
$\tau_{28,design}$  je referenčna vrednost trdnosti cementno mešane zemljine, dosežene po 28 dneh hranjenja, pri uporabi razmerja  $w_{tot}/C$  je 1,0.

$\tau_{28, design}$  variira glede na vrsto zemljine, vsebnosti organskih snovi in pH vrednosti. Faktorji vpliva na pridobitev trdnosti so podrobneje opisani in razloženi v poglavjih 3.1, 3.2 in 3.3. Glede na zgornjo enačbo, se trdnost v organskih zemljinah poveča za sto odstotkov, če razmerje  $w_{tot}/C$  znižamo za 50 odstotkov, npr. iz 8 na 4. Ansano (1997) je z raziskavami ugotovila, da je v organskih zemljinah, stabiliziranih z uporabo razmerja  $w_{tot}/C$  1,0, pričakovana trdnost med 2–4 MPa in da je pri uporabi razmerja  $w_{tot}/C$  od 1,2–1,5 pričakovana vrednost trdnosti 1 MPa. Korelacija je bila eksperimentalno ugotovljena na preizkušancih organske zemljine z območja Japonske, stabilizirane s cementnim vezivom.

Vpliv masnega razmerja  $w_{tot}/C$  so z laboratorijskimi preizkusi raziskali tudi Ahnberg (1995), Endo (1976) in Soralumpa (1996). Rezultati so podani na slikah 26, 27 in 28 ter preglednici 16. Soralumpa (1996) je preizkušal gline z območja poteka avtoceste Banga–Trad na Tajskem.



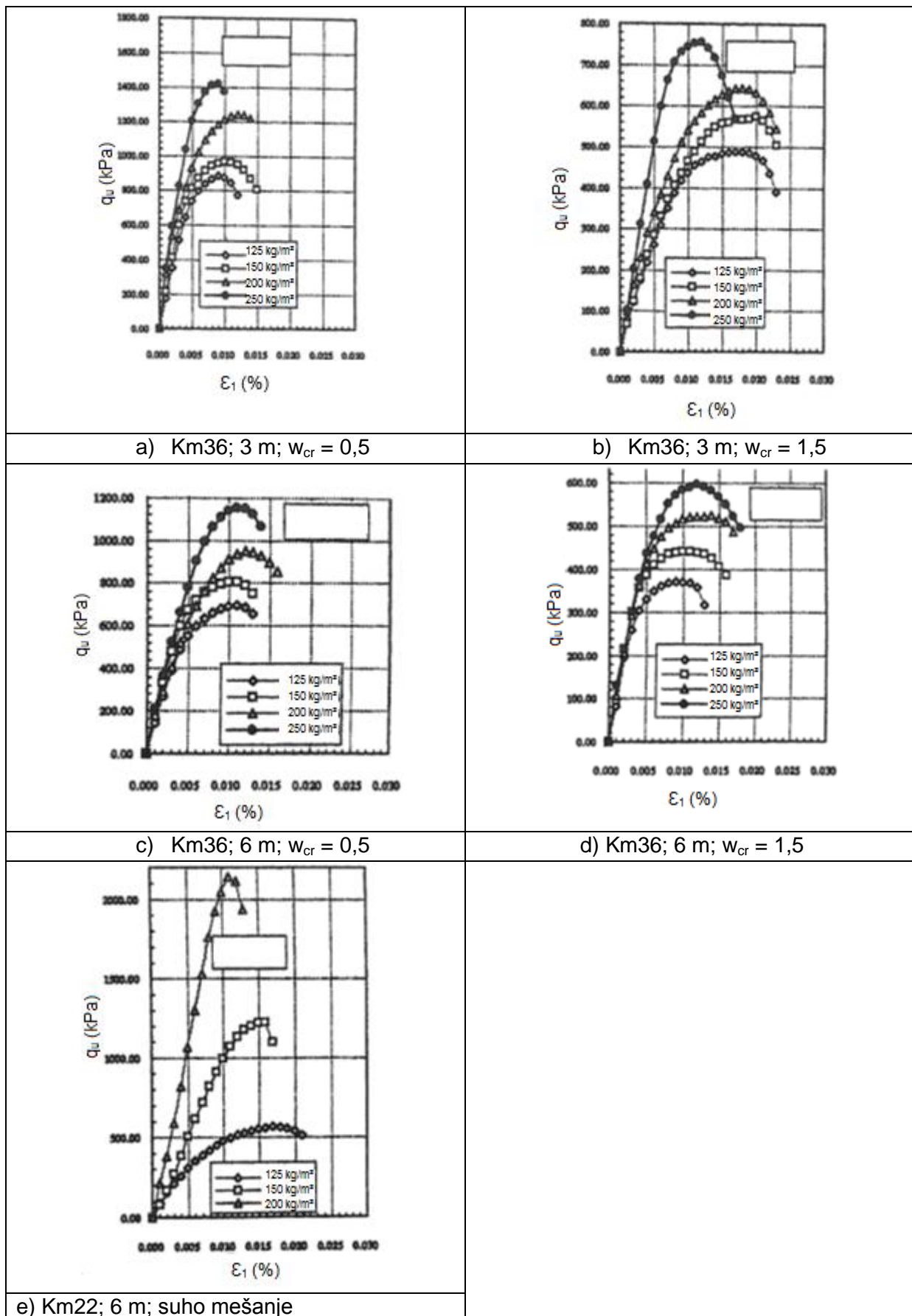
Slika 26: Vpliv  $w_{tot}$  v stabilizirani zemljini po 60 dneh (Endo, 1976)



Slika 27: Trdnosti različnih vrst cementno stabiliziranih zemljin, ki so prikazane kot funkcija razmerja  $w_{tot}/C$ , merjene po 28 dneh (Ahnberg, 1995).

*Preglednica 16: Lastnosti preizkušane gline (Soralumpa, 1996)*

<b>LOKACIJA</b>	<b>GLOBINA (m)</b>	<b>w (%)</b>	<b>w<sub>L</sub> (%)</b>	<b>w<sub>P</sub> (%)</b>	<b>I<sub>P</sub></b>	<b>PROSTORNINSKA TEŽA (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>SUHA TEŽA ZEMLJINE (t/m<sup>3</sup>)</b>	<b>VSEBNOST ORGANSKIH SNOVI (%)</b>
Km 36	3	116–125	115,9	32,4	83,5	1,385	0,628	4,98
	6	135–140	120,5	40,0	80,5	1,336	0,564	5,59
	12	92–107	85,7	34,4	51,3	1,446	0,723	5,89
	15	76–83	85,9	26,0	60,0	1,521	0,845	5,31
Km 22	6	111–116	120,2	43,2	77,0	1,362	0,639	6,61

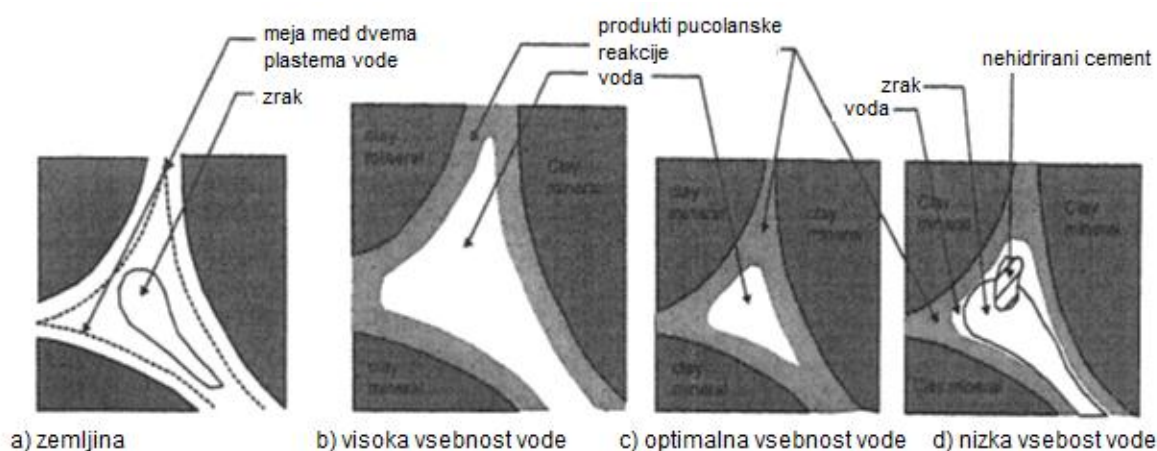


Slika 28: Primerjava tlačnih trdnosti zemljine z vmešavanjem različnih  $w_{cr}$  cementne paste (Soralumpa, 1996)

Kot je prikazano na zgornjih slikah, ima vsebnost vode v stabilizirani zemljini velik vpliv na trdnost. Po prikazanem bi si želeli čim manjšo vsebnost vode, kar pa omejuje tehnologija mešanja zaradi zagotovitve homogenosti mešanice. Predvidevamo lahko, da obstaja optimalna celotna vsebnost vode v mešanici za doseg optimalne trdnosti. Raziskave obstoja optimalne vsebnosti celotne vode mešanice so opisane v poglavju 3.4.1.

### 3.4.1 Optimalna vlažnost mešanice ( $w_{tot,opt}$ ) v glinah, stabilizirane s cementom

Optimalna vlažnost mešanice (v nadaljevanju  $w_{tot,opt}$ ) je izražena z deležem celotne vode na težo suhe zemljine. Obstoj optimalne vlažnosti mešanice se nanaša na cementno stabiliziranje gline. Prikaz učinkovanja vsebnosti vode pri mešanju glin s cementom prikazuje slika 29.



Slika 29: Shematičen prikaz vpliva vsebnosti celotne vode pri mešanju glin s cementom (Lorenzo, 2006)

Iz rezultatov preiskav, podanih na slikah od 29 do 33, lahko sklepamo, da vsebnost vode pomembno vpliva na trdnost stabilizirane mešanice. Posledično lahko trdimo, da je ugotovitev optimalne vlažnosti mešanice za ekonomičnost stabiliziranja pomembna, potrebna in upravičena.

Lorenzo (2006) navaja, da se poraba cementnega veziva z mešanjem pri upoštevanju optimalne vlažnosti zemljine lahko za doseg enake trdnosti, glede na mešanice pri drugih vsebnostih vode, lahko zniža za 40 odstotkov. Pri preiskavah Lorenza (2006) se je vsebnost cementa za doseg enake trdnosti z upoštevanjem  $w_{tot,opt}$  zmanjšala s 17 na 10 odstotkov.

Vrednost  $w_{tot,opt}$  lahko ugotovimo s preiskavami mešanic z različnimi vsebnostmi  $w_{tot}$ . Preizkušance testiramo s tlačnim poskusom ali edometrijskim preskusom. Na podlagi izmerjenih enosnih tlačnih trdnosti ugotovimo optimalno vsebnost vode.

#### 3.4.1.1 Enačbe

- Količino potrebne dodane vode lahko izračunamo po enačbi Lorenza (2006):

$$\Delta W_w = W_T \frac{(w_{tot} - w)}{(1 + w)},$$

kjer je  $\Delta W_w$  dodatna masa vode (g),  $W_T$  je masa naravne zemljine (g),  $w_{tot}$  je potreben odstotek celotne vode mešane zemljine (%) in  $w$  je naravna vlažnost (%).

- Enačbo za izračun celotne vode v mešanici  $w_{tot}$  vključuje vlažnost zemljine ( $w$ ) in potrebno dodatno vodo. Potrebno dodatno vodo sestavljata voda cementne paste ( $w_{cr} \cdot A_v$ ) in dodatek vode pred stabiliziranjem ( $w_1$ ). Dodatna voda pred stabiliziranjem se običajno vnaša v zemljino med vtiskanjem mešalnega orodja v zemljino. Tako vtiskanje vode v zemljino omogoča lažji prodor veziva v zemljino.

$$w_{tot} = w + w_1 + w_{cr} \times A_{v1},$$

kjer je  $w_{tot}$  podana v odstotkih, glede na suho zemljino,  $w_{cr}$  je masno razmerje med vodo in cementom v cementni pasti in  $A_v$  je zahtevana vsebnost cementa v odstotkih (%), glede na suho zemljino.

Enačba zanemarja izgubo vode v procesu hidratacije, saj je izguba v procesu hidratacije zanemarljiva v primerjavi s celotno količino vode (Lorenzo, 2006).

### **3.4.2 Pregled karakteristik glin, stabiliziranih s cementom, glede na razmerje med skupno vsebnostjo vode v mešanici in mejo židkosti**

#### **3.4.2.1 Mehka glina Bangkok clay**

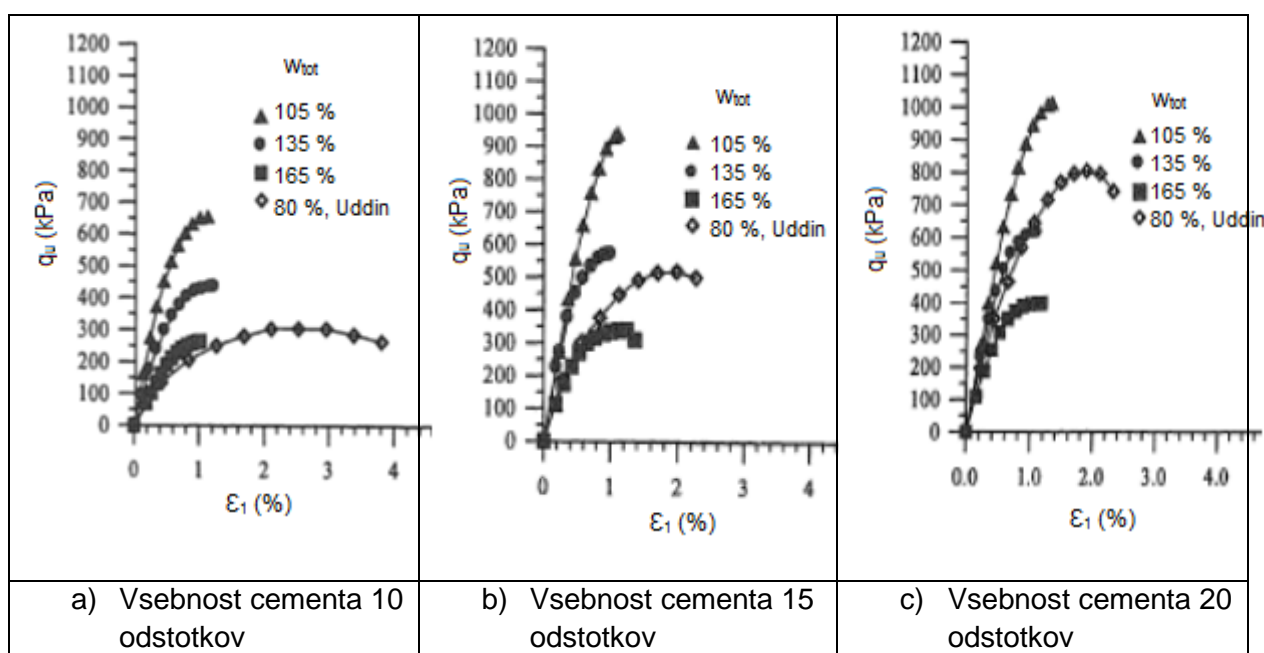
Lorenzo (2006) je testiral mehko glino Bangkok clay. Lastnosti zemljine so podane v preglednici 17. Pri preiskavah je  $w_{tot}$  variirala glede na mejo židkosti, in sicer med 1,0–1,5 krat  $w_L$ . Navedeni so tudi podatki preizkušanja zemljine: pri  $w_{tot}$  je 0,8  $w_L$ . Program preiskav Lorenza (2006) je vključeval pripravo vzorcev za edometriške in enoosne tlačne preizkuse. Vzorci so bili mešani: pri  $w_{tot}$  je 100, 130 in 160 odstotkov in z vsebnostmi 10, 15 in 20 odstotkov cementa za izvedbo tlačnih preskusov in z vsebnostmi 10 in 15 odstotkov cementa za izvedbo tlačnih poskusov. Za pripravo cementne paste je bilo uporabljeno  $w_{cr}$  je 0,6.

• **Karakteristike preiskovane zemljine**

Preglednica 17: Osnovne lastnosti Bangkok clay (Lorenzo, 2006).

LASTNOSTI	OZNAKA Z ENOTO	KARAKTERISTIČNA VREDNOST
Meja židkosti	$w_L$ (%)	103
Meja plastičnosti	$w_p$ (%)	43
Indeks plastičnosti	$I_p$ (%)	60
Vlaga	$w$ (%)	76–84
Zrnavostna porazdelitev		
Glina	(%)	69
Melj	(%)	28
Pesek	(%)	3
Totalna specifična teža	$\gamma_{tot}$ (kN/m <sup>3</sup> )	14,3
Suha specifična teža	$\gamma_{dry}$ (kN/m <sup>3</sup> )	7,73
Delež por	$e$	2,31
Barva		temno siva
Aktivnost		0,87
Občutljivost		7,4

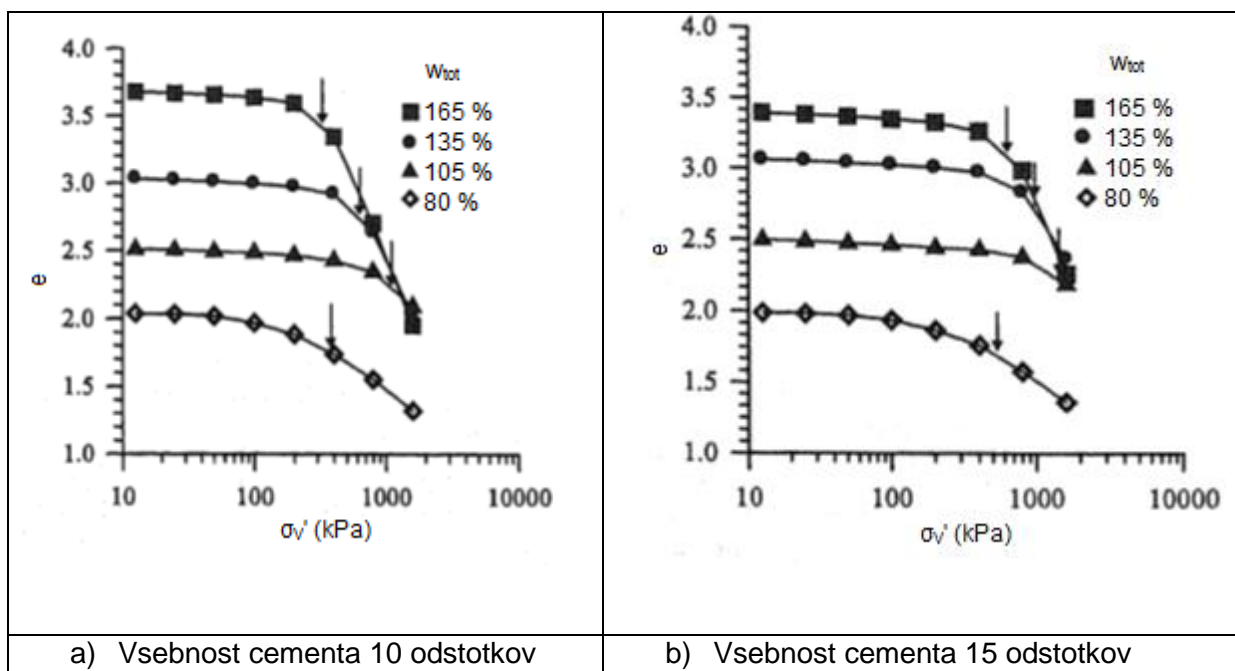
• **Tlačne trdnosti z različno vsebnostjo skupne vode v mešanici, pri različni vsebnosti cementa**



Slika 30: Rezultati enosnih trdnosti mešanic Bangkok clay pri različni vsebnosti celotne vode in različnih vsebnostih cementa (Lorenzo, 2006)

Slika 30 prikazuje obstoj optimalne vsebnosti vode  $w_{tot,opt}$ . S slike 34 je razvidno, da je  $w_{tot,opt}$  približno enaka  $w_L$ . Razvidne so bistveno višje vrednosti trdnosti mešanic, pripravljenih pri  $w_{tot}$  je 105 odstotkov.  $w_L$  zemljine je 103 odstotke, kar je blizu vlažnosti optimalnih mešanic. Trdim lahko, da je optimalna vlažnost mešanice ( $w_{tot,opt}$ ) preiskovane zemljine, stabilizirane s cementom, blizu meje židkosti.

- **Rezultati preiskav stisljivosti**



Slika 31: Rezultati preiskav stisljivosti mešanic Bangkok clay pri različni vsebnosti celotne vode in različnih vsebnostih cementa (Lorenzo, 2006)

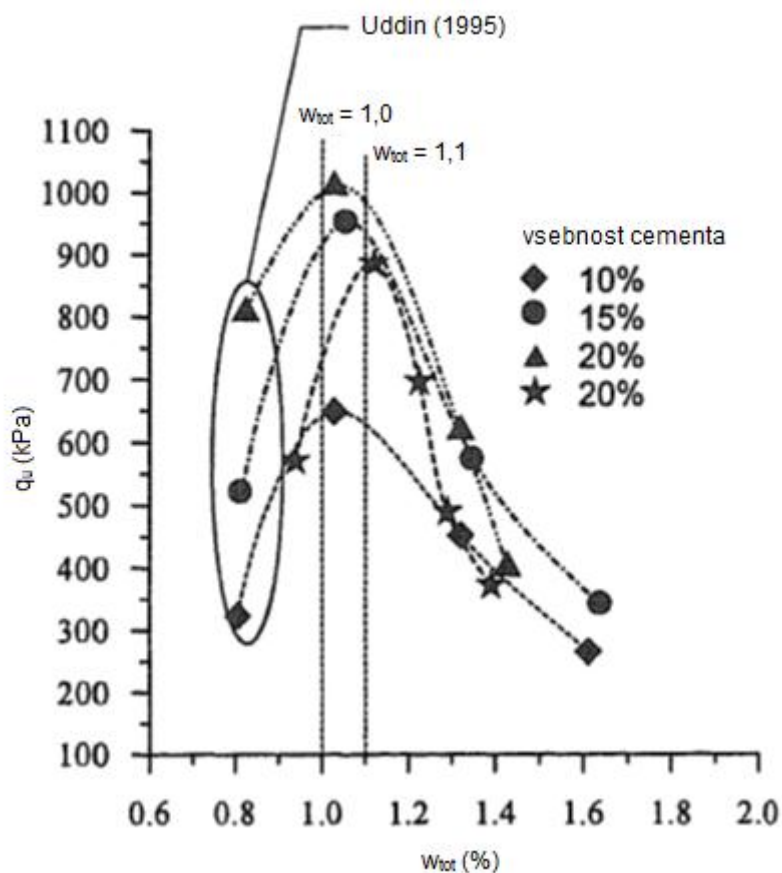
Rezultati enosne tlačne trdnosti so bili potrjeni z rezultati edometriških preiskav stisljivosti (slika 31), s katerimi je Lorenzo (2006) potrdil obstoj  $w_{tot,opt}$ .

Opazimo lahko, da izkazuje največji prekonsolidacijski tlak mešanica zemljine z vsebnostjo celotne vode 105 odstotkov. Vidimo tudi, da je togost te mešanice v območju tlakov pri preiskavi (do 1600 kPa) največja. Vpliv previsoke in prenizke vsebnosti celotne vode je lepo izražen.

- **Ugotovitve Lorenza (2006)**

Ugotovitve Lorenza (2006) prikazuje slika 32.

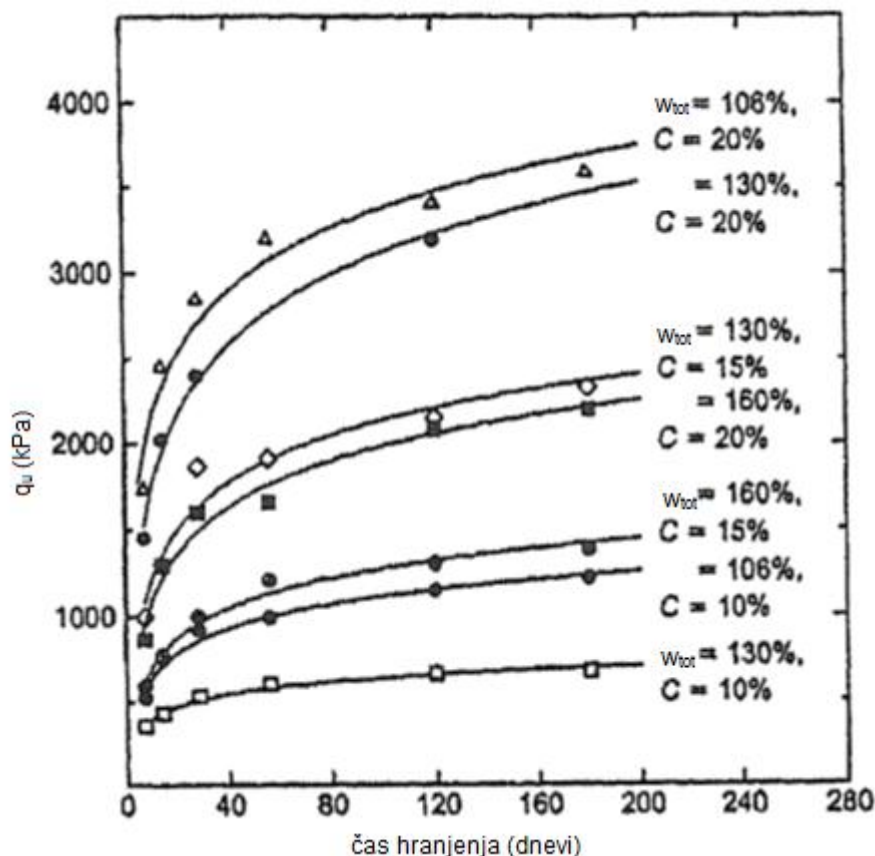




Slika 32: Trdnost cementno stabilizirane zemljine s prikazom  $w_{tot,opt}$  (kot  $C_w/LL$ ) po 28 dneh hranjenja (Lorenzo, 2006)

### 3.4.2.2 Židka glina Ariake clay

Horpibulsuk (2005) je z namenom ugotovitve vpliva  $w_{tot}$  na trdnost cementno stabilizirane zemljine preizkušal različne mešanice zemljine Ariake clay iz Nišioke z  $w_L$  je 120 odstotkov in  $w$  večjo od  $w_L$ .



Slika 33: Razvoj trdnosti cementno mešanih Ariake clay s časom, pri  $w_{tot}$  je 1–2-krat  $w_L$ ;  $C$  je vsebnost cementa v odstotkih,  $w_c$  je  $w_{tot}$ , (Horpibusuk, 2005).

V tem primeru je najvišja dosežena trdnost pri mešanici z  $w_{tot}$  je 106 in 130 odstotkov. Rezultate lahko interpretiramo v obliki razmerja  $w_{tot,opt}$  in  $w_L$ :

$$w_{tot,opt} = (0,88 - 1,08) \times w_L$$

### 3.4.2.3 Priporočilo za mešanice v Luki Koper

$w_{tot,opt}$  lahko ocenim tudi iz priporočila podružnice podjetja Keller (LCM, Gothenburg, Švedska) za uporabo veziva z namenom izvedbe globinskega mešanja v zemljini na pomolu I v Luki Koper. Izračun vsebnosti vode temelji na  $w_L$ .

Preglednica 18: Priporočena vsebnost vode in veziva, glede na  $w_L$  (LCM, Gothenburg)

<b>ORGANSKA GLINA</b>	
<b>LASTNOST</b>	<b>VREDNOST</b>
Prostorninska teža	1,78 t/m <sup>3</sup>
w	47,5 %
$w_L$	61 %
Vsebnost organskih snovi	10,3 %
Naravna voda v zemljini	574 kg/m <sup>3</sup>
Voda v zemljini pri meji židkosti	676 kg/m <sup>3</sup>
$w - w_L$	101 kg/m <sup>3</sup>

Švedska podružnica podjetja Keller priporoča za stabilizacijo zemljine iz Luke Koper uporabo cementa (100 kg/m<sup>3</sup>) in vode (80 kg/m<sup>3</sup>) za zagotovitev homogenosti in lažjega mešanja. Podaja tudi oceno končne strižne trdnosti tako stabiliziranih kolov, in sicer predvideva strižno trdnost kolov med 100 in 150 kPa.

Iz priporočila je razvidna predvidena vlažnost mešanice blizu meje židkosti, in sicer:

$$w_{\text{tot,opt}} = 0,97 \times w_L.$$

## 4 EKSPERIMENTALNI DEL

Faktorjev vpliva na pridobljeno trdnost je veliko. Nekateri vplivi na laboratorijsko ocenjeno trdnost so (Porbaha, 2000):

- fizikalno-kemične lastnosti zemljine, kot je zrnavostna porazdelitev, minerologija, vsebnost vode, reaktivnost, vsebnost organskih snovi, pH in Attebergove meje,
- kakovost in količina veziva ter dodatkov,
- pogoji mešanja in hranjenja, kot so vodo/cementni faktor, čas mešanja in čas hranjenja,
- metode odvzema in testiranja, kot so porazdelitev vzorca, vrsta laboratorijske preiskave, hitrost deformacije, metoda merjenja deformacije.

Glavi namen preiskav za simulacije GM je izbira veziva in ocena inženirskih parametrov stabiliziranih zemljin. Vzorce smo testirali z enoosnim tlačnim preskusom.

Za namen laboratorijske simulacije GM je potrebna sestava programa mešanja, ki temelji na izbiri vrste in količine veziva in vsebnosti celotne vode  $w_{tot}$  v mešanici, glede na lastnosti zemljine iz Luke Koper.

V poglavju 4.1 so podane osnovne lastnosti zemljine iz Luke Koper.

Pomembna faktorja za izbiro veziva sta njegova reaktivnost in učinkovanje, ki sta podrobno opisani v poglavju 3.1 in 3.2. V poglavju 3.3 so podana priporočila različnih avtorjev za izbiro veziva glede na lastnosti in klasifikacijo zemljine. Vpliv  $w_{tot}$  je opisan v poglavju 3.4.

Na podlagi ugotovitev je narejena analiza možnega stabiliziranja zemljine iz Luke Koper, lastnosti so opisane v poglavju 4.1, kot podlaga za pripravo programa laboratorijskega mešanja zemljine. V poglavju 4.2 je ocenjen potek reakcij in predvideno učinkovanje posameznih veziv, vključena je tudi razprava o izbiri količine veziva na podlagi priporočil v poglavju 3.3.

Potrebna je tudi izbira  $w_{tot}$ . Vpliv  $w_{tot}$  in izbira  $w_{tot,opt}$  sta analizirani v poglavju 4.3. Razprava o vplivu vsebnosti vode temelji na ugotovitvah v poglavju 3.4.

Za izvedbo laboratorijskih preiskav stabilizirane zemljine je bilo treba pripraviti proceduro priprave laboratorijskega vzorca. Pregledane so bile obstoječe metode priprave različnih avtorjev. Na podlagi poskusov priprave z upoštevanjem skupnih točk omenjenih procedur je bila sestavljena procedura priprave laboratorijskih vzorcev za simulacijo GM (poglavje 4.4).

V poglavju 4.5 je na podlagi ugotovitev v poglavjih 4.2.1, 4.2.2 in 4.2.3 pripravljen program laboratorijske priprave mešanic mulja iz Luke Koper.

### 4.1 Karakteristike osnovne zemljine iz Luke Koper

Največji vpliv na lastnosti stabilizirane zemljine in posledično na odločitev o vrsti in količini veziva imajo zagotovo prvotne lastnosti zemljine. Vpliv lastnosti zemljine na pridobivanje trdnosti je opisan v poglavjih 3.1, 3.2 in 3.3.

Zaradi uporabe lokalne zemljine kot konstrukcijskega dela izboljšanja zemljine z GM načrtovanje stabiliziranja kolov zemljine zahteva visoko kakovost preiskav na terenu in v laboratoriju. Na splošno lahko preiskave razdelimo na dve fazi (EuroSoilStab, 2002):

- predhodne preiskave, ki jih lahko opravimo s CPT-testom. V tej fazi morajo biti prepoznani tipi zemljine, plasti in meje plasti. Predhodni projekt je lahko izveden na osnovi teh podatkov za pridobitev ocene projekta ter za premislek o možnih tehničnih omejitvah za izvedbo projekta;
- v drugi fazi bo izveden končni projekt na osnovi detajlnih preiskav, ki so potrebne za kakovostno projektiranje stabiliziranih zemeljskih kolov in/ali masovno stabilizacijo.

V času izdelave diplomske naloge se v Luki Koper ni izvajalo raziskovalno vrtanje tal. Zemljina, uporabljena za preskuse, je bila zato odvzeta na deponiji zemljine, črpane iz morskega dna, t. i. "reful". Zemljina je bila odvzeta na globini do 1 m, na najbolj oddaljenem delu od nasipavanja materiala, zato lahko pričakujemo zemljino z visoko vsebnostjo finih delcev.

Ker je zemljina odvzeta na deponiji zemljine v Luki Koper in je taka zemljina prisotna tudi na območju pomola, za katerega so bile izvedene obsežne preiskave tal in kjer je predvidena možnost uporabe GM, so v nadaljevanju povzete referenčne lastnosti zemljine na pomolu I. Za to lokacijo bi namreč želeli preveriti možnost uporabe metod globinskega mešanja.

Izvedene so bile osnovne preiskave odvzete zemljine: vlažnost, lezne meje, ugotovitev zrnastostne porazdelitve s sejarno in arometrsko preiskavo, žaro izguba in stisljivost.

Pregled predhodnih preiskav in opis značilnih lastnosti zemljine na območju Luke Koper je povzet iz članka Geotehnika v Luki Koper na začetku 21. stoletja (Logar, 2009). Lastnosti zemljine na terenu pogojujejo izbiro tehnologije (glej poglavje 2) in so običajno upoštevane pri laboratorijskih preiskavah.

#### **4.1.1 Priporočene preiskave osnovne zemljine za namen globinske stabilizacije**

Laboratorijske preiskave lahko razdelimo na preiskave za klasifikacijo, za določitev mehanskih lastnosti, kemičnih lastnosti in okoljskih lastnosti (EU 14679, 2005).

#### 4.1.1.1 Priporočeni parametri za klasifikacijo osnovne zemljine

*Preglednica 19: Priporočeni parametri za klasifikacijo osnovne zemljine (EuroSoilStab, 2002)*

LASTNOST	KRATICE
Meja židkosti	$w_L$
Meja plastičnosti	$w_p$
Plastični indeks	$I_p$
Vsebnost organskih snovi	
Vlačnost zemljine	$w$
Prepustnost	$k$
Občutljivost	$S$
Zrnavostna porazdelitev	

#### 4.1.1.2 Mehanske lastnosti zemljine

Najpomembnejše mehanske lastnosti zemljine so nedrenirana strižna trdnost, stisljivost in propustnost.

Nedrenirano strižno trdnost lahko določimo z enoosnim tlačnim preizkusom, triosnim preizkusom ali s konusnim preizkusom po ETC 5 ali pa uporabimo rezultate terenskih meritev s krilno sondo, ploskim dilatometrom ali CPT preiskavo. V primeru zemljin z visoko vsebnostjo organskih snovi je priporočena ocena strižne trdnosti pri CPT preiskavi 5–10 odstotkov vrednosti  $q_c$ . Nedrenirana strižna trdnost omogoča oceno primernosti stabiliziranja zemljine glede na dosegljivo tehnologijo.

Deformacijske lastnosti stisljivost in propustnost ugotavljamo z edometrskim testom po ETC5. Priporočena je izvedba testa z obremenjevanjem, razbremenjevanjem ter ponovnim obremenjevanjem.

#### 4.1.1.3 Priporočeni parametri kemijskih lastnosti zemljin

Ugotovitve kemičnih lastnosti so priporočene, saj pomembno vplivajo na učinkovanje veziva (glej poglavje 3). Priporočeni parametri kemijskih lastnosti zemljine so: vsebnost sulfatov, vsebnost klorida, vsebnost karbonatov, humusne kisline/TOC, ionska izmenjalna kapaciteta po standardu ISO 13536 ali 11260 in pH podtalnice (EuroSoilStab, 2002).

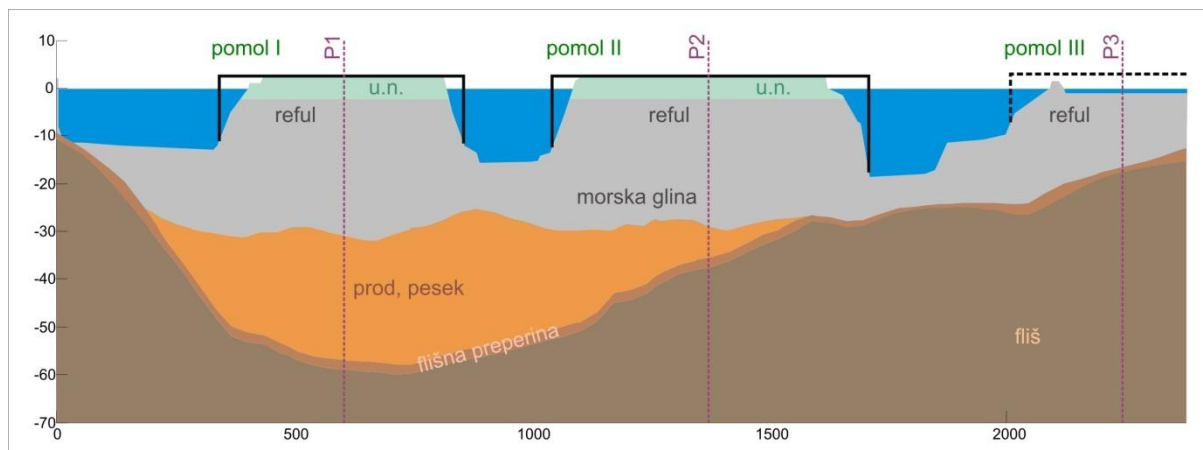
#### 4.1.1.4 Priporočeni parametri za določitev okoljskih lastnosti

Priporočeni parametri za določitev vpliva stabilizacije na okoljske lastnosti so: pH vrednost, ionska izmenjalna kapaciteta, vsebnost sulfatov, vsebnost karbonatov, vrsta in koncentracija kovin (EuroSoilStab, 2002).

#### 4.1.2 Pregled geotehničnih razmer v Luki Koper

Podatki so vzeti iz članka Geotehnika v Luki Koper na začetku 21. stoletja (Logar, 2009).

Prerez čez pomole podaja osnovne podatke in predstavo o sestavi tal (slika 34).



Slika 34: Sestava tal v prerezu pomolov; merilo višin je 10-krat merilo dolžin (Logar, 2009).

#### 4.1.2.1 Referenčne lastnosti na pomolu I Luke Koper

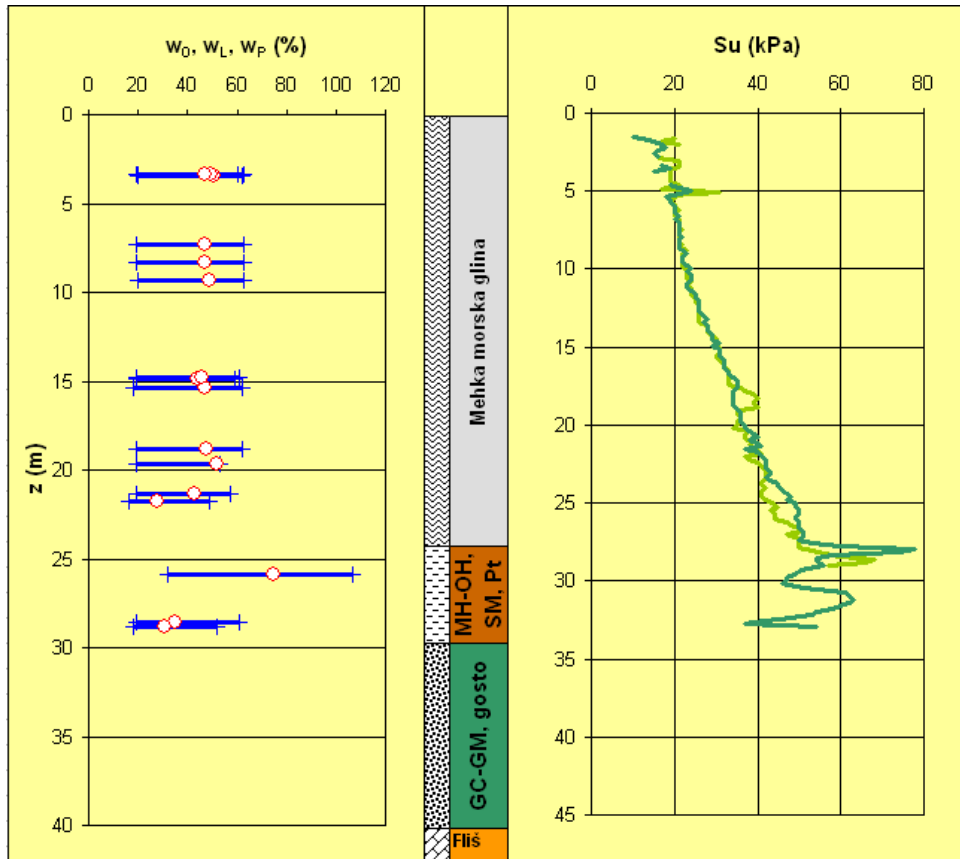
Predvideno območje stabiliziranja je sloj morske gline. Osnovne lastnosti sloja morske gline so povzete na preglednici 20.

Preglednica 20: Značilne mehanske lastnosti sloja morske gline (Logar, 2009)

LASTNOST	VREDNOST
Prostorninska teža ( $\gamma$ )	17,0–18,0 kN/m <sup>3</sup>
Meja židkosti ( $w_L$ )	61 %
Indeks plastičnosti ( $I_P$ )	42 %
Indeks konsistence ( $I_C$ )	0,1–0,6 %
Vlažnost ( $w$ )	45–50 %
$\lambda$	0,17
K	0,05
Strižni kot ( $\varphi'$ )	24–26 °
Prepustnost(k)	10 <sup>-10</sup> m/s

Iz navedenih lastnosti lahko določimo povprečno vlago, ki je 47,5-odstotna. Za vse poskuse je bila upoštevana 47-odstotna vlaga. Navedene lastnosti lahko služijo za primerjavo med zemljino, uporabljeno za laboratorijske poskuse, in zemljino na terenu.

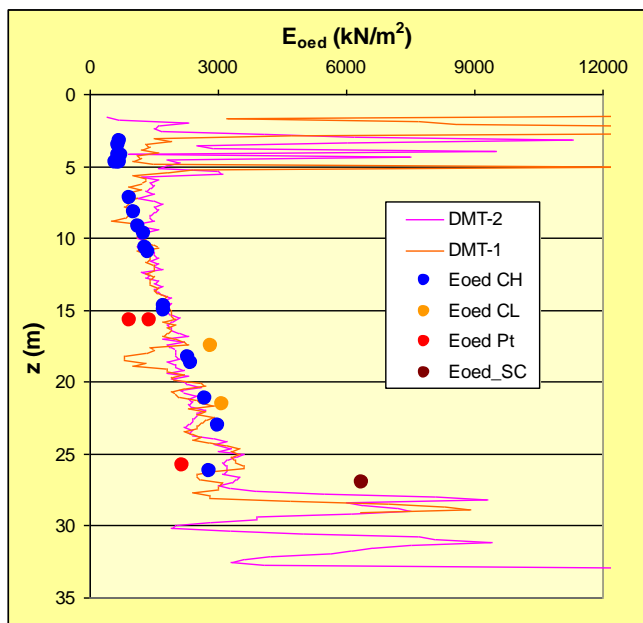
Kot pomemben faktor za izvedbo mešanja lahko navedemo tudi trdnost zemljine, saj je izvedba mehanskega mešanja veziva omejena glede na trdnost zemljine (glej poglavje 2).



Slika 35: Značilen profil tal v Luki Koper (JZ del pomola I.) s prikazom profila vlažnosti in leznih mej ter profilom nedrenirane strižne trdnosti. (Logar, 2009)

Togost zemljine, ki je podana na sliki 36, je pomembna za izračun posedkov in projektiranje izvedbe GM. Še posebej pomembno vlogo ima pri skandinavski metodi gradnje poltrdnih kolov, kjer je cilj doseči enakomerne posedke zemljine in kolov.





Slika 36: Primerjava edometriških modulov  $E_{oed}$ , dobljenih z dilatometrom in z laboratorijskimi preiskavami (JZ del pomola I) (Logar, 2009).

#### 4.1.3 Laboratorijske preiskave zemljine

##### 4.1.3.1 Odvzem in priprava zemljine za preskuse

Zemljina je bila odvzeta na globini enega metra iz odlagališča za sedimentirano zemljino (»reful«), ki je bila predhodno izkopana iz morskega dna. Transportirana je bila v plastičnih vrečah. Hranjena je bila v laboratorijskih pogojih ( $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ ) v plastičnih vrečah. Vlažnost odvzete zemljine je bila 82,68-odstotna (merjeno s sušenjem v ventilacijski peči na  $40\text{ °C}$ ).

Za namene izvedbe nekaterih preiskav je bila zemljina posušena v ventilacijski peči pri  $40\text{ °C}$  (predvidena visoka vsebnost organskih snovi), po potrebi pa je bila zdrobljena in presejana skozi 2 mm sito. Nato smo zemljino navlažili na povprečno vlago zemljine na območju predvidene stabilizacije ( $w = 47\%$ ), glej referenčne lastnosti zemljine (slika 20). Zemljino smo pred uporabo v testih hranili z naravno vlago v plastičnih vrečah pri relativni vlažnosti 95 odstotkov in temperaturi  $20 \pm 3\text{ °C}$  vsaj 14 dni.

##### 4.1.3.2 Lastnosti preiskovane zemljine

Opisane so lastnosti zemljine, ki je bila uporabljena za namen laboratorijskega mešanja zemljine. Lastnosti, razen rezultatov edometriške preiskave in grafikona s prikazom zrnastostne sestave, so povzete v preglednici 21.

Za načrtovanje programa laboratorijskih preiskav (izbira vrste in količine veziva) je bistveno poznavanje zemljine, zato je v preglednici 21 pripravljen pregled lastnosti zemljine.

Preglednica 21: Pregled lastnosti zemljine iz Luke Koper

LASTNOST	OZNAKA Z ENOTO	KARAKTERISTIČNA VREDNOST	STANDARD
Meja židkosti	$w_L$ (%)	63,6	ISO/TS 17892-12:2004
Meja plastičnosti	$w_p$ (%)	36,8	
Indeks plastičnosti	$I_p$	26,8	
Vlaga	$w$ (%)	47,5	ISO/TS 17892-1:2004
Zrnavostna porazdelitev			ISO/TS 17892-4:2004
Glina	(%)	37,0	
Melj	(%)	61,20	
Pesek	(%)	1,80	
Totalna specifična teža	$\gamma_{tot}$ (kN/m <sup>3</sup> )	17,04	ISO/TS 17892-7:2004
Suha specifična teža	$\gamma_{dry}$ (kN/m <sup>3</sup> )	11,70	
Specifična teža zrn	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	26,54	ISO/TS 17892-3:2004
Žaro izguba		16,01 % na 950 °C	ISO/TS 196-2
		14,88 % na 750 °C	
pH		7,2	ISO/TS 4316

Glede na mejo židkosti in plastičnosti zemljino uvrščamo med organske melje MH-OH, z upoštevanjem zrnavostne sestave zemljine in vrednosti žaro izgube pa jo uvrščamo med mulje.

Zrnavostna sestava je podana na sliki 37. Delež vsebovanih delcev pod 0,063 mm je 98,2 odstotka in 85,7 odstotka pod 0,02 mm. Zrnavostna sestava je pomembna za izbiro vrste in količine veziva, saj določena veziva večinoma reagirajo le z določenimi frakcijami zemljine.

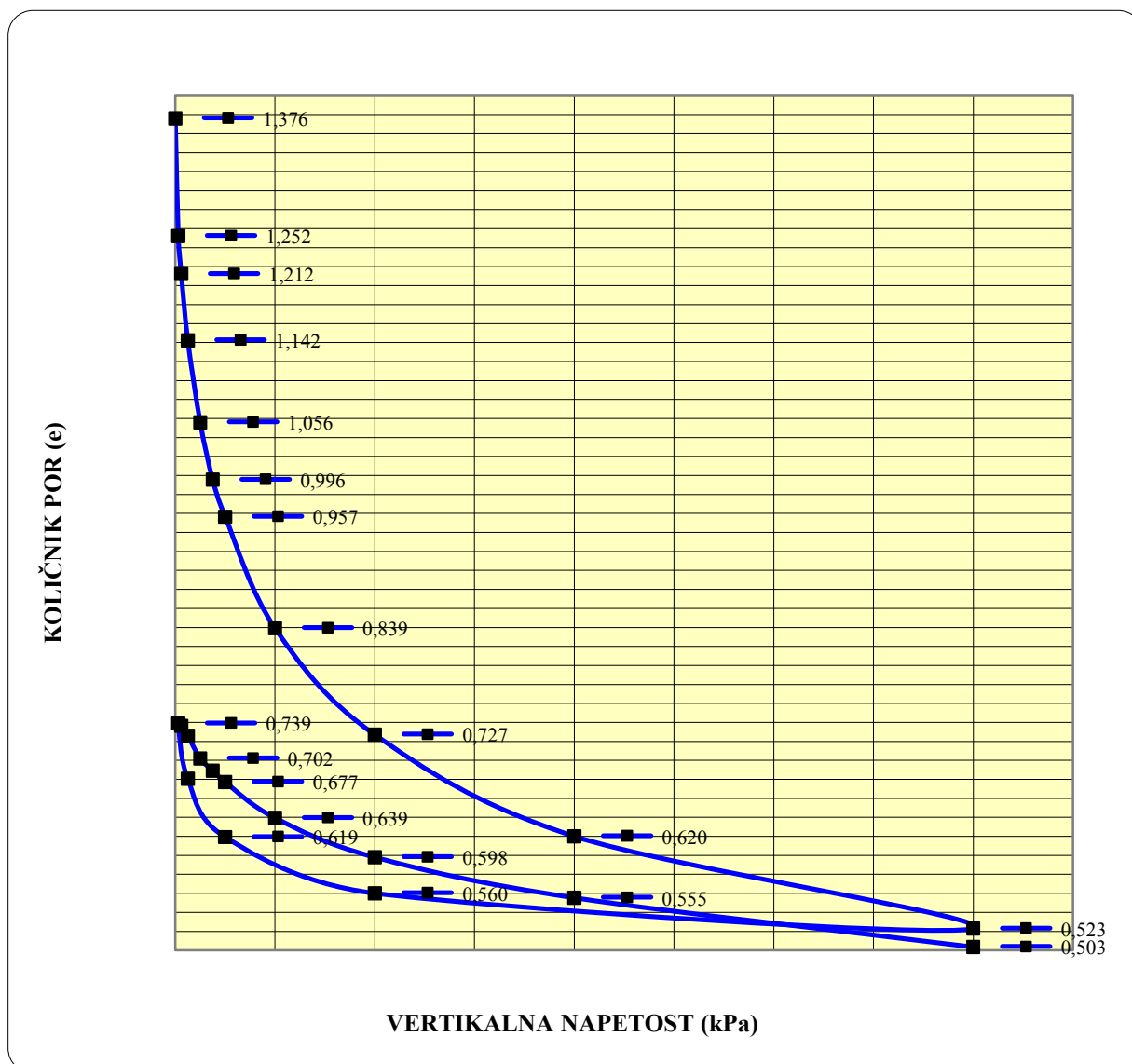
pH vrednost je 7,2, kar imamo lahko za nevtralno vrednost. Vrednost pH je pomemben parameter za ocenitev primernosti stabiliziranja s cementom.

Edometriški poskus je bil izveden po priporočilih EuroSoilStab 2002, in sicer z obremenjevanjem, razbremenjevanjem in ponovnim obremenjevanjem. Rezultati edometriškega poskusa (ISO/TS 17892-5:2004) so podani v preglednicah 22 in 23 ter na grafikonih 1 in 2.

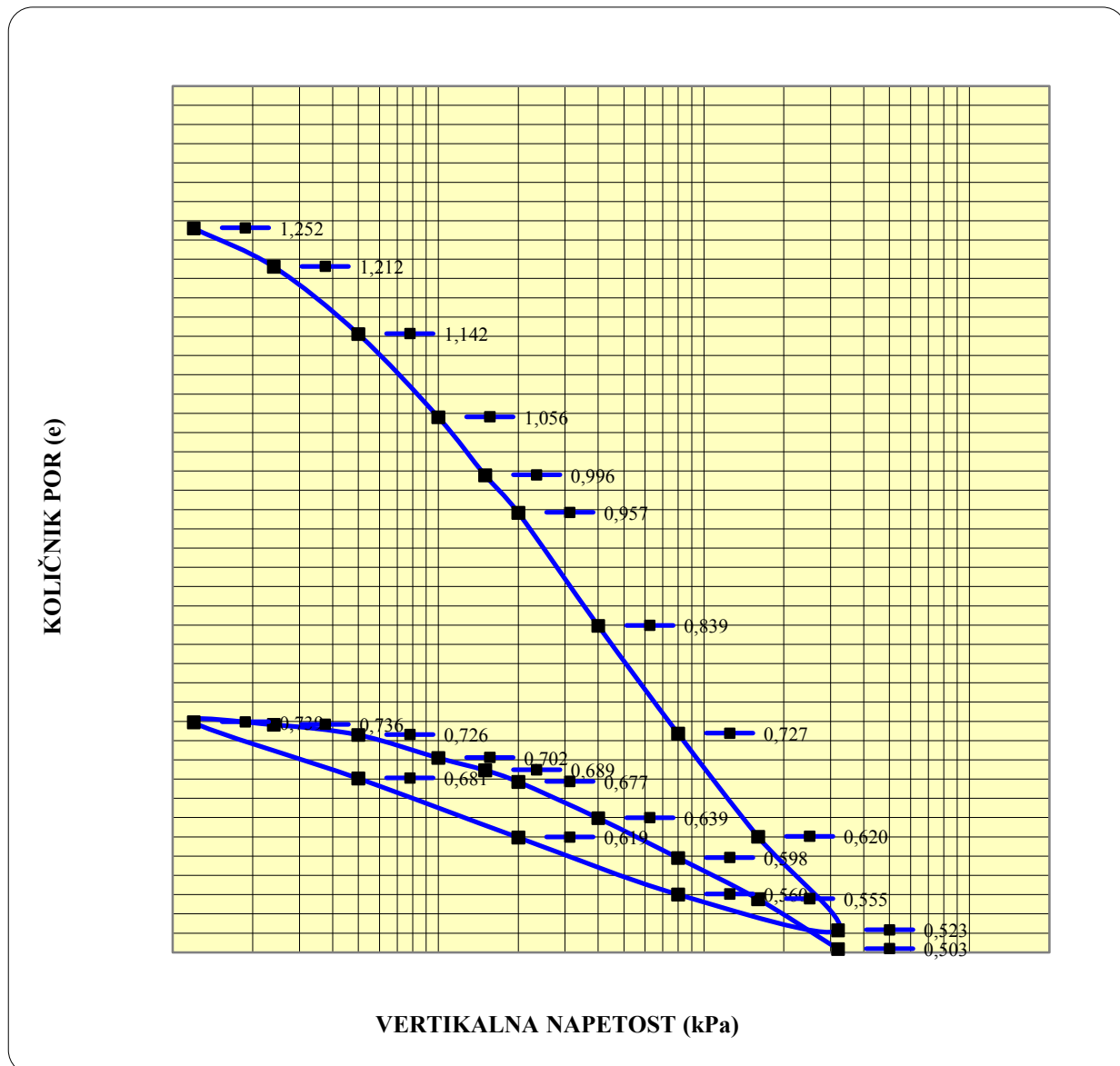


Preglednica 22: Osnovni podatki edometriškega preskusa s postopnim obremenjevanjem zemljine iz Luke Koper

<b>Zemljina:</b>	mulj iz Luke Koper
<b>Klasifikacija:</b>	MH-OH
<b>LASTNOST</b>	<b>KRATICA IN VREDNOST</b>
Začetna višina vzorca	$H_0 = 19,14 \text{ mm}$
Premer vzorca	$D = 75,0 \text{ mm}$
Temperatura	$T = 21-23 \text{ }^\circ\text{C}$
Vlaga vzorca pred preiskavo	$w = 52,6 \text{ } \%$
Vlaga vzorca po preiskavi	$w = 23,3 \text{ } \%$
Začetna prostorninska masa vlažnega vzorca	$\rho = 1,704 \text{ Mg/m}^3$
Začetna prostorninska masa suhega vzorca	$\rho_d = 1,117 \text{ Mg/m}^3$



Grafikon 1: Rezultati edometriške preiskave zemljine iz Luke Koper, podane v logaritemskem merilu vertikalne napetosti, glede na količnik por.



Grafikon 2: Rezultati edometriške preiskave zemljine iz Luke Koper

Preglednica 23: Osnovni podatki edometriškega preskusa s postopnim obremenjevanjem zemljine iz Luke Koper

Št.	Obremenitev (kPa)		Posedek		Količnik por (-)	$E_{oed}$ ( $M_v$ ) (kPa)	$m_v$ ( $MPa^{-1}$ )
			(rel.) (mm)	(abs.)			
			0		1,376		
1	0	- 6	0,998	0,998	1,252	115	8,691
2	6	- 12	0,322	1,320	1,212	338	2,957
3	12	- 25	0,563	1,883	1,142	412	2,429
4	25	- 50	0,696	2,579	1,056	619	1,614
5	50	- 75	0,486	3,065	0,996	852	1,174
6	75	- 100	0,314	3,379	0,957	1281	0,781
7	100	- 200	0,945	4,324	0,839	1667	0,600
8	200	- 400	0,903	5,227	0,727	3282	0,305
9	400	- 800	0,862	6,090	0,620	6453	0,155
10	800	- 1600	0,783	6,872	0,523	13339	0,075
11	1600	- 400	-0,300	6,573	0,560	49132	0,020
12	400	- 100	-0,477	6,096	0,619	7904	0,127
13	100	- 25	-0,494	5,602	0,681	1980	0,505
14	25	- 6	-0,470	5,132	0,739	548	1,826
15	6	- 12	0,020	5,152	0,736	4152	0,241
16	12	- 25	0,085	5,237	0,726	2139	0,468
17	25	- 50	0,192	5,430	0,702	1807	0,553
18	50	- 75	0,103	5,533	0,689	3320	0,301
19	75	- 100	0,097	5,630	0,677	3501	0,286
20	100	- 200	0,304	5,934	0,639	4449	0,225
21	200	- 400	0,333	6,267	0,598	7926	0,126
22	400	- 800	0,344	6,611	0,555	14961	0,067
23	800	- 1600	0,418	7,029	0,503	23987	0,042

#### 4.2 Izbira veziva in pričakovane reakcije ter učinkovanje različnih veziv z zemljino iz Luke Koper

Za načrtovanje laboratorijskih preiskav je potrebna izbira vrste in količine veziva za stabiliziranje zemljine iz Luke Koper.

Izbira vrste veziva temelji na predvidenem poteku reakcij v zemljini iz Luke Koper in priporočilih za izbiro veziva, glede na vrste zemljine, opisanih v 4.3.

Izbiro veziva pogojujejo predvsem fizikalno-kemijske lastnosti zemljine, saj določene reakcije ne potečejo v vsakem tipu zemljine, kot je prikazano v poglavju 3.2. Na primer v mulju in šoti dodatek apna ne bo imel nobenega ali pa zelo majhen učinek, saj pucolansko reakcijo zavirajo organske kisline v zemljini in pomanjkanje pucolanov. Apno je lahko učinkovito v muljih in glinah, ki ne vsebujejo organskih kislin, vsebujejo pa pucolane.

Na splošno se potrebna vsebnost veziva za doseg enake stopnje trdnosti večja z večanjem vsebnosti glinenih delcev v zemljini (Bell, 1993). To je verjetno posledica povečanja aktivne površine zrn in boljšega stika med delci zemljine. Količina veziva tudi bistveno vpliva na lastnosti stabilizirane zemljine.

Izkazalo se je, da se glinice in melji učinkovito stabilizirajo z mešanico apna in cementa, kjer je običajno dosežena visoka trdnost pri izvedbi kolov, dobra je interaktivnost kolov z okoljsko

zemljino. Priporoča se večanje vsebnosti cementa v mešanici apno-cement z večanjem vsebnosti organskih snovi in manjšanjem vsebnosti pucolanov (Janz, 2002). Da bi dosegli visoko trdnost v kratkem času, je optimalna mešanica apno-cement v razponu razmerij od 40/60 do 10/90 (Ahnberg, 1995).

Značilno je, da pri reakcijah, ki producirajo trdnost z latentno hidravličnimi ali še posebej s pucolanskimi dodatki, reagira  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Zaradi porabljanja  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  se tvori manj reakcijskih produktov med  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  in okoliško zemljino, kar ima za posledico manjše število celokupnih reakcijskih produktov. Ti dodatki so učinkoviti pri stabiliziranju muljev in šot, ki vsebujejo organske kisline in manj glinenih delcev. S pucolanskimi dodatki sprožimo pucolansko reakcijo ali pa povečamo količino produktov te reakcije, kar vpliva na dolgoročno zvišanje trdnosti. Podrobnejše učinkovanje pucolanskih dodatkov je opisano v poglavju 3.2.5.

Mulji in šote vsebujejo velike količine organskih snovi in malo pucolanov, zato je stabilizacija otežena in pridobivanje trdnosti običajno počasnejše. Po preizkušanju številnih veziv sta se kot najuspešnejša izkazala cement in mešanica cementa in granulirane plavžne žindre (Axelsson, 2000). Za mulj Axelsson priporoča 100–200  $\text{kg/m}^3$  veziva, za šoto 250  $\text{kg/m}^3$ .

Pred končno izbiro je treba izvesti predhodne tehnične preiskave veziva, saj lahko njihova kemijska sestava močno variira z uporabo osnovnih surovin in industrijskih procesov. Uporabo veziva je treba oceniti tako s tehničnega kot tudi z okoljskega vidika.

Pri izbiri je treba upoštevati učinkovanje veziv v mešani zemljini in delovanje mešanih kolov v zemljini, kar je opisano v poglavju 3.3.1. Tam so vključena tudi priporočila za izbiro količine veziva, predviden časovni potek in ocene končnih trdnosti mešanic zemljine z uporabo različnih veziv.

Končna izbira veziva mora biti potrjena z laboratorijskimi preiskavami.

#### **4.2.1 Vplivi lastnosti zemljine na pridobivanje trdnosti**

Za potrebe predvidenega učinkovanja veziv v zemljini je najprej potrebna analiza lastnosti zemljine. Osredotočil sem se na predvideno uporabo cementa in učinkovanje dodatkov v cementu. Iz razprave je izključena uporaba apna z izjemo apno-cementa, saj je apno samo neučinkovito za stabiliziranje organskih zemljin, kot je opisano v poglavju 3.

##### **4.2.1.1 pH**

pH vrednost je nevtralna, zato lahko predvidevamo, da ne bo imela vpliva na stabiliziranje.

##### **4.2.1.2 Organske snovi**

Prisotnost organskih snovi pomembno vpliva na pridobivanje trdnosti, kot je razvidno iz poglavja 3.1 in 3.2.

Iz vrednosti žaro izgube (16,01 odstotka) ugotovimo, da je vsebnost organskih snovi v zemljini relativno visoka.

#### 4.2.1.3 Zrnavostna porazdelitev

Pri stabiliziranju organskih zemljin je treba za izboljšanje dodati večje količine veziva.

Vsebnost veziva se na splošno za dosego enake trdnosti povečuje z večanjem vsebnosti glinenih delcev (Bell, 1993).

Večja vsebnost drobnih delcev v zemljini zahteva za učinkovito stabiliziranje večjo količino cementa, pridobivanje trdnosti je počasnejše, oviran je prodor cementa v zemljino, znižuje se propustnost stabilizirane zemljine.

#### 4.2.2 Učinkovanje veziva glede na vrsto zemljine

Z upoštevanjem priporočil za izbiro veziva, glede na vrsto zemljine, v poglavju 4.3 lahko ovrednotimo priporočila za izbiro veziva za zemljino iz Luke Koper.

Pričakovana učinkovanja različnih vrst veziv, glede na različne vrste zemljine, so podana v poglavju 3.3.5. Iz slik 24, 27 in preglednic 12, 13, 14 je razvidno, da je za našo vrsto zemljine predvideno najboljše učinkovanje cementa in cementa z dodatki. Predvideno učinkovanje apno-cementa je slabše od učinkovanja cementa, toda predvidoma dobro. Uporaba apna je predvidoma neučinkovita.

Predvideno časovno priraščanje trdnosti veziv je opisano v poglavju 3.3.

##### 4.2.2.1 Apno

Apno ni učinkovito za stabilizacijo organskih zemljin in zemljin z visoko vsebnostjo zrn peska. Večja vsebnost organskih delcev v zemljini zmanjša učinkovanje apna. Humusne kisline reagirajo s  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  in tvorijo netopne produkte, ki zgostijo delce in s tem zavirajo pridobivanje trdnosti s pucolansko reakcijo. Glej poglavje 3.

##### 4.2.2.2 Cement

V organskih zemljinah je predvidoma najbolj učinkovit cement ali cement z dodatki, tudi na podlagi reagiranja veziv z zemljino, glej poglavje 3. Stabilizacija s cementom je razmeroma učinkovita v zemljinah z vsebnostjo organskih snovi do 30 odstotkov.

Pri cementni stabilizaciji se običajno poveča trdnost in zniža propustnost mešane zemljine. Interakcija mešanih kolov in okoljske zemljine je slabša kot pri mešanju z apnom, glej poglavje 3.3.3.1.

#### 4.2.3 Cement z dodatki

Pri stabilizaciji zemljine iz Luke Koper s cementom lahko pričakujemo naslednji potek reakcij:

- **Hidratacija (dnevi)**

Po stiku cementa s prosto vodo najprej poteče hidratacija, tvori se CSH-gel in  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Tvorjen CSH-gel poveže delce zemljine med seboj. Proizveden  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  iz hidratacije pa sodeluje v nadaljnjih reakcijah.



Ker je zemljina organska, se pri dodajanju veziva zemljini nekaj tvorjenih kalcijevih ionov porabi za ionsko izmenjavo z organskimi snovmi in za tvorbo soli, ki so netopni produkti.

- **Pucolanska reakcija (meseci)**

Pri hidrataciji proizveden  $\text{Ca(OH)}_2$  reagira s pucolani in vodo. Tvorita se CSH- ali CASH-gel, odvisno od prisotnih dosegljivih mineralov v zemljini.

Potencial pridobivanja trdnosti zaradi pucolanske reakcije je majhen, saj je količina kalcijevih ionov zaradi prisotnosti organskih snovi zmanjšana in s tem tudi količina produktov pucolanske reakcije, glej poglavja 3.1 in 3.2.

Posledično so pri stabilizaciji organskih zemljin zaželeni dodatki cementu, kot sta elektrofiltrski pepel (pucolanski material) in granulirana plavžna žindra (latentno hidravlični material), saj organske snovi običajno ne vsebujejo dovolj pucolanov, da bi se porabil ves  $\text{Ca(OH)}_2$ , ki se proizvaja pri hidrataciji.

#### 4.2.3.1 Dodatki

- **Elektrofiltrski pepel (meseci)**

Elektrofiltrski pepel, ki spada med pucolanske materiale, sam ni zelo reaktiven. Za pucolansko reakcijo potrebuje zunanji vir  $\text{Ca(OH)}_2$ , ki se porablja pri nadaljnji reakciji kot posledica predvidenega odvečnega  $\text{Ca(OH)}_2$ , saj se zaradi prisotnosti organskih snovi pri stabilizaciji s cementom ne porabi ves  $\text{Ca(OH)}_2$ , proizveden med hidratacijo cementa.

Kot dodatek cementu zviša kemično stabilnost in količino proizvedene toplote pri hidrataciji. Zvišanje toplote pospeši reakcije.

Predvideno je zmanjšanje propustnosti stabilizirane zemljine v primerjavi s stabilizacijo s cementom. Običajno njegova uporaba zniža ceno veziva (EuroSoilStab, 2002).

- **Granulirana plavžna žindra (tedni)**

Je latentno hidravlični material, ki za sprožitev hidratacije potrebuje zunanjo prisotnost  $\text{Ca(OH)}_2$ . Kemična sestava je podobna cementu, njena sestava in reaktivnost pa se razlikujeta med posameznimi plavži.

#### 4.2.3.2 Apno-cement

Po nekaterih priporočilih sodeč, je učinkovito tudi stabiliziranje z apno-cementom z manjšo vsebnostjo apna. Hidratacija cementa daje hitro pridobljeno trdnost, medtem ko apno proizvaja toploto, ki pospešuje pucolansko reakcijo. Hidratacija apna proizvede velike količine  $\text{Ca(OH)}_2$ , ki je potreben za aktivacijo pucolanske reakcije in ionsko izmenjavo v glini. Učinek na stabilnost je pozitiven.

Običajno uporabljeni masni razmerji apno-cementnega veziva sta 50/50 in 25/75, pri večanju vsebnosti organskih snovi pa je potrebno večanje vsebnosti cementa. Izbrano in v nadaljevanju uporabljeno je bilo masno razmerje apno-cementa 25/75.

Z uporabo apno-cementne stabilizacije, glede na stabilizacijo s cementom, omilimo učinek nepovezanosti mešanega kola in zemljine.

#### 4.2.4 Priporočene količine veziv

Broms (2004) za stabiliziranje z apno-cementom priporoča mešanje z dodatkom 10–20 odstotkov veziva, glede na suho maso zemljine (preglednica 24).

*Preglednica 24: Priporočene količine stabiliziranje s cementom, glede na vrsto zemljine.*

VRSTA ZEMLJINE	VSEBNOST VEZIVA	AVTOR	VEZIVO	PRIČAKOVANA TRDNOST PO 28 DNEH HRANJENJA (kPa)
glinasti melji	4–13 %	Ahnberg (2006)	CEM I 42,5; CEM II 42,5	
glina	6–16 %	Ahnberg (2006)		
mulj	100–200 kg/m <sup>3</sup>	Axelsson (2000)	cement z dodatkom granulirane plavžne žilindre	
mulj	250–400 kg/m <sup>3</sup>	Topolnicki (2004)	cement	100–400
organski melji, gline	200–350 kg/m <sup>3</sup>	Topolnicki (2004)	cement	300–1200
mehke zemljine	150–300 kg/m <sup>3</sup>	Topolnicki (2004)	cement	700–2500
japonske zemljine	20–30 %	Okumura (1999)	cement	
Bangkok clay	10–20 %	Udin (1997)	cement	

#### 4.3 Vsebnost vode

Splošno velja, da večji  $w_{tot}/c$  pomeni manjšo doseženo trdnost.

Splošno velja, da večje vodocementno razmerje  $w_{tot}/c$  pomeni manjšo doseženo trdnost.

Vsebnost pogojuje izbira SM ali MM. Pri SM nimamo vpliva na vlažnost, temveč vlažnost zemljine interpretiramo kot vsebnost celotne vode mešanice, medtem ko pri mokrem mešanju lahko vplivamo na celotno vsebnost vode v mešanici in jo z upoštevanjem tehnoloških omejitev tudi prilagajamo.

V zemljini na terenu je mogoča izvedba obeh metod. SM je zaradi visoke plastičnosti zemljine in vsebnosti vode pod mejo židkosti težje izvedljivo. S SM na splošno dosegamo večje trdnosti, oprema je manj pokvarljiva, dosegamo pa manjšo enakomernost in homogenost, kar pomeni večje variacije vrednosti. Ta pojav lahko zmanjšamo z boljšim mešanjem, in sicer z večjo hitrostjo rotacije in počasnejšim dviganjem ter spuščanjem. Z MM dosegamo nižje trdnosti, dosegamo pa večjo enakomernost in homogenost.

V organskih zemljinah, stabiliziranih s cementom, splošno velja, da trdnost pada linearno z naraščanjem masnega razmerja celotna voda/cement, poglavje 3.4. Ansano (1996) je podal naslednjo korelacijo trdnosti glede na razmerje  $w_{tot}/c$  (poglavje 4.4):

$$\tau_{28} = \frac{\tau_{28,design}}{\frac{w_{tot}}{c}}$$

V novejših raziskavah je raziskovan in potrjen obstoj  $w_{tot,opt}$ , katerega vrednost je blizu vrednosti meje židkosti zemljine. Treba se je zavedati, da so laboratorijske raziskave vključevale zemljine z vlažnostjo, višjo od meje židkosti. Korelacija velja za cementno stabilizacijo organskih zemljin.

#### 4.3.1 Povzetek ugotovitev iz literature, navedenih v poglavju 3.4.1

Raziskovanje in obstoj  $w_{tot,opt}$  se nanaša na mešanje cementa z glinami.

Vrednost  $w_{tot,opt}$  se giblje okrog meje židkosti zemljine.

Vrednost  $w_{tot,opt}$  lahko ugotovimo in potrdimo s preiskavami vzorcev z edometriskim in enoosnim tlačnim poskusom.

*Preglednica 25: Pregled priporočenih vrednosti  $w_{tot,opt}$*

AVTOR	KORELACIJA
Lorenz (2006)	$w_{tot,opt} = 1,02 * w_L$
Horpibulsk (1999)	$w_{tot,opt} = (0,88 \div 1,08) * w_L$
LCM (2011)	$w_{tot,opt} = 0,97 * w_L$

Na podlagi zbranih podatkov iz preglednice 25 lahko torej trdimo, da je v glini, mešani s cementom, optimalen  $w_{tot,opt}$  približno  $1,0 * w_L$ , zgornja meja  $w_{tot,opt}$  pa je  $1,1 * w_L$ .

#### 4.3.2 Optimalna vlažnost mešanice cementa in zemljine iz Luke Koper

Iz ugotovljenega lahko načrtujemo vsebnost celotne vode v zemljini, ki ima povprečno referenčno vlažnost 47 odstotkov in mejo židkosti pri 64 odstotkih. Za doseg optimalne vlažnosti mešanice je treba z mešanjem v zemljino vnesti 17 odstotkov dodatne vode. Dodatno vodo lahko vnesemo v zemljino med stabiliziranjem s cementno pasto ali z vnašanjem vode med vtiskanjem mešalk v zemljino in z vtiskanjem cementne paste med dviganjem mešalk.

Pri simulaciji SM ni mogoče vplivati na vsebnost vode.

#### 4.4 Procedura priprave laboratorijskega vzorca za simulacijo metode globinskega mešanja zemljine iz Luke Koper

Po ugotovljenih karakteristikah zemljine, izbiri veziva in izbiri vsebnosti skupne vode je bilo za izvedbo programa laboratorijskih preiskav pripravljene stabilizirane zemljine treba pripraviti še proceduro za pripravo preizkušancev.

V nadaljevanju so povzete različne metode za pripravo preizkušancev, protokol laboratorijske priprave vzorca, hranjenja in preskušanja za pridobitev optimalne mešanice in osnovnih inženirskih lastnosti stabilizirane zemljine. Izbira metode stabiliziranja temelji na lastnostih osnovne zemljine, katera je zelo plastična in drobno zrnata. Pokazala se je tudi nujnost standardizacije laboratorijske priprave vzorcev za metodo stabiliziranja zemljine in s tem doseganja standardnih korelacij med vrednostmi laboratorijsko pripravljenih vzorcev in vrednostmi na terenu kakor tudi primerljivost rezultatov med laboratoriji.

##### 4.4.1 Pregled procedur laboratorijske priprave vzorca

Kot posledica vse širše uporabe GM so se pojavile tudi različne metode laboratorijske priprave vzorcev. Podatki, podani v preglednicah 26 in 27, povzemajo trenutno dosegljive osnovne podatke o pripravi.

Pomanjkljivosti predlaganih in opisanih uporabljenih procedur so predvsem v pomanjkljivih informacijah o detajlih laboratorijske priprave.

*Preglednica 26: Povzetek laboratorijskih priprav vzorca za simulacijo metode globinskega mešanja z opisom kalupov, tipov mešalnikov in pogojev hranjenja*

<b>AVTOR</b>	<b>Kalup</b>	<b>Tip mešalnika</b>	<b>Pogoji hranjenja</b>
Japanese Geotechnical Society; JGS 0821-2000, Section 7.2	50/100 mm	Laboratorijski mešalnik s kapaciteto 5000 do 30.000 cm <sup>3</sup> posode s hitrostjo 120 do 300 obratov na minuto	Zapečateni, 17–23 °C
EuroSoilStab CT97-0351	Plastični valji 50/100 mm, površina na notranji strani naoljena ali povoskana za lažje razkalupljanje	Laboratorijski mešalnik ali kuhinjski mešalnik z zadostno kapaciteto obratov na minuto	Zapečateni, 18–22 °C
Al-Tabba (1999) in Shen (2003)	Premier mešanih kolov zemljine 50, 100 ali 150 mm	Običajna laboratorijska mešalna oprema s kontrolirano hitrostjo in številom obratov mešalk na minuto	Pri sobnih razmerah, 17–23 °C
Jacobson (2003), Virginia Tech in VDOT, ZDA	50/100 mm	Kitchen Aid®. Zunanja hitrost mešalk 155 obratov na minuto in notranjih mešalk 68 obratov na minuto	V 100% vlagi, 17–23 °C
Bhadriraju, Puppala, Madhyannapu (2007)	70/140 mm	Kitchen Aid® z desetimi hitrostmi in s kapaciteto posode 4700 cm <sup>3</sup>	Zapečateni, 17–23 °C

Preglednica 27: Povzetek laboratorijskih priprav vzorca za simulacijo metode globinskega mešanja s povzetkom procedure in korelacijami z vrednostmi na terenu

AVTOR	Povzetek procedure	Korelacija laboratorij : teren
Japanese Geotechnical Society; JGS 0821-2000, Section 7.2	Mešalni čas je 10 min z mogočim ročnim mešanjem in zgoščevanjem v 3 slojih s 5mm jekleno ročko za minimaliziranje prisotnosti zračnih mehurčkov.	Cement Deep Mixing Association of Japan (1994): $q_{u(teren)} = (0,2-0,5) * q_{u(lab)}$ ; Dry Jet Deep Mixing Association of Japan (1993): $q_{u(teren)} = (0,25-0,33) * q_{u(lab)}$
EuroSoilStab, 2002 CT97-0351	Mešalni čas je 5 min in je različen za različne tipe zemljine. Za zgoščevanje se uporablja jeklen bat debeline 10 mm in premera 45 mm, pritrjen na 50 mm dolgo jekleno ročko. Statična obtežba se izvaja na sloju do 25 mm s 100 kPa večkrat za 2s.	$q_{u(teren)} = (0,2-0,5) * q_{u(lab)}$ ; $q_u(\text{stabilizirane zemljine}) = 10-50 * q_u(\text{zemljine})$
Al-Tabba (1999) in Shen (2003)	Izvedba je odvisna od tipa zemljine. Kontrolira se lahko tudi pritisk vtiskanja veziva v zemljino od nekaj pa do nekaj sto kPa. Konsolidacijski pritisk se lahko simulira skozi zračni pritisk.	
Jacobson (2003), Virginia Tech and VDOT, USA	Mešalni čas je omejen na 5 min z uporabo možnega ročnega mešanja in vgradnje v kalupe s 25 mm debelimi utežmi v kalupu, in sicer z vgradnjo po 5 mm in 25 udarci s 100 kPa za 5 do 10 s z 48 mm aluminijastim nastavkom.	
Bhadriraju, Puppala; Madhyannapu, 2006	Mešalni čas od 5 do 7 min. Za zgoščanje se uporablja enak postopek kot pri Jacobsonu.	$q_{u(teren)} = (0,67-0,86) * q_{u(lab)}$

Navedena priporočila se navezujejo stabiliziranje drobno zrnatih zemljin, po večini glin in organskih glin.

Obstajajo seveda še druge metode priprave, ki se bistveno razlikujejo od omenjenih. V prejšnjem desetletju je bilo razvitih mnogo veliko bolj sofisticiranih metod, ki bolj realno ponazarjajo mešanje na terenu, a kolikor vem, niso dosegle širše uporabe. EuroSoilStab (2002) navaja, da se rezultati ne razlikujejo bistveno od preprostejših metod, ki so verjetno zaradi svoje enostavnosti in ekonomičnosti v širši uporabi. Manjšo uporabo bolj sofisticiranih metod lahko pripišemo tudi uporabi zelo različnih tehnologij mešanja, kot je opisano v poglavju 2, pri sofisticiranih metodah pa je nabor mešalk omejen in se zato mešanje lahko od dejanskega mešanja z izbrano tehnologijo bistveno razlikuje.

#### 4.4.1.1 Ugotovitve in povzetek priporočil

Pri pregledu metod laboratorijske priprave vzorca lahko ugotovimo, da se metode med seboj bistveno razlikujejo. Pri mnogih je procedura v ključnih korakih nepopolna. Zelo malo je tudi podatkov o hranjenju vzorca in korelaciji laboratorijskih in vrednosti na terenu v korelaciji s proceduro priprave, če pa so navedeni, niso zadostni za uporabno oceno. Povzamemo lahko korake metode, ki so podobne in imajo velik vpliv na končno dosego trdnosti vzorca:

- v vzorcu je treba minimalizirati prisotnost zračnih mehurčkov,
- cilj mešanja je homogena mešanica veziva vode in zemljine,
- čas mešanja mora biti omejen in konstanten pri pripravi mešanic iste zemljine,
- omejen je čas od začetka priprave vzorca do hranjenja,
- večinoma se uporablja dimenzija vzorca 50/100 mm.

#### 4.4.2 Postopek načrtovanja priprave preizkušancev

Laboratorijsko pripravljene vzorce so večinoma bolj homogeni in bolje premešani kot stabilizirana zemljina na terenu. V dosedanjih procedurah so navedeni različni časi mešanja, večinoma pa so od 4 do 10 min. Čas mešanja, ki je primerljiv z mešanjem na terenu, pa je pod 1 min. Tudi razlike med samimi laboratorijskimi pripravami so velike, kar se odraža na rezultatih tlačnih trdnosti: 22-odstotno odstopanje rezultatov v posameznih laboratorijih in kar 53-odstotno odstopanje med laboratoriji. To odraža nestandiziranost procedure za pripravo, ki je, kot vidimo, nujno potrebna za dosego splošne korelacije med laboratorijskimi in terenskimi vrednostmi (vrednosti, uporabljena metoda, uporabljena tehnologija, količina in vrsta veziva).

##### 4.4.2.1 Podroben postopek načrtovane priprave preizkušancev

Po pregledu literature sem pripravil naslednji postopek priprave preizkušancev.

- Zemljino posušimo na 40 °C v ventilacijski peči,
- zemljino zdrobimo in presejemo skozi sito z odprtini 2 mm,
- pripravimo potrebno količino zemljine in vode,
- zemljino in vodo temeljito premešamo in shranimo v zapečatenih pogojih vsaj za 48 ur,
- pred mešanjem z vezivom vzamemo vzorce za ugotovitev vlažnosti,
- pripravimo vezivo. V primeru uporabe večkomponentnih veziv vezivo temeljito zmešamo. Odtehtamo potrebno količino veziva. V primeru ponazoritve metode mokrega mešanja v zemljo vmešamo vezivo in vodo v obliki homogene paste,
- v posodo vstavimo potrebno količino vlažne zemljine,

- v posodo vstavimo potrebno količino veziva in kontrolirano mešamo zemljino (cementni mešalci, kuhinjski mešalci). Čas mešanja je omejen na 5 minut. Zemljino in vezivo mešamo ročno. Cilj je ustvariti homogeno mešanico zemljine,
- mešanico vgradimo v kalupe,
- hranimo v zapečatenih pogojih 1,5 ure in vzorec razkalupimo,
- primerno obdelamo in ovijemo s folijo, da preizkušanec ohrani obliko
- hranjenje.

#### 4.4.2.2 Preizkus načrtovane priprave preizkušancev

- **Načrtovanje mešanice**

Za preizkus izvedbe načrtovane priprave so bile načrtovane mešanice zemljine z vsebnostjo totalne vode 64 odstotkov s 17 odstotki cementa.

Cement je predvidoma optimalno vezivo za stabilizacijo zemljine iz Luke Koper. Dobra učinkovitost je predvidena tudi z dodatkom elektrofiltrskega pepela. Na podlagi ugotovitev v poglavju 4.2 sem se odločil preizkusiti dve vrsti cementa, in sicer običajnega cementa C II/B-P 42,5 in cementa z dodatkom elektrofiltrskega pepela, in primerjati njuno učinkovitost. Na podlagi priporočil za uporabo količine veziva je bilo izbrano stabiliziranje z 17 odstotki cementa, glede na suho težo zemljine. Izbrana vsebnost veziva je odstotek višja od maksimalne priporočene učinkovite vsebnosti Ahnberg (2004) za uporabo cementa v glini in višja od vrednosti priporočene učinkovite vsebnosti Udina (1997) ter nižja od uporabnih vsebnosti na Japonskem, 20–30 odstotkov (Okumura, 1999). S temi preiskavami zajamemo izbiro optimalne vrste cementa.

Upoštevana je ugotovljena optimalna vlažnost mešanic, ki je približno 64 odstotkov.

Vsebnost vode je izbrana na podlagi optimalne vlažnosti cementne mešanice v glini ( $w_{\text{tot,opt}}$ ), glej poglavje 4.3.1. Izbira vlažnosti je v metodi mokrega mešanja, kar v teh preiskavah ponazarjamo, pogojena z vodo-cementnim razmerjem ( $w_{\text{cr}}$ ). Običajen vodo-cementni faktor je 0,6 do 1,3 (Okumura, 1999), v uporabi je razmerje  $w_{\text{cr}}$  od 0,5 do 2,5, (poglavje 2.5). Vsebnost celotne vode je izbrana glede na mejo židkosti:

$$w_{\text{tot,opt}} \approx 1,0 \times 64 \%$$

Tako je  $w_{\text{cr}}$  enak 1. Sestava mešanice je 100 odstotkov suhe zemljine, 64 odstotkov vode in 17 odstotkov cementa.

Preglednica 28: Izračun vsebnosti vode za mešanje s cemento pasto.

## Luka Koper

### Mulj

Suha gostota		1,17	t/m <sup>3</sup>
Gostota	17–18 kN/m <sup>3</sup>	1,78	t/m <sup>3</sup>
Vsebnost vode (w)	45–50 %	47	%
Meja židkosti (w <sub>L</sub> )		63,7	%
Žaro izguba		16	%
Voda v zemljini		570	kg/m <sup>3</sup>
Voda v zemljini pri meji židkosti		694	kg/m <sup>3</sup>
w <sub>L</sub> - w		124	kg/m <sup>3</sup>

Pri izbrani mešanici dodamo v zemljino s 47-odstotno vlažnostjo in 17 odstotki cementa 17 odstotkov veziva v obliki cementne paste.

- **Analiza poskusne priprave vzorca**

Mehansko kontrolirano mešanje je bilo praktično neizvedljivo. Kot vzrok lahko navedem lepljivost (plastičnost) zemljine, saj se je zemljina ob stiku z mešalkami hipno prilepila na mešalke in zagotovitev homogenosti mešanice je bilo onemogočeno.

Odločil sem se za poskus ročnega mešanja, ki z vmešavanjem veziva v vlažno zemljino prav tako ni bilo učinkovito.

Kot učinkovita rešitev se je izkazala naslednja prilagoditev postopka, in sicer:

- vezivo ročno vmešamo v suho zemljino, do dosega vidne homogenosti,
- nato ročno vmešamo še potrebno količino vode.

Pri pripravi načrtovane mešanice je bilo ovirano zgoščanje z jeklenim batom, saj se je masa mešanice lepila na bat in tako onemogočala učinkovito zgoščanje. Rezultat so bili vzorci z večjo prisotnostjo zračnih mehurčkov, ki motijo homogenost mešanice in vplivajo na pridobljene trdnosti.

Pri vzorčenju z vtiskanjem kalupa v maso zemljine je bila homogenost vzorcev boljša, toda ne optimalna.

Ker je zemljina zelo lepljiva (visoko plastična), sem praktično preizkusil tudi obdelovalnost mešanice z nižjo w<sub>tot</sub> in s tem, pri upoštevanju prilagoditev, opisanih v Analizi poskusne priprave vzorcev, optimiziral tudi homogenost mešanic. Posledično sem se odločil za mešanje vzorcev pri vlažnosti 47 odstotkov, kar je naravna vlažnost referenčne zemljine. Lahko povzamem, da je bila pri nadaljnjih pripravah simulirana metoda suhega mešanja.

#### 4.4.3 Podroben uporabljen postopek priprave preizkušancev

Po preizkusu in analizi načrtovane priprave preizkušancev sem sestavil postopek priprave preizkušancev, uporabljen v nadaljnjih preiskavah za simulacijo metode suhega mešanja:



- zemljinu posušimo na 40 °C v ventilacijski peči,
- zemljinu zdrobimo in presejemo skozi sito z odprtinami velikosti 2 mm,
- pripravimo potrebno količino suhe zemljine in veziva. Veziva, v tem primeru dvokomponentno (npr. apno-cement), temeljito zmešamo,
- v posodo vstavimo potrebno količino suhe zemljine in veziva ter mešamo do vidne homogenosti mešanice,
- v posodo vstavimo potrebno količino vode in ročno mešamo zemljinu. Čas mešanja je omejen na 5 minut. Treba je ustvariti homogeno mešanico,
- pritisk je omejen na približno 100 kPa. Postopoma, v manjših količinah, vstavljamo mešanico v kalup in jo sproti zgoščamo z jeklenim batom z večjim številom udarcev in izvajanjem pritiska približno 100 kPa za zagotovitev izločitve zračnih mehurčkov,
- hranimo v zapečatenih pogojih 1,5 ure in vzorec razkalupimo,
- primerno obdelamo, ovijemo s folijo, da ohrani obliko,
- hranjenje.

Upoštevamo časovno omejitev od začetka mešanja do hranjenja izdelanih preizkušancev 25 minut.

Časi so v procedurah zelo različni, dejanski čas mešanja bi najbolje ponazorili z mešanjem približno eno minuto. Ker pa bi v takem času prišlo do prevelikega raztrosa trdnosti, kot posledica neenakomernega mešanja, je taka omejitev nesmiselna. Sam sem omejil čas mešanja na 5 min. Večinoma je naveden čas priprave homogenega vzorca med 5 in 10 min.

Izbiri dimenzije vzorca je pogojevala dostopna oprema. Uporabili smo vzorce dimenzij 41/82 mm.

#### **4.4.3.1 Predvideno hranjenje vzorcev**

Vse preizkušance hranimo pri temperaturi  $20 \pm 3$  °C. Zaščita pred spremembo vlažnosti je bila izvedena na dva alternativna načina.

##### **I. Hranjenje**

Preizkušance s folijo zatesnimo po obodu in na vrhu, dno pustimo nezaščiteno in omogočimo dostop do vode preko vlažne polsti. Hranili smo jih v plastični posodi z dvignjenim dnom za hranjenje vzorcev. Nameščeni so bili na krpi, prepojeni z vodo in prekriti s filtrskim papirjem. S tem omogočimo srkanje vode vzorcem iz dna vzorca podobno kot lahko v naravi izvedeni koli srkajo vodo iz okoliške zemljine. Kot ugotovitev lahko navedem, da so bili vzorci pred izvajanjem testov vidno enakomerno vlažni po višini.



Slika 38: Slika uporabljenega hranjenja.

## II. Hranjenje

Preizkušance smo popolnoma zatesnili s samolepilno folijo, ki ima tudi funkcijo ohranjanja oblike, in jih shranili v plastičnih vrečkah.

### 4.4.3.2 Oprema

- Jeklen ali aluminijast cilindrični kalup v razmerju višine in premera vsaj 2. V dejanskem primeru je bil uporabljen kalup premera 41 mm in višine 90 mm s cevko za sesanje zraka (namenjen pripravi vzorca za triosni test);
- membrane za pripravo vzorca za triosni test;
- zgoščevalno orodje: krožni jeklen bat debeline približno 10 mm s premerom 5 mm, manjšim od notranjega premera kalupa, s pritrjenim jeklenim ročajem dolžine približno 50 mm. Alternativno lahko uporabljamo jeklen bat, podoben opisanemu z izvedbo pritiska 100 kPa. V lepljivih zemljinah bo mogoče potrebno na osnovo namestiti ročaj pod kotom 60°, glede na ravnino bata, za lažjo izvedbo takega pritiska in realizacijo zgoščanja;

- pri pripravi vzorca za simulacijo metode mokrega mešanja je bil uporabljen plastičen kalup dimenzij 47/94 mm. Vzorec je bil zbit ročno, saj uporaba jeklenega bata ni bila mogoča.



Slika 39: Uporabljena oprema v pripravi preizkušancev.

#### 4.4.3.3 Izbira dimenzij vzorca

Uporabljeno razmerje med višino in premerom je približno 2.

Večinoma se priporoča uporaba preizkušancev premera 50 mm. Šele ko zemljina vsebuje veliko grobih delcev ali vlaken, je treba uporabiti večji premer. V mojem primeru so bili premeri manjši, in sicer 41 mm, izbiro premera je narekovala oprema za mešanje. Dimenzija preizkušancev za simulacijo metode mokrega mešanja je bila 47/94 mm. Premer vzorca pogojuje tudi izbira testne metode, v tem primeru SIST-TS CEN ISO/TS 17892-7:2004.

#### 4.4.3.4 Priprava veziva

Kadar se uporablja vezivo, ki je sestavljeno iz dveh ali več materialov, zmešamo te komponente skupaj v zahtevanih deležih in v zadostni količini za izvedbo zahtevanih preskusov. Za mokro mešanje v obliki malte mešamo veziva z vodo, da dobimo potrebno razmerje voda-vezivo.

#### **4.4.4 Uporaba postopka priprave**

Uporabljen laboratorijski postopek priprave vzorcev stabilizirane zemljine z mešanjem z apnenim in/ali cementnim vezivom za aplikacijo globokega mešanja je prevzet iz navedenih procedur in prilagojen. Osredotoča se na mehke koherentne zemljine, katere lahko vsebujejo organske primesi v različnih odstotkih. Stabilizacijski material je lahko apno ali cement ali mešanica cementa z dodatki: grobo zrnata plavžna žindra, mavec, apno, pepel. Vzorci služijo za preiskavo lastnosti stabilizirane zemljine na primer z enoosnim tlačnim preskusom drobno zrnatih zemljin (SIST-TS CEN ISO/TS 17892-7:2004), lahko tudi s triosnim preskusom (SIST-TS CEN ISO/TS 17892-8:2004), ali za izvajanje testov propustnosti (ISO/TS 17892-11:2004) in stisljivosti (ISO/TS 17892-5:2004) v edometriki celici.

#### **4.4.5 Pomen in uporaba**

Uporabljena procedura je relativno preprosta in zajema vzorce stabilizirane zemljine, primerne za določitev trdnosti in togosti s pomočjo laboratorijskih trdnostnih testov na cilindričnih vzorcih, kot so: enoosna tlačna trdnost, različne vrste triosnih testov. Tudi druge lastnosti, kot so prepustnost, fizikalna in kemijska trajnost in stisljivosti se lahko merijo na takšnih vzorcih.

Ugotovitve preiskav laboratorijskih preizkušancev se lahko uporabijo pri izbiri in odmerjanju veziva za projekte globokega mešanja. Pogoji mešanja in dozorevanja v laboratoriju bistveno odstopajo od razmer na terenu, posledično bo tudi laboratorijska trdnost in togost, določena na vzorcih, pripravljenih po tej proceduri, odstopala od vrednosti na terenu. Vendar pa so pri pripravi projekta globokega mešanja primerjalne laboratorijske preiskave lastnosti na različnih vzorcih, pripravljenih z različnimi vezivi v različnih odmerkih in po različnih obdobjih hranjenja, koristne in pogosto nepogrešljive.

Razvijemo lahko tudi empirična pravila za izenačitev razlik trdnosti in togosti med stabiliziranimi materiali na terenu in v laboratoriju. Treba je pripraviti število preizkusnih kolov pred začetkom ali na začetku dejanskega projekta. Glede na rezultate laboratorijskega programa kombinacije nekaj vrst veziv in njihovih količin lahko ovrednotimo rezultate in jih uporabimo pri določitvi inženirskih parametrov za uporabo v končnem projektiranju.

#### **4.4.6 Zemljina**

EuroSoilStab (2002) priporoča, naj bo zemljina pridobljena z mesta v preiskavi s standardnimi napravami in postopki za vzorčenje tal.

Najpomembnejše je, da je pridobljen vzorec reprezentativen, glede na zemljino predvidenega področja izboljšanja tal.

### **4.5 Program preiskav**

Namen preiskav je potrditev predhodnih ugotovitev učinkovanja veziv v zemljini, ugotovitev in potrditev optimalnega veziva za stabilizacijo zemljine iz Luke Koper in pridobitev karakterističnih vrednosti trdnosti za izračun.

Po ugotovljenih karakteristikah zemljine (poglavje 4.1), pričakovanem učinkovanju veziva v zemljini (poglavje 4.2), izbiri vsebnosti vode (poglavje 4.3) je bilo za potrditev predvidenega učinkovanja veziv v zemlji in določitve trdnosti mešanic kot mere učinkovitosti stabiliziranja treba sestaviti program laboratorijskih preiskav preizkušancev stabilizirane zemljine.

Metoda priprave preizkušancev je določena: poglavje 4.4.3. Metoda je bila načrtovana (poglavje 4.4.1) in preizkušena (4.4.2) ter modificirana za nadaljnjo uporabo (4.4.3). Pri preskusu načrtovane metode priprave mešanice je bilo ugotovljeno, da je možno homogene vzorce pripraviti le, če je celotna vlažnost mešanice nižja od 50 odstotkov. Z namenov priprave homogenih in primerljivih preizkušancev je bila izbrana celotna vlažnost mešanice 47 odstotkov, kar je enako naravni vlažnosti zemljine, in posledično je simulirana metoda suhega mešanja.

Izbran je tudi čas hranjenja: 28 in 91 dni. S preizkušanjem pri 28 in 91 dneh bomo pridobili podatek o časovnem priraščanju trdnosti stabilizirane zemljine. Karakteristična vrednost za izračun je pri cementni stabilizaciji 28 dni in pri apneni 91 dni, sicer za določitev karakteristične projektne vrednosti cementa po 28 dneh. Kot je opisano v poglavju 3.3.1, nam vrednost po 91 dneh hranjenja potrди izbiro veziva.

Predvidena načina hranjenja sta opisana v poglavju 4.3.3.1. Za osnovno hranjenje je izbrano 1. hranjenje: vzorec, zatesnjen na dnu in obodu z dostopom do vode prek vlažne polsti na dnu vzorca. Za primerjalno hranjenje pa je izbrano 2. hranjenje: hranjenje v zapečatenih pogojih. Za ugotovitev vpliva hranjenja in ugotovitve korelacij trdnosti so načrtovane primerjalne raziskave mešanic z enako vrsto in vsebnostjo veziva. Predvidena je primerjava hranjenja vsake vrste veziva pri določeni vsebnosti veziva.

Z namenom zagotovitve verodostojnih vrednosti so vse testne mešanice preiskovane na treh vzorcih.

#### 4.5.1 Označevanje mešanic in preizkušancev

- **Mešanica**

Mešanica: suha zemljina / celotna vlažnost mešanice / vezivo (vrsta veziva in količina veziva)  
Glede na uporabljeno vrsto veziva, je preizkušanec označen z velikimi tiskanimi črkami kot sledi:

A apno CL 90 Q,

AC apno (CL 90 Q) in cement (C II/B-V 42,5) N v masnem razmerju 25/75,

C cement (C II/B-V 42,5).

Odstotek dodanega suhega veziva, glede na suho težo zemljine, je v oznaki zapisan s številko.

Odstotek celotne vode je podan glede na suho težo zemljine in je v oznaki zapisan s vrednostjo razmerja teže celotne vode na suho težo zemljine. Na primer 0,47 je 47-odstotna vlažnost mešanice.

Teža suhe zemljine je osnovna količina za opis mešanice in je v oznaki zapisana s številko 1,00.

Primer: 1,00/ AC11/0,47: Suha zemljina / Mešanica z vezivom apno-cement; 11 odstotkov veziva glede na suho zemljino / 47-odstotna vlažnost mešanice, glede na suho zemljino.

- **Preizkušane**

Glede na uporabljeno vrsto veziva je preizkušane označen z velikimi tiskanimi črkami kot pri mešanici.

Odstotek dodanega suhega veziva, glede na suho težo zemljine, je v oznaki zapisan s številko, še ena številka za ločilom pa označuje zaporedno številko preizkušancea prej navedene mešanice.

Primer: AC11-2: Mešanica z vezivom apno cement; 11 odstotkov veziva glede na suho zemljino; drugi preizkušane te mešanice.

- **Metoda hranjenja**

hr<sub>1</sub> ali (I.) hranjenje vzorca zatesnjenega po obodu in na vrhu, z dostopom do vode prek vlažne polsti na dnu vzorca, pri temperaturi  $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ ,

hr<sub>2</sub> ali (II.) hranjenje popolnoma zatesnjenega vzorca, pri temperaturi  $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ .

Odstotek celotne vode je podan glede na suho težo zemljine in je v oznaki zapisan s vrednostjo razmerja teže celotne vode na suho težo zemljine. Na primer 0,47 je 47-odstotna vlažnost mešanice.

Teža suhe zemljine je osnovna količina za opis mešanice in je v oznaki zapisana s številko 1,00.

Primer: 1,00/ AC11/0,47: Suha zemljina / Mešanica z vezivom apno-cement; 11 odstotkov veziva glede na suho zemljino / 47-odstotna vlažnost mešanice, glede na suho zemljino.

#### **4.5.2 Priprava programa laboratorijskih preiskav stabilizirane zemljine**

Znana je metoda priprave preizkušancev (poglavje 4.4.3), izbran je način hranjenja (poglavje 4.4.3.1) in na podlagi analize poskusne priprave preizkušancev je izbrana celotna vsebnost vode 47 odstotkov in čas hranjenja. Potrebna je še odločitev o vrsti veziva in količini dodanega veziva.

Namen priprave programa laboratorijsko stabilizirane zemljine je sestava programa za potrditev predvidenega optimalnega veziva in potrditev učinkovanja veziv v zemljini iz Luke Koper. V načrtovanje programa so vključene tudi preiskave za ugotovitev optimalne vrste cementa in potrditev učinkovitejšega masnega razmerja apno-cementnega veziva. Namen preiskav je zmanjšati obseg potrebnih preiskav.

V prvih testnih preizkusih je bilo potrebno preizkusiti učinkovitost postopka priprave preizkušancev, z namenom odprave pomanjkljivosti metode (poglavje 4.4.2.2). V preizkus je bila vključena tudi izbira optimalne vrste cementa, potek, rezultati in ugotovitve preizkusov so podani v nadaljevanju.

V drugi fazi je primerjano učinkovanje apno-cementa pri različnem masnem razmerju apno cementa in sicer 0,50/0,50 in 0,25/0,75. Na podlagi analize lastnosti zemljine (poglavje 4.2),

predvidevam boljše učinkovanje stabilizacije pri uporabi masnega razmerja apno cementa 0,25/0,75.

Priporočila za izbiro količine veziva so podane v poglavju 3.3 in preglednici 14.

#### 4.5.2.1 Preizkusne preiskave načrtovane priprave preizkušancev, izbira optimalne vrste cementa

Preiskava je bila primarno načrtovana za preizkus načrtovane priprave preizkušancev, podrobnosti načrtovanja mešanice so podane v poglavju 4.4.2. Vključena je bila tudi izbira optimalne vrste cementa z namenom uporabe optimalne vrste cementa v nadaljnjem programu.

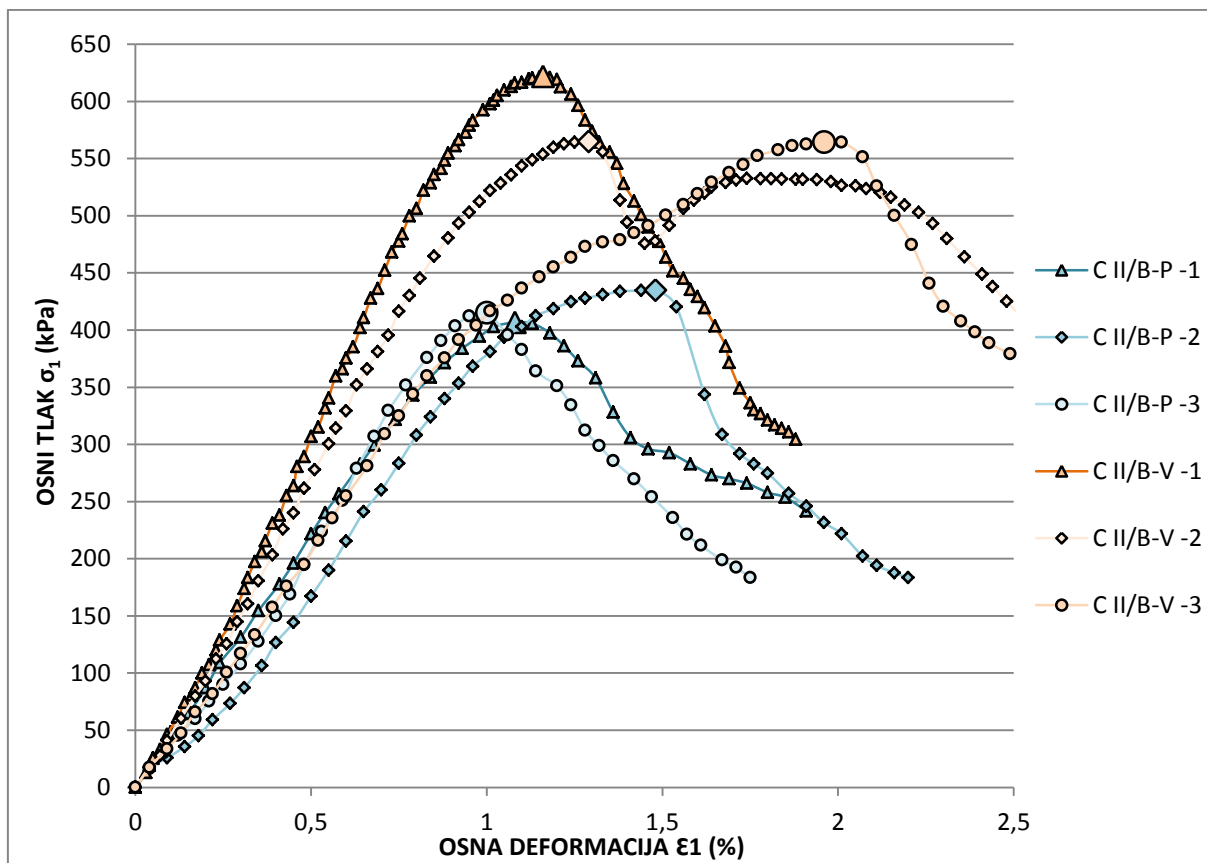
Glede na lastnosti zemljine, predvidevamo, da bo najbolj učinkovito stabiliziranje z uporabo cementa z dodatkom elektrofiltrskega pepela (C II/B-V 42,5) ali običajnega cementa (C II/B-P 42,5). Cement je bil izdelan v Salonitu Anhovo, kjer si lahko ogledamo natančnejše karakteristike cementov. Izbiro cementa za preiskave je pogojevala predvsem cena vrst cementa, saj je treba zagotoviti tudi ekonomičnost stabiliziranja.

Preizkušali smo mešanice 1,00/0,64/C17. Potek načrtovanja in priprave preizkušancev je podrobneje opisan v poglavju 4.4.4.2. Preizkušeni so bili po trije vzorce stabiliziranja z vezivoma C II/B-P 42,5 in C II/B-V 42,5.

- **Rezultati preizkusne preiskave**

*Preglednica 29: Rezultati enoosnih preiskav stabiliziranja z različnimi tipi cementa; 1,00/C17/0,64; po 28 dneh hranjenja*

CEMENT	$q_u$ (kPa)	$\epsilon$ (%)	POVPREČNE VREDNOSTI		$w_{zač}$	$w_{kon}$	SPREMEMBA VLAGE	$\gamma$ (Mg/m <sup>3</sup> )
			$q_u$ (kPa)	$\epsilon$			$\Delta W$	
C (C II/B-V 42,5)17-1	622	1,16 %	584	1,47 %	47,0 %	48,9 %	-1,83 %	1,62
C (C II/B-V 42,5)17-2	565	1,29 %			47,0 %	48,8 %		1,64
C (C II/B-V 42,5)17-3	564	1,96 %			47,0 %	48,8 %		1,62
C (C II/B-P 42,5)17-1	407	1,08 %	419	1,19 %	47,0 %	50,5 %	-3,40 %	1,61
C (C II/B-P 42,5)17-2	435	1,48 %			47,0 %	50,7 %		1,60
C (C II/B-P 42,5)17-3	415	1,00 %			47,0 %	50,0 %		1,62



Grafikon 3: Potek enosnih poskusov mešanic z različnim tipom cementa; mešanica 1,00/C17/0,64; po 28 dneh hranjenja

- **Interpretacija rezultatov in komentarji**

Za učinkovitejšo vrsto cementa pri stabiliziranju se je izkazal cement z dodatkom pepela C II/B-V 42,5, ki je posledično vključen v nadaljnje preiskave stabiliziranja zemljine.

Za nadaljnje preiskave izberem cement C II/B-V 42,5, cement z dodatkom pepela. Kot je razvidno iz preglednice 29, z uporabo tipa cementa C II/B-V 42,5 v povprečju dosežemo  $q_u$  584 kPa, kar je 40 odstotkov več kot s cementom C II/B-P 42,5, kjer je povprečna vrednost doseženega  $q_u$  419 kPa. Poleg tega je pri tem cementu tudi porušna deformacija nižja in s tem togost stabilizirane zemljine višja.

Navaja se tudi ugodno vplivanje dodatka pepela na dolgotrajno trdnost, torej lahko predvidevamo pri uporabi C II/B-V 42,5 večjo pridobitev na trdnosti s časom, kot pri čistem pucolanskem cementu.

Iz rezultatov preiskav različnih vrst cementa lahko ugotovimo, da na povečanje trdnosti bistveno vpliva vrsta cementa.



#### 4.5.2.2 Izbira optimalnega masnega razmerja apno cementa pri apno-cementni stabilizaciji

Običajna uporabljena masna razmerja apno cementa sta 25/75 in 50/50. Po analizi učinkovanja veziv v zemljine je, kot posledica prisotnosti organskih snovi v zemljini, pričakovano učinkovitejše razmerje 25/75 (poglavje 4.2.3.2). Namen preiskave je potrditev ali zavrnitev te predpostavke.

Priprava preizkušancev je potekala po proceduri opisani v 4.4.3. Izbrana je nižja priporočena vsebnost veziva (10–20 odstotkov; Broms, 2004) za apno-cementno stabilizacijo v organski zemljini, in sicer 11 odstotkov. Primerjava je izvedena na mešanicah 1,00/0,47/AC11.

Sodelujoče vezivo: apno CL 90 Q (A); cement C II/B-V 42,5, označevan s C.

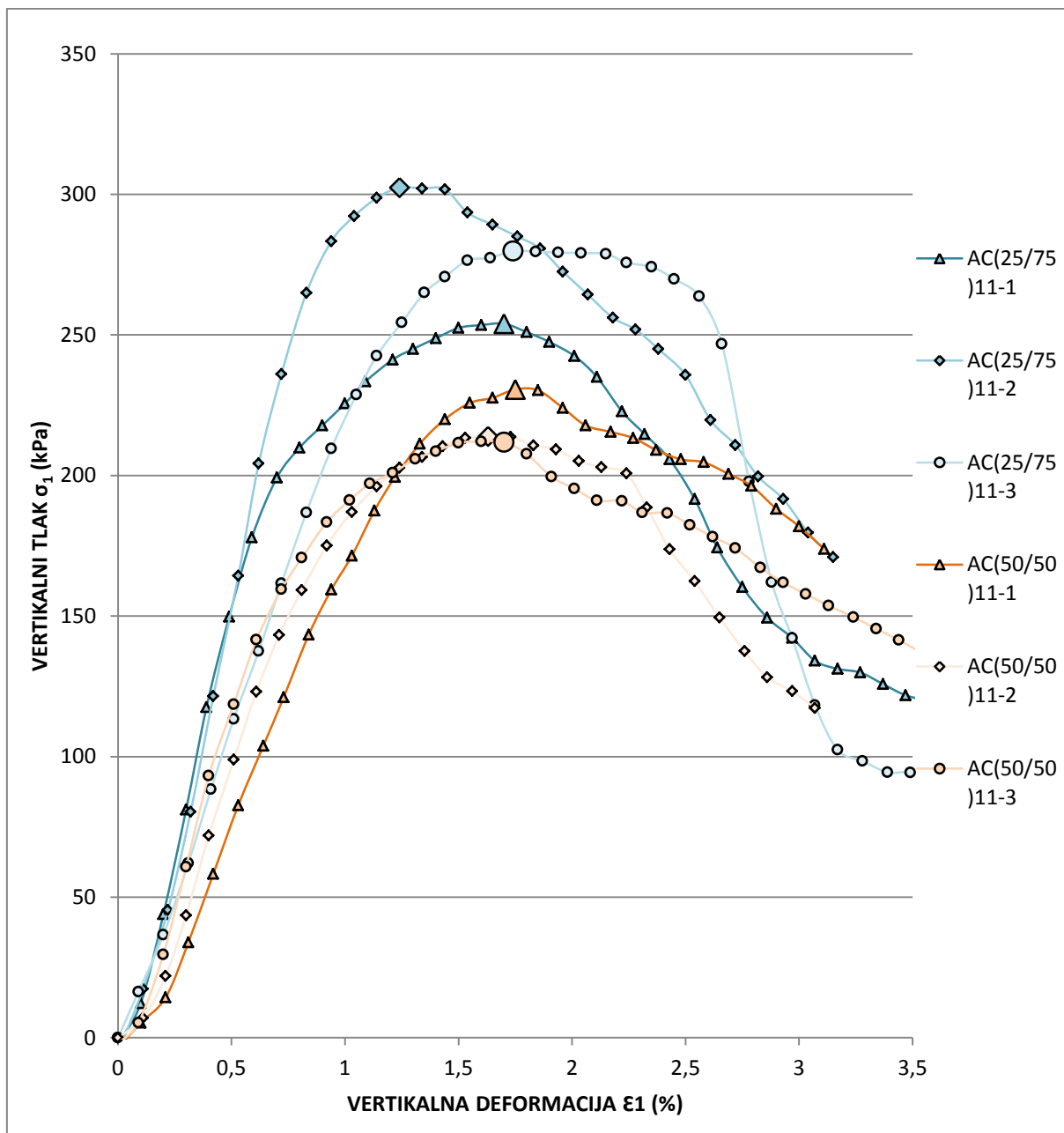
##### • Rezultati preiskav

Preglednica 30: Rezultati enoosnih poskusov z različnim razmerjem apna (CL 90 Q) in cementa (C II/B-V 42,5); mešanica 1,00/AC11/0,47); po 28 dneh hranjenja

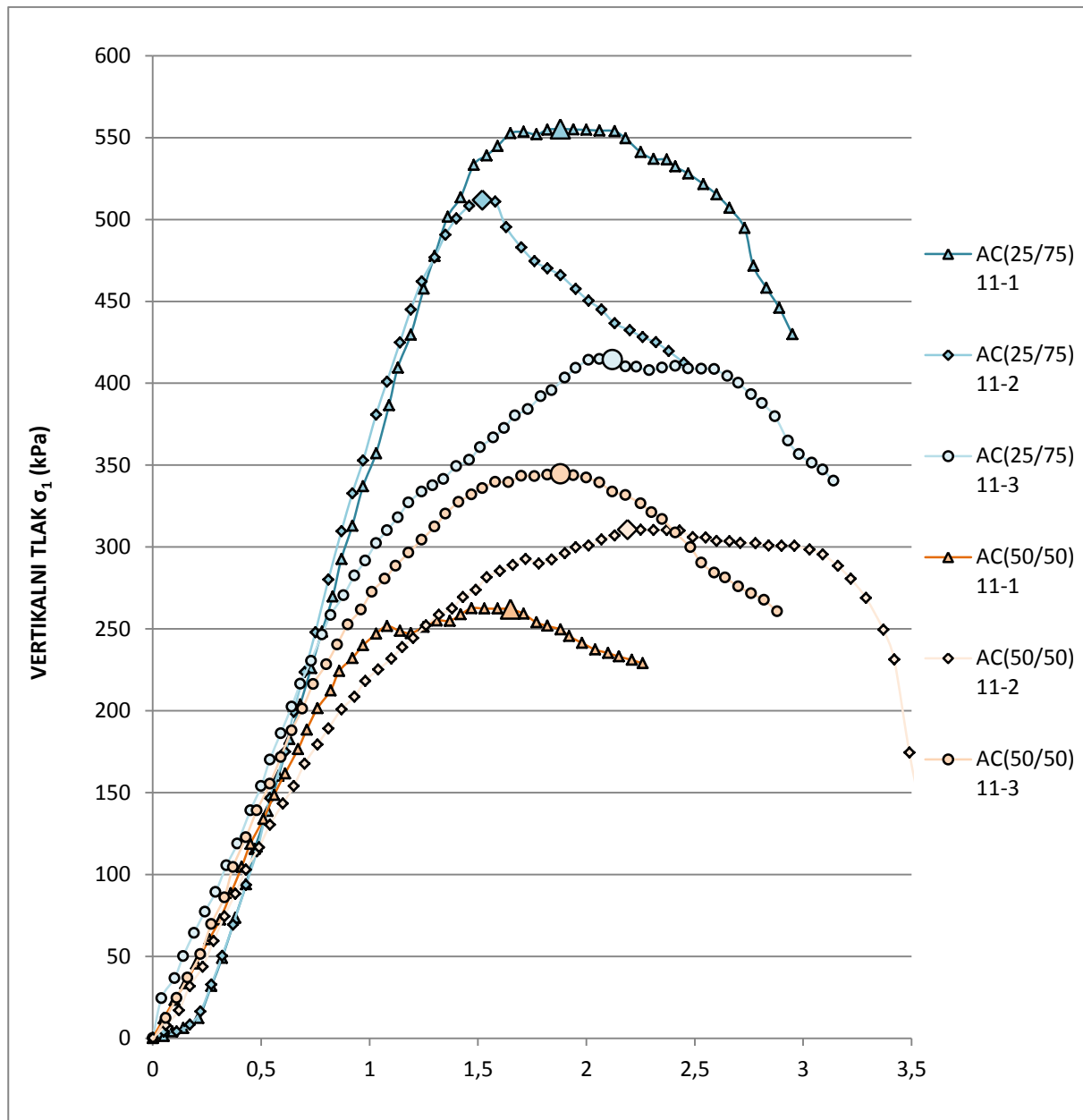
APNO/CEMENT	q <sub>u</sub> (kPa)	ε (%)	POVPREČNE VREDNOSTI		W <sub>zač</sub>	W <sub>kon</sub>	SPREMEMBA VLAGE	γ (Mg/m <sup>3</sup> )
			q <sub>u</sub> (kPa)	ε				
AC(50/50)11 -1	231	1,75 %	228	1,69 %	47,0 %	44,6 %	2,47 %	1,74
AC(50/50)11 -2	214	1,63 %			47,0 %	44,3 %		1,74
AC(50/50)11 -3	212	1,70 %			47,0 %	44,7 %		1,75
AC(25/75)11-1	254	1,70 %	279	1,56 %	47,0 %	44,8 %	2,20 %	1,73
AC(25/75)11-2	302	1,24 %			47,0 %	44,8 %		1,75
AC(25/75)11-3	280	1,74 %			47,0 %	44,8 %		1,75

Preglednica 31: Rezultati enoosnih poskusov z različnim razmerjem apna (CL 90 Q) in cementa (C II/B-V 42,5); mešanica 1,00/AC11/0,47); po 91 dneh hranjenja

APNO/CEMENT	q <sub>u</sub> (kPa)	ε (%)	POVPREČNE VREDNOSTI		W <sub>zač</sub>	W <sub>kon</sub>	SPREMEMBA VLAGE	γ (Mg/m <sup>3</sup> )
			q <sub>u</sub> (kPa)	ε				
AC(25/75)11 -1	555	1,88 %	494	1,84 %	47,0 %	39,4 %	7,20 %	1,74
AC(25/75)11 -2	512	1,52 %			47,0 %	39,6 %		1,74
AC(25/75)11 -3	414	2,12 %			47,0 %	40,4 %		1,75
AC(50/50)11-1	262	1,65 %	306	1,91 %	47,0 %	41,9 %	6,53 %	1,73
AC(50/50)11-2	311	2,19 %			47,0 %	42,6 %		1,75
AC(50/50)11-3	345	1,88 %			47,0 %	36,9 %		1,75

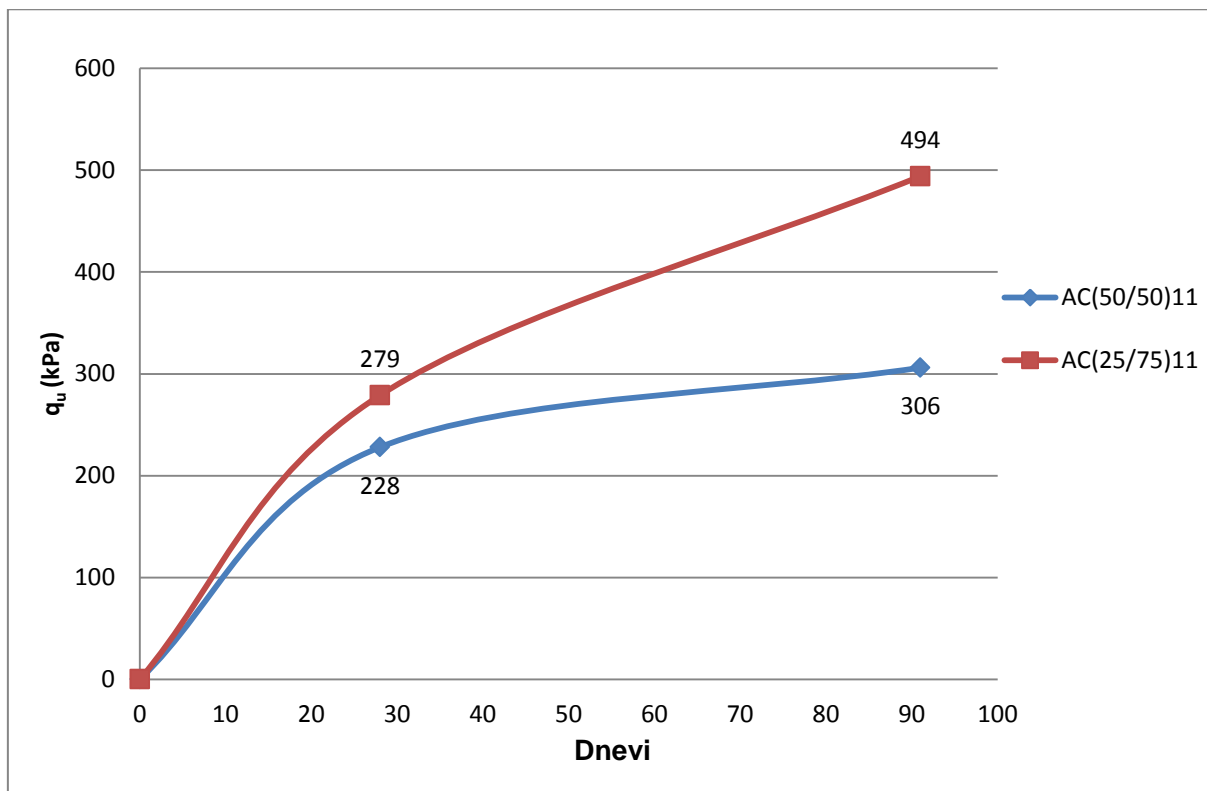


Grafikon 4: Potek enosnih poskusov mešanic z različnim tipom cementa; mešanica 1,00/AC11/0,47; po 28 dneh hranjenja



Grafikon 5: Potek enoosnih poskusov mešanic z različnim tipom cementa; mešanica 1,00/AC11/0,47; po 91 dneh hranjenja

- **Povprečne vrednosti**



Grafikon 6: Pridobivanje trdnosti s časom, mešanice z različnim apno cementnim razmerjem; mešanica 1,00/AC11/0,47

- **Interpretacija rezultatov in komentarji**

V nadaljnjih preiskavah uporabljamo pri apneno-cementnem stabiliziranju masno razmerje apno/cementa 0,25/0,75, ki se je izkazalo za učinkovitejše.

Iz grafikona 6 je razvidno večanje razlike dosežene  $q_u$  s časom pri mešanicah z vsebnostjo AC 11 odstotkov. Pri masnem razmerju apno cementa 0,25/0,75 je trdnost po 28 dneh za 22 odstotkov, po 91 dneh pa kar 61 odstotkov večja kot pri razmerju 0,50/0,50. Poleg tega je pri masnem razmerju apno/cementa v razmerju 0,25/0,75 porušna deformacija nižja in s tem togost stabilizirane zemljine višja. Za učinkovitejšo se je izkazala uporaba razmerja apno/cement 0,25/0,75, kar je, kot smo predvideli, posledica zmanjšanega učinkovanja apna zaradi visoke vsebnosti organskih snovi v zemljini. Visok prirastek trdnosti s časom za razmerje apno/cement v razmerju 0,25/0,75 je verjetno posledica visoke vsebnosti drobnih frakcij v zemljini (Topolnicki, 2004).

#### 4.5.3 Analiza in ugotovitve načrtovanja programa laboratorijskih preiskav stabilizirane zemljine

Vsebnost celotne vode je 47 odstotkov, simuliramo SM. Na podlagi preiskav za namen načrtovanja programa laboratorijskih preiskav je bilo ugotovljeno:

- optimalna vrsta cementa je C II/B-V 42,5, cement z dodatkom pepela,

- optimalno masno razmerje pri apno-cementni stabilizaciji je razmerje 0,25/0,75.

Zavedati se je treba razlik v pripravi vzorca za simuliranje MM ( $w_{tot} = 64 \%$ ) in SM ( $w = 47 \%$ ), ki so opisane v poglavjih 4.4.2 in 4.4.3. Pri simuliranju MM je bila vgradnja mešanice v kalupe otežena. Posledično je bil postopek priprave izboljšán z namenom izboljšanja homogenosti vzorcev. Modifikacija postopka se je, po rezultatih preiskav (preglednica 30, in 31) sodeč, izkazalo za učinkovito. Pri pripravi vzorcev za simuliranje MM je merjena povprečna gostota vzorce 1,62 Mg/m<sup>3</sup>, medtem ko je pri simulaciji SM povprečna merjena gostota vzorcev 1,72 Mg/m<sup>3</sup>, kar je blizu vrednosti gostote referenčne zemljine, ki je povprečna 1,78 Mg/m<sup>3</sup>. Vpliv različne priprave vzorca ni bil raziskan.

#### 4.5.4 Program laboratorijskih preiskav stabilizirane zemljine

Za sestavo programa laboratorijskih preiskav je bilo poleg navedenega potrebno izbrati tudi vrsto in količino veziva mešanice ter izbrati metodo in čas hranjenja.

Sestava programa temelji na potrditvi predvidenih učinkovanj različnih veziv v zemljini iz Luke Koper, opisanih v 4.2.

Vlažnost mešanic je izbrana na podlagi preizkusa priprave preizkušanca (poglavje 4.5.2.1), kot posledica lepljivosti mešanice pri višji vsebnosti vode ( $w_{tot}$ ) v mešanici in vrednostni vlažnosti referenčne zemljine, ki je 47%. Pri taki vlažnosti simuliramo metodo suhega mešanja, kar nam omogoči uporabo žganega apna.

Procedura priprave preizkušancev je znana in preizkušena (poglavje 4.4.3).

Možna sta dva načina hranjenja. Odločil sem se za osnovno hranjenje, s katerim sem hranil vse vzorce in sicer hranjenje vzorca z dostopom do vode na dnu preizkušanca brez dostopa zraka. Za ugotovitev vpliva hranjenja in vzpostavitve korelacij trdnosti sem se odločil za vključitev primerjalnih preizkušancev hranjenih brez dostopa vode in zraka in sicer za vsako vrsto veziva pri eni vsebnosti.

Z namenom ugotovitve časovnega priraščanja trdnosti sta bila izbrana dva časa hranjenja (28 in 91 dni). Testiranje po 91 dneh nam daje karakteristično vrednost za načrtovanje trdnosti apnene stabilizacije, 28 dni pa stabilizacije ostalih vrst veziv.

- **Vezivo**

Za potrditev predvidenega učinkovanja so izbrane apnena, apneno-cementa in cementa stabilizacija.

Z namenom zmanjšanja obsega preiskav so bile opravljene predhodne preiskave (opisane v poglavju 4.4). Za namen nadaljnjih preiskav je bila izbrana optimalna vrsta cementa (C II/B-V 42,5) in optimalno masno razmerje apno-cementnega veziva (0,25/0,75).

Za potrditev slabega učinkovanja žganega apna je izbrana dodana vsebnost 7, 9 in 13 % glede na suho težo zemljine. Izbrano je žgano apno CL 90 Q.

Za predvideno najučinkovitejšo stabilizacijo, cementno stabilizacijo, izberem cement C II/B-V 42,5. Izbrana dodana vsebnost cementa je 7, 10, 13 in 16 % glede na suho težo. Kot posledica visoke vsebnosti drobnih zrn je predvideno učinkovito stabiliziranje pri višji vsebnosti cementa. Pričakujem zelo dobro učinkovanje pri vsebnosti 16 % cementa.

Izbrana dodana vsebnost je 11, 14, 17 in 20 % apno-cementnega veziva (CL 90 Q in C II/B-V 42,5) z masnim razmerjem 0,25/0,75. Količina je izbrana glede na edino priporočila za stabiliziranje z apneno-cementnimi koli in sicer Bromsa (2004), ki priporoča vsebnost apneno-cementnega veziva med 10 in 20 %. V primerjavi s cementno stabilizacijo predvidevam slabše učinkovanje apneno-cementne stabilizacije.

- **Program preiskav**

V programu preiskavah je bilo skupno vključenih 93 preizkušancev in 14 različnih mešanic z različnimi vezivi in hranjenjem preizkušancev. Glej preglednico 32 in 33.

Za ugotovitev učinka stabiliziranja je vsaka mešanica glede na metodo hranjenja in čas hranjenja potrjena s preizkusi treh preizkušancev.

Pri vseh preiskavah, z izjemo dodatnih preiskav za ugotovitev vpliva hranjenja, so preizkušanci hranjeni brez dostopa vzorca do zraka z dostopom preizkušanca na dnu prek vlažne polsti ( $hr_1$ ). Pri dodatnih preiskavah so bili vzorci zapečateni ( $hr_2$ ).

Predhodne preiskave za izbiro optimalne vrste veziva so vključevale 6 preizkušancev mešanice 1,00/C17/0,64, in sicer po tri za vsako vrsto cementa. Izbrana je bila vrsta cementa C II/B-V 42,5, ki se je izkazalo kot najučinkovitejše. Izboljšanje priprave je vključevala zmanjšanje vsebnosti vode. Izbrana je bila vsebnost celotne vode 47 %.

Predhodne preiskave z namenom potrditve izbire masnega razmerja apno-cementa (0,25/0,75 ali 0,50/0,50) so vključevale 6 preizkušancev mešanice 1,00/AC11/0,47. Izbrano je bilo masno razmerje apno-cementa 0,25/0,75, saj se je izkazalo za najučinkovitejše.

Osnovni izdelan program preiskav za potrditev pričakovanega učinka veziva glede na lastnosti zemljine (poglavje 4.1 in 4.2) vključuje 66 preizkušancev, vključno s 3 preizkušanci iz predhodne preiskave za izbiro masnega razmerja apno-cementnega veziva. Vključeno je 11 mešanic s celotno vlažnostjo mešanice 47 %.

Dodatne preiskave so načrtovane za ugotovitev vpliva hranjenja na trdnost. V dodatnih preiskavah je pripravljenih 18 preizkušancev. Za primerjavo so izbrana mešanja pri 9 % apna, 13 % cementa in 14 % apno-cementa pri vlažnosti mešanice 47 %.

Preglednica 32: Pregled programa preiskav laboratorijsko stabilizirane zemljine.

OZNAKA VEZIVA	hr <sub>1</sub>		hr <sub>2</sub> (dodatne preiskave)	
	28 dni	91 dni	28 dni	91 dni
A7	#	#		
A9	#	#	#	#
A11	#	#		
C7	#	#		
C10	#	#		
C13	#	#	#	#
C16	#	#		
AC11	#	#		
AC14	#	#	#	#
AC17	#	#		
AC20	#	#		

Preglednica 33: Pregled programa preiskav laboratorijsko stabilizirane zemljine.

VEZIVO		OZNAKA VEZIVA	VSEBNOST VEZIVA (% suhe teže zemljine)	RAZMERJE VEZIVA	VLAŽNOST
A	CL 90 Q	A7	7	1	47%
		A9	9	1	47%
		A11	11	1	47%
C	C II/B-V 42.5	C7	7	1	47%
		C10	10	1	47%
		C13	13	1	47%
		C16	16	1	47%
AC	C = CII/B-V 42.5	AC11	11	0.25/0.75	47%
		AC14	14	0.25/0.75	47%
	A = CL 90 Q	AC17	17	0.25/0.75	47%
		AC20	20	0.25/0.75	47%

#### 4.6 Preiskave mešane zemljine

Preiskave so prvotno namenjene potrditvi optimalne vrste veziva in potrditvi predvidenega učinkovanja veziv v mešanici z zemljino iz Luke Koper (lastnosti zemljine so opisane v poglavju 4.1) pri referenčni naravni vlažnosti ( $w = 47\%$ ). Preiskave lahko interpretiramo kot simulacijo mokrega mešanja, saj je bila vlažnost mešanice ( $w_{tot}$ ) enaka naravni referenčni vlažnosti zemljine. Na podlagi laboratorijskega preizkušanja je mogoča tudi ocena inženirskih lastnosti na terenu kot bo prikazano v poglavju 5.2.

V preiskave so vključene preiskave naslednjih vrst veziv in opis predvidenega učinkovanja:

- Žgano apno, CL 90 Q. Predvideno je slabo učinkovanje žganega apna, zaradi prisotnosti organskih snovi.
- Cement z dodatkom pepela, C II/B-V 42,5. Predvidevam najboljše učinkovanje glede na ostala uporabljena veziva (žgano apno in apno-cement). Izbira vrste cementa je utemeljena v poglavju 4.5.3.
- Apno-cement, CL 90 Q - C II/B-V 42,5 v masnem razmerju 0,25/0,75. Pričakovano je slabše učinkovanje v primerjavi s samim cementom in boljše učinkovanje v primerjavi z žganim apnom. Potrditev izbire masnega razmerja apno cementa je opisana v poglavju 4.5.3.

V preiskavah je vključeno ugotavljanje priraščanja trdnosti s časom. Preizkušanci so bili testirani po 28 in 91 dneh.

V preiskavah je bil ugotavljan tudi vpliv hranjenja na trdnost.

Preiskave so bile izvedene skladno s standardom SIST – TS CEN ISO/TS 17892 - 7:2004 "Enoosni tlačni preskus drobnozrnatih zemljin". Vsi testi so potekali pri hitrosti obremenjevanja 1 mm /1 min.

Rezultati in poteki enoosnih tlačnih preiskav so podani v obliki preglednic in grafikonov.

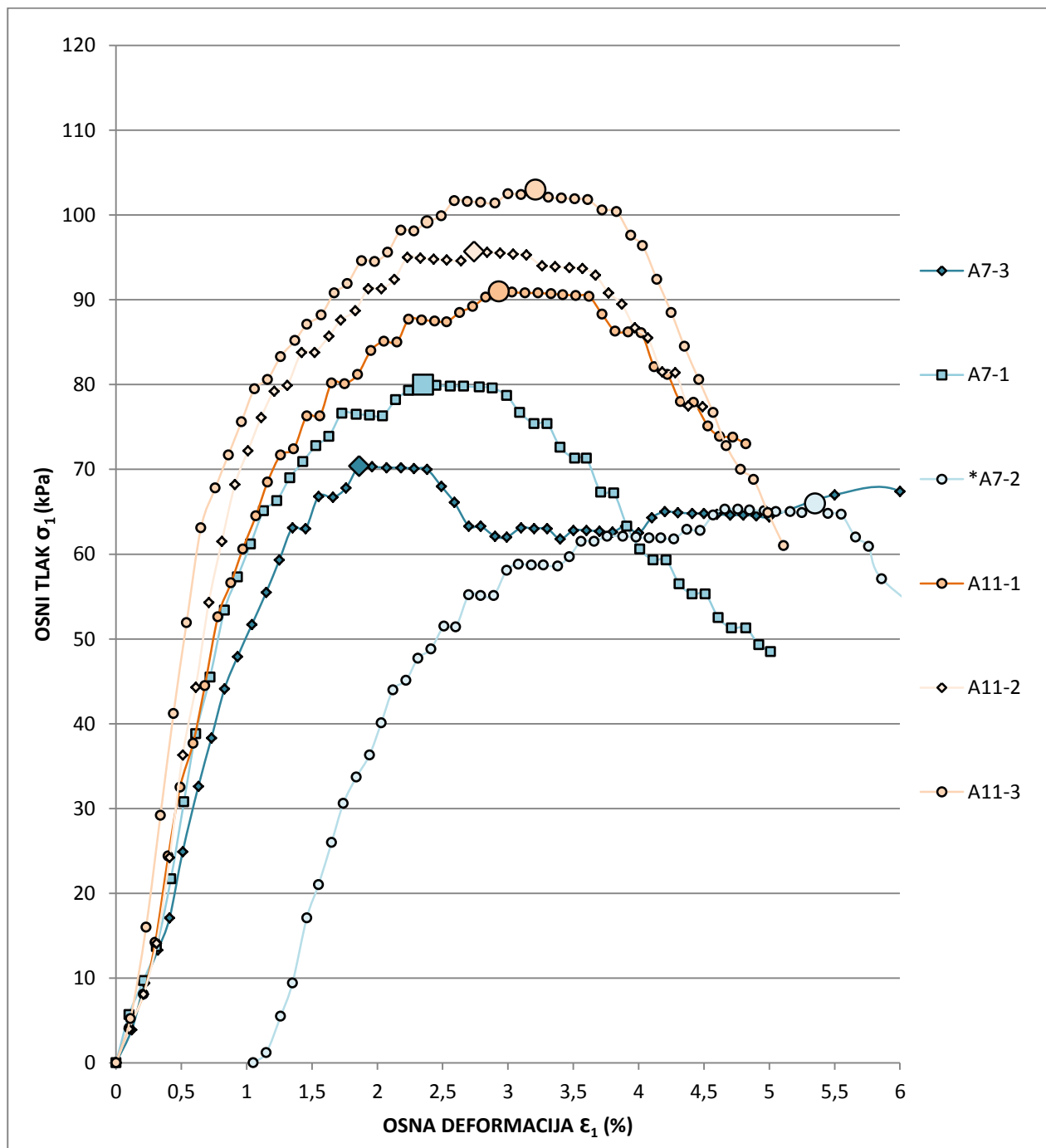
#### **4.6.1 Osnovne preiskave**

Namen in podrobnosti preiskav so opisane v uvodu poglavja. Z namenom interpretacije so povzete povprečne vrednosti mešanic, na podlagi katerih je opravljena analiza rezultatov. Merjene rezultate posameznih mešanic pri različnih vezivih in časih hranjenja lahko primerjamo med seboj. Na podlagi medsebojnega razmerja lahko izberemo optimalno vezivo (vrsto in vsebnost) in predvidimo časovni trend priraščanja trdnosti. S tako primerjavo lahko ocenimo možnost predvidenega učinkovanja veziva v zemljini glede na lastnosti zemljine in preverimo navedbe korelacij in priporočil avtorjev.

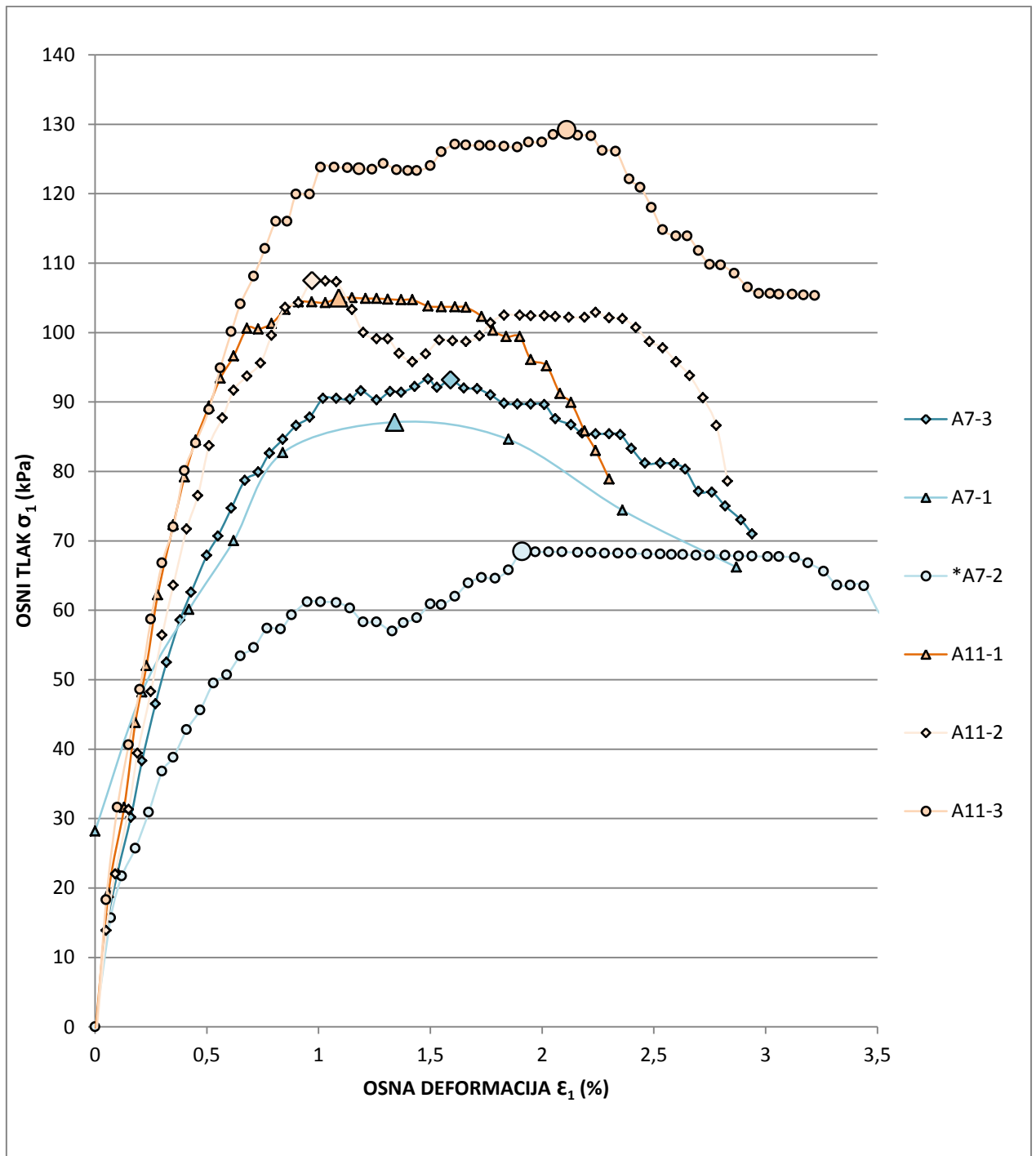


#### 4.6.1.1 Žgano apno, CL 90 Q

- Poteki enoosnih tlačnih poskusov



Grafikon 7: Potekov enoosnih preskusov mešanic z različno vsebnostjo apna ; mešanici 1,00/A7/0,47 in 1,00/A11/0,47; po 28 dneh hranjenja (\* preskus ni bil izveden skladno s standardom).



Grafikon 8: Potekov enosnih preskusov mešanic z različno vsebnostjo apna ; mešanici 1,00/A7/0,47 in 1,00/A11/0,47; po 91 dneh hranjenja

- **Rezultati enosnih tlačnih preiskav s povprečnimi vrednostmi**

Poteki enosnih tlačnih preiskav so prikazani na grafikonih 7,8,14 in 15.

Preglednica 34: Rezultati enoosnih poskusov mešanic z različno vsebnostjo apna; mešanica 1,00/A/0,47; po 28 dneh hranjenja.

APNO	q <sub>u</sub> (kPa)	ε (%)	POVPREČNE VREDNOSTI		W <sub>zač</sub>	W <sub>kon</sub>	SPREMEMBA VLAGE	Y (Mg/m <sup>3</sup> )	
			q <sub>u</sub> (kPa)	ε					
A7-1	80	2,35%	75	2,11%	47,0%	44,1%	ΔW*(-1)	1,74	
A7-2	66	5,35%			47,0%	47,8%		-0,53%	1,72
A7-3	70	1,86%			47,0%	47,7%			1,76
A9-1	82	3,13%	79	2,53%	47,0%	45,0%	2,10%	1,69	
A9-2	77	2,50%			47,0%	44,5%		1,77	
A9-3	77	1,95%			47,0%	45,2%		1,75	
A11-1	91	2,93%	97	2,96%	47,0%	44,7%	2,67%	1,76	
A11-2	96	2,74%			47,0%	44,3%		1,76	
A11-3	103	3,21%			47,0%	44,0%		1,77	

Preglednica 35: Rezultati enoosnih poskusov mešanic z različno vsebnostjo apna; mešanica 1,00/A/0,47; po 91 dneh hranjenja.

APNO	q <sub>u</sub> (kPa)	ε (%)	POVPREČNE VREDNOSTI		W <sub>zač</sub>	W <sub>kon</sub>	SPREMEMBA VLAGE	Y (Mg/m <sup>3</sup> )	
			q <sub>u</sub> (kPa)	ε					
A7-1	87	1,85%	90	1,72%	47,0%	46,0%	ΔW*(-1)	1,72	
A7-2	68	1,91%			47,0%	45,8%		1,27%	1,71
A7-3	93	1,59%			47,0%	45,4%			1,72
A9-1	95	0,92%	98	0,96%	47,0%	44,5%	2,57%	1,71	
A9-2	110	1,10%			47,0%	44,6%		1,73	
A9-3	90	0,85%			47,0%	44,2%		1,74	
A11-1	105	1,09%	114	1,39%	47,0%	43,9%	3,73%	1,75	
A11-2	107	0,97%			47,0%	43,0%		1,75	
A11-3	129	2,11%			47,0%	42,9%		1,75	

#### • Analiza rezultatov

Pričakovano naraščanje trdnosti s časom je približno 50 odstotkov končne trdnosti po 28 dneh in 75 odstotkov končne trdnosti po 91 dneh (Janz, 2002).

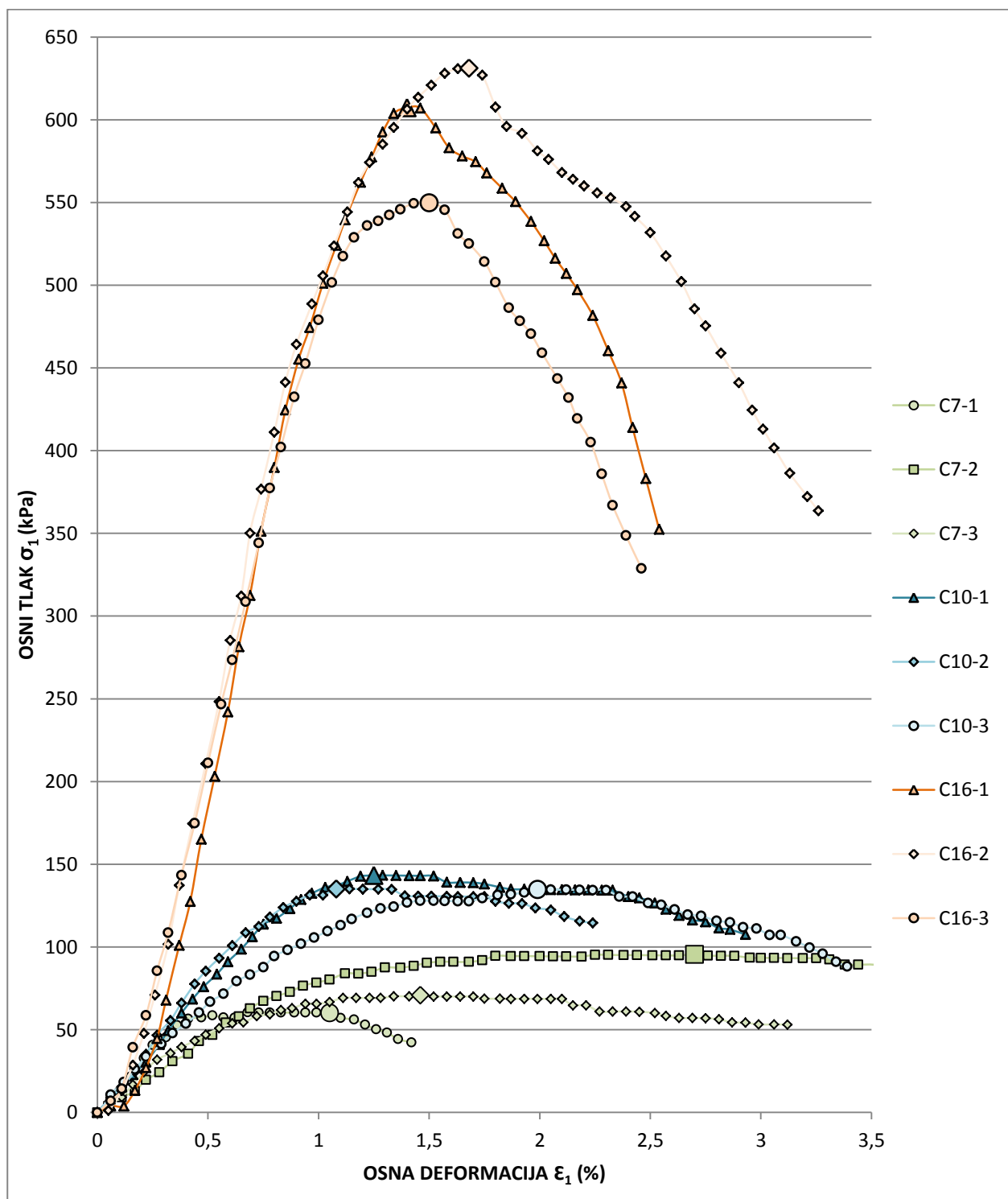
Pri stabilizaciji z žganim apnom sem predpostavil nizko učinkovanje, saj pucolansko reakcijo zavirajo organske kisline v zemljini, kar sem potrdil z rezultati, saj so povprečne trdnosti

mešanic A7, A9 in A11 relativno nizke (po 28 dneh 75, 79 in 97 kPa in po 91 dneh hranjenja 90, 98 in 114 kPa).

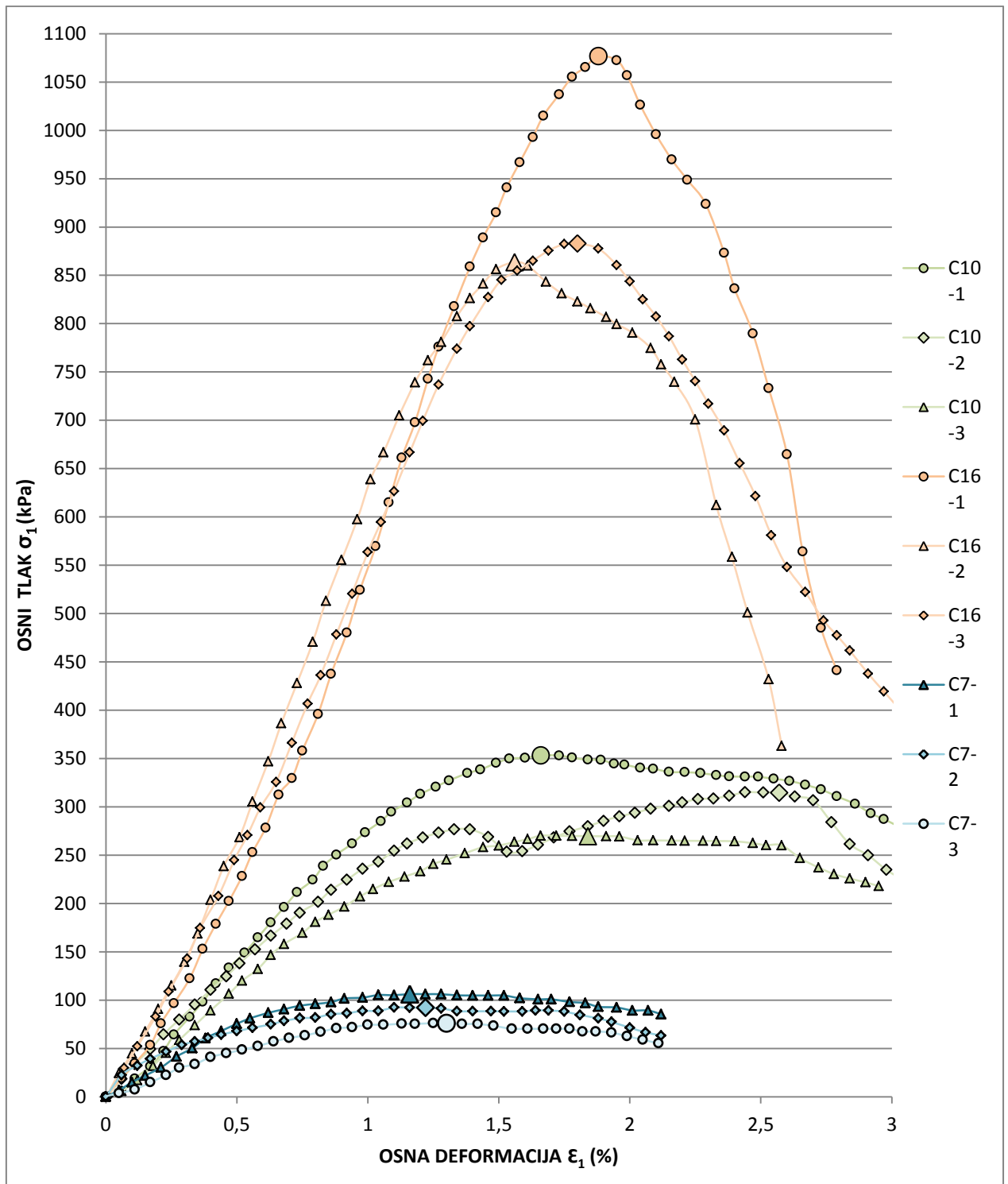
Povprečen prirastek vrednosti  $q_u$  po 91 dneh hranjenja glede na vrednost  $q_u$  po 28 dneh hranjenja znaša 21 odstotkov, kar je bistveno manj od navedb Janza (2002), po katerih bi moral biti prirastek 50-odstoten, kar nam potrjuje predvideno slabo učinkovanje živega apna.

#### 4.6.1.2 Cement, C II/B-V 42,5

- Poteki enoosnih tlačnih poskusov



Grafikon 9: Potekov enoosnih preskusov mešanic z različno vsebnostjo cementa; mešanice 1,00/C7/0,47, 1,00/C10/0,47 in 1,00/C16/0,47; po 28 dneh hranjenja



Grafikon 10: Potekov enosnih preskusov mešanic z različno vsebnostjo cementa; mešanice 1,00/C7/0,47, 1,00/C10/0,47 in 1,00/C16/0,47; po 91 dneh hranjenja

- **Rezultati enosnih tlačnih preiskav s povprečnimi vrednostmi**

Poteki enosnih tlačnih preiskav so prikazani na grafikonih 9,10,16 in 17.

Preglednica 36: Rezultati enosnih poskusov mešanic z različno vsebnostjo cementa; mešanica 1,00/C/0,47; po 28 dneh hranjenja.

CEMENT	q <sub>u</sub> (kPa)	ε (%)	POVPREČNE VREDNOSTI		W <sub>zač</sub>	W <sub>kon</sub>	SPREMEMBA VLAGE	γ (Mg/m <sup>3</sup> )
			q <sub>u</sub> (kPa)	ε				
C7-1	60	1,05%	76	1,73%	47,0%	49,6%	ΔW *(-1)	1,73
C7-2	96	2,70%			47,0%	49,0%		1,66
C7-3	71	1,46%			47,0%	49,7%		1,71
C10-1	143	1,25%	138	1,44%	47,0%	47,4%	-1,00%	1,72
C10-2	135	1,08%			47,0%	48,1%		1,70
C10-3	135	1,99%			47,0%	48,5%		1,71
C13-1	379	1,52%	365	1,39%	47,0%	45,0%	1,80%	1,68
C13-2	396	1,36%			47,0%	45,4%		1,73
C13-3	319	1,29%			47,0%	45,2%		1,73
C16-1	607	1,40%	596	1,53%	47,0%	41,8%	4,90%	1,75
C16-2	631	1,68%			47,0%	41,6%		1,76
C16-3	550	1,50%			47,0%	42,9%		1,74

Preglednica 37: Rezultati enoosnih poskusov mešanic z različno vsebnostjo cementa; mešanica 1,00/C/0,47; po 91 dneh hranjenja.

APNO	q <sub>u</sub> (kPa)	ε (%)	POVPREČNE VREDNOSTI		W <sub>zač</sub>	W <sub>kon</sub>	SPREMEMBA VLAGE	Y (Mg/m <sup>3</sup> )
			q <sub>u</sub> (kPa)	ε				
C7-1	106	1,16%			47,0%	43,6%	ΔW*(-1)	1,69
C7-2	92	1,22%	91	1,23%	47,0%	45,9%	2,10%	1,66
C7-3	76	1,30%			47,0%	45,2%		1,71
C10-1	353	1,66%	313	2,02%	47,0%	40,7%		5,80%
C10-2	315	2,57%			47,0%	41,7%	1,72	
C10-3	270	1,84%			47,0%	41,2%	1,73	
C13-1	520	1,55%	532	1,62%	47,0%	37,8%	6,77%	1,74
C13-2	533	1,81%			47,0%	40,6%		1,75
C13-3	543	1,51%			47,0%	42,3%		1,71
C16-1	1077	1,88%	941	1,75%	47,0%	34,4%	12,50%	1,74
C16-2	864	1,56%			47,0%	34,9%		1,75
C16-3	883	1,80%			47,0%	34,2%		1,73

#### • Analiza rezultatov

Pričakovana je bistveno višja stopnja prirastka trdnosti v primerjavi z apnom pri primerljivih vsebnostih veziva. Dobro učinkovanje je predvideno pri višjih vsebnostih cementa, saj je pri stabiliziranju organskih zemljin običajno potrebna višja vsebnost cementa. Vsebnost veziva se za dosego enake stopnje učinkovanja večja z večanjem vsebnosti glinenih delcev.

Zaradi slabe učinkovitosti mešanja zemljine s 7 in 10 odstotki cementa je v razpravo vključen le časovni prirastek trdnosti z višjimi vsebnostmi cementa.

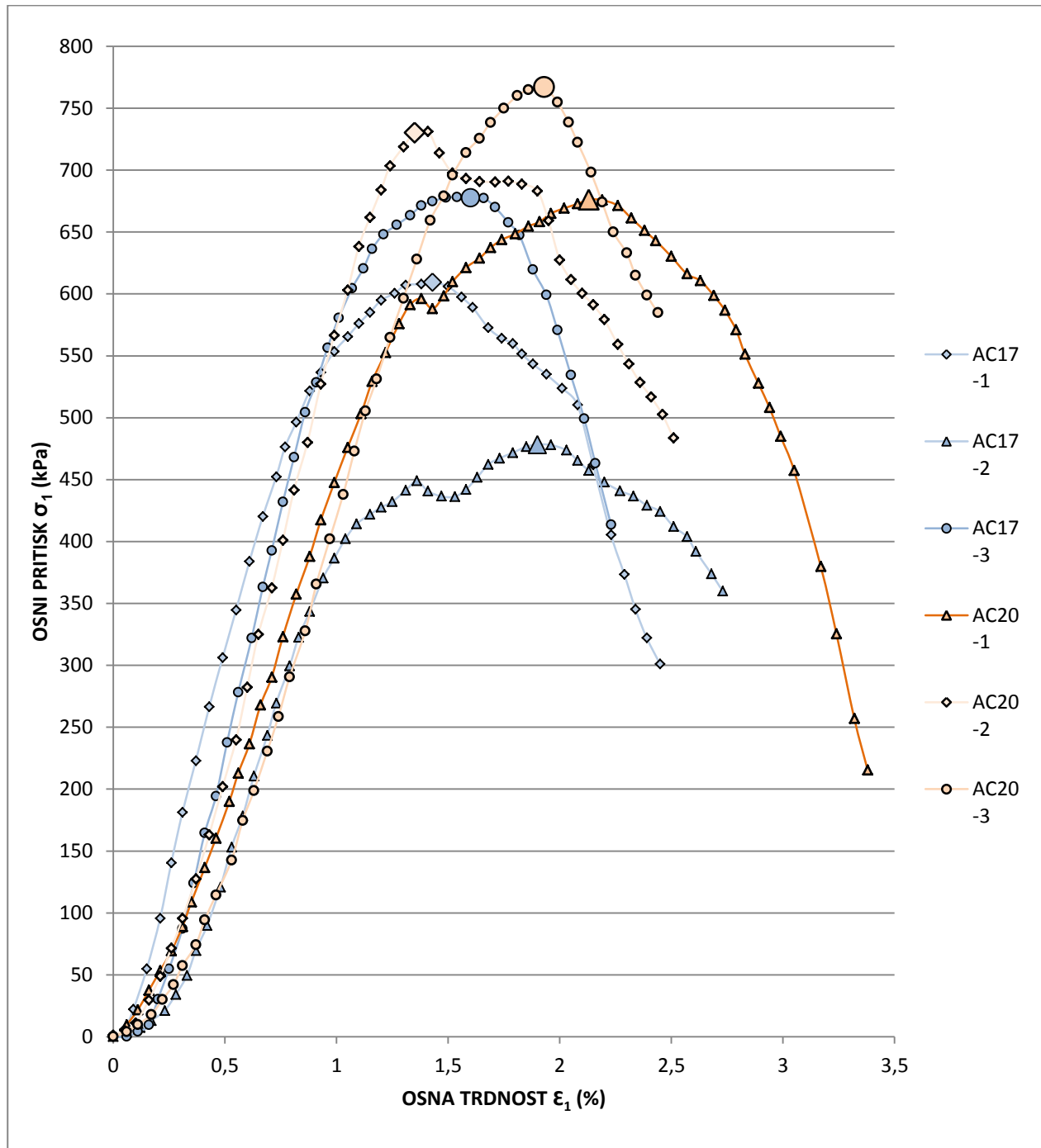
Povprečen prirastek vrednosti q<sub>u</sub> veziva C13 po 91 dneh hranjenja, glede na vrednost q<sub>u</sub> po 28 dneh hranjenja, je 46-odstoten in prirastek z vezivom C16 58-odstoten, kar v povprečju pomeni 52-odstotno zvišanje, kar je bistveno večje od vrednosti Cement Deep Mixing Association of Japan (1994), ki navaja 20- do 33-odstotno zvišanje.

Večji časovni prirastek lahko utemeljimo z navedbo Topolnicki (2004), da glinena zemljina pri stabilizaciji upočasnjuje pridobivanje na trdnosti. Kot je bilo ugotovljeno nam pri uporabi cementa z dodatkom pepela pri stabilizaciji organske zemljine, pepel poveča pridobivanje na dolgotrajni trdnosti, kot posledica pucolanske reakcije (glej poglavje 4.2.2). stabilizacij z navedbo Janza (2002), da dodatek elektrofilterskega pepela povečuje obseg pucolanske reakcije, kar učinkuje na dolgotrajno trdnost.

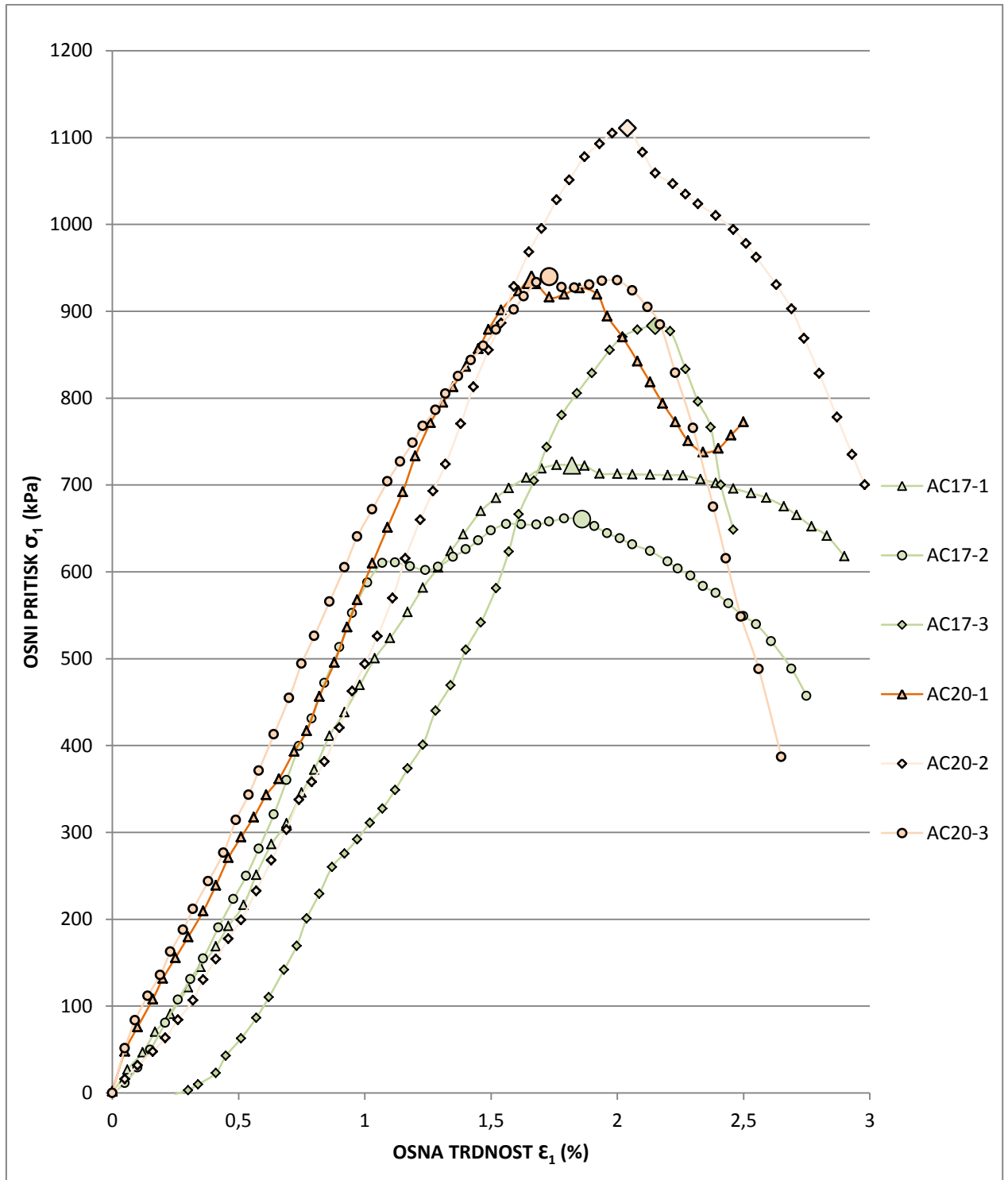


### 4.6.1.3 Žgano apno, CL 90 Q in cement C II/B-V 42,5 v masnem razmerju apno-cement 0,25/0,75

- Poteki enoosnih tlačnih poskusov



Grafikon 11: Potekov enoosnih preskusov mešanic z različno vsebnostjo apno cementa; mešanici 1,00/AC17/0,47 in 1,00/AC20/0,47; po 28 dneh hranjenja.



Grafikon 12: Potekov enosnih preskusov mešanic z različno vsebnostjo apno cementa; mešanici 1,00/AC17/0,47 in 1,00/AC20/0,47; po 91 dneih hranjenja

- **Rezultati enosnih tlačnih preiskav s povprečnimi vrednostmi**

Poteki enosnih tlačnih preiskav so prikazani na grafikonih 4, 5, 11,12, 18 in 19.

Preglednica 38: Podatki iz enoosnih poskusov mešanic z različno vsebnostjo apno cementa, mešanica 1,00/AC/0,47; po 28 dneh hranjenja.

APNO/CEMENT	q <sub>u</sub> (kPa)	ε (%)	POVPREČNE VREDNOSTI		W <sub>zač</sub>	W <sub>kon</sub>	SPREMEMBA VLAGE	γ (Mg/m <sup>3</sup> )
			q <sub>u</sub> (kPa)	ε				
AC11-1	254	1,70%	279	1,56%	47,0%	44,8%	ΔW *(-1) 2,20%	1,73
AC11-2	302	1,24%			47,0%	44,8%		1,75
AC11-3	280	1,74%			47,0%	44,8%		1,75
AC14-1	474	1,78%	458	1,74%	47,0%	42,0%	4,00%	1,76
AC14-2	453	1,52%			47,0%	42,8%		1,75
AC14-3	447	1,91%			47,0%	44,2%		1,75
AC17-1	610	1,43%	589	1,64%	47,0%	39,8%	7,13%	1,77
AC17-2	478	1,90%			47,0%	39,7%		1,77
AC17-3	678	1,60%			47,0%	40,1%		1,78
AC20-1	676	2,31%	724	1,80%	47,0%	39,3%	8,03%	1,78
AC20-2	730	1,35%			47,0%	39,2%		1,79
AC20-3	767	1,93%			47,0%	38,4%		1,79

Preglednica 39: Rezultati enoosnih poskusov mešanic z različno vsebnostjo apno cementa; mešanica 1,00/AC/0,47; po 91 dneh hranjenja.

APNO/CEMENT		q <sub>u</sub> (kPa)	ε (%)	POVPREČNE VREDNOSTI		W <sub>zač</sub>	W <sub>kon</sub>	SPREMEMBA VLAGE	Y (Mg/m <sup>3</sup> )
				q <sub>u</sub> (kPa)	ε			ΔW*(-1)	
AC11-1		555	1,88%	494	1,84%	47,0%	39,4%	7,20%	1,73
AC11-2		512	1,52%			47,00%	39,60%		1,75
AC11-3		414	2,12%			47,00%	40,40%		1,75
AC14-1		477	1,84%	564	1,74%	47,00%	37,40%	10,70%	1,76
AC14-2		580	1,47%			47,00%	35,30%		1,75
AC14-3		635	1,91%			47,00%	36,20%		1,75
AC17-1		723	1,82%	756	1,84%	47,00%	37,40%	10,67%	1,77
AC17-2		661	1,86%			47,00%	36,10%		1,77
AC17-3		883	1,84%			47,00%	35,50%		1,78
AC20-1		937	1,66%	996	1,81%	47,00%	33,10%	13,33%	1,78
AC20-2		1111	2,04%			47,00%	33,30%		1,79
AC20-3		940	1,73%			47,00%	34,60%		1,79

- **Analiza rezultatov**

Pričakovana je višja stopnja prirastka trdnosti v primerjavi z apnom in nižja stopnja prirastka trdnosti v primerjavi s primerljivimi vsebnostmi cementa.

Pričakovana je višja stopnja prirastka trdnosti v primerjavi z apnom in nižja stopnja prirastka trdnosti v primerjavi s primerljivimi vsebnostmi cementa.

Izbira masnega razmerja nam je potrdila negativen vpliv apna na stabiliziranje, izbrano je bilo masno razmerje apno-cementa 0,25/0,75. Prednost apno-cementa v primerjavi s cementnim stabiliziranjem je v boljši prepustnosti zemljine in boljši povezanosti kola in okoliške zemljine.

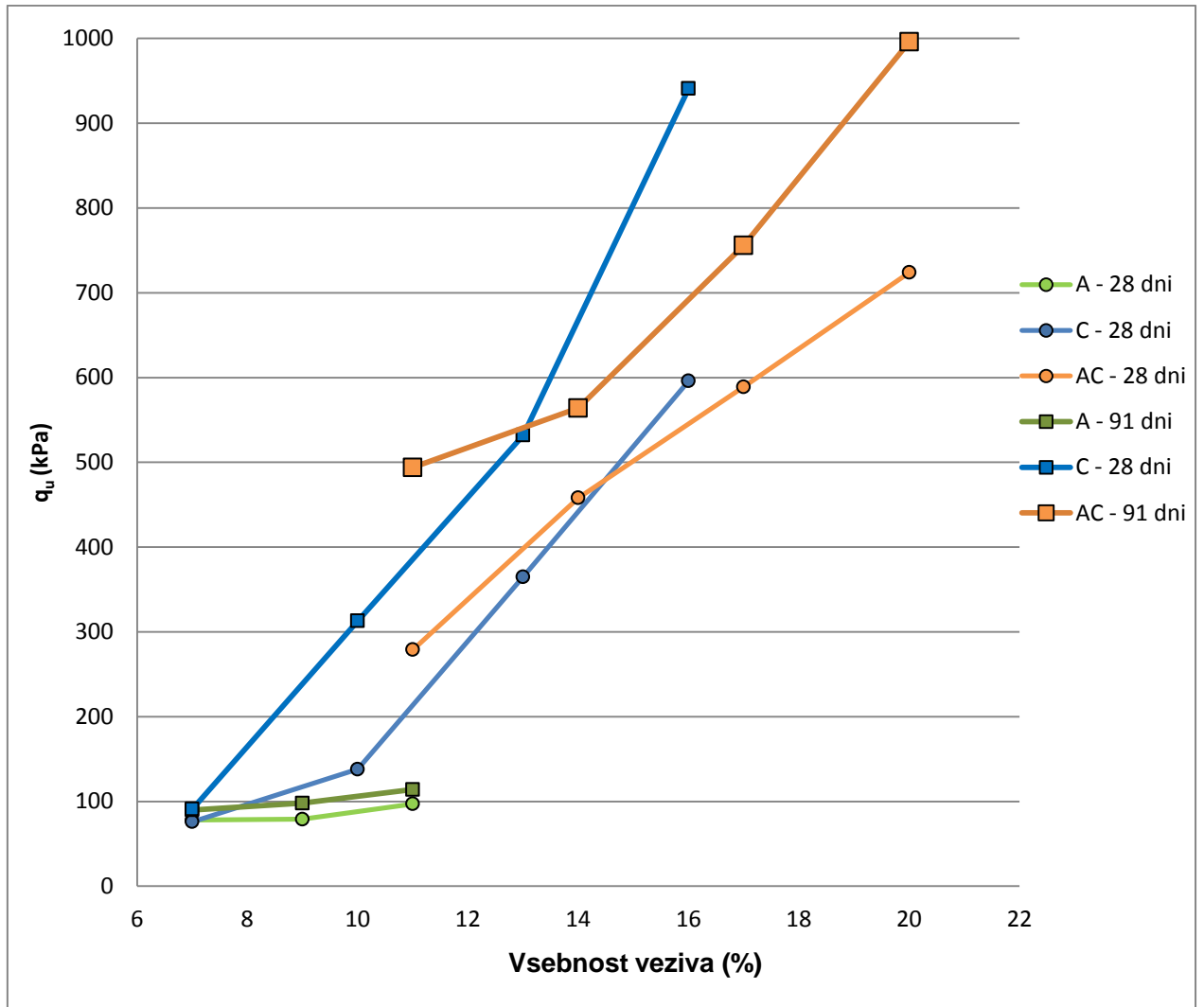
#### 4.6.2 Analiza povprečnih rezultatov mešanic z različnimi vrstami veziv pri različnih vsebnostih

- **Rezultati enoosnih tlačnih preiskav s povprečnimi vrednostmi**

Rezultate enoosnih tlačnih preiskav s povprečnimi vrednostmi prikazujeta preglednica 39 in grafikon 13.

*Preglednica 40: Povprečne vrednosti trdnosti in porušne deformacije pridobljene z enoosnimi preiskavami mešanic in primerjava vrednosti  $q_u$ ; po 28 in 91 dneh hranjenja*

VEZIVO			POVPREČNE VREDNOSTI PO 28 DNEH		POVPREČNE VREDNOSTI PO 91 DNEH		$q_{u,91} / q_{u,28}$
oznaka	tip	vsebnost (%)	$q_{u,28}$ (kPa)	$\epsilon$ (%)	$q_{u,91}$ (kPa)	$\epsilon$ (%)	
A7	A	7	75	2,11	90	1,72	1,20
A9	A	9	79	2,53	98	0,96	1,24
A11	A	11	97	2,96	114	1,39	1,18
C7	C	7	76	1,73	91	1,23	1,20
C10	C	10	138	1,44	313	2,02	2,27
C13	C	13	365	1,39	532	1,62	1,46
C16	C	16	596	1,53	941	1,75	1,58
AC11	AC	11	279	1,56	494	1,84	1,77
AC14	AC	14	458	1,74	564	1,74	1,23
AC17	AC	17	589	1,64	756	1,84	1,28
AC20	AC	20	724	1,80	996	1,81	1,38



Grafikon 13: Rezultati povprečnih vrednosti doseženih  $q_u$  posameznih vsebnosti veziv; mešanica 1,00/vezivo/0,47); po 21 in po 91 dneh.

Pri nižjih vsebnostih veziva se dodatno izkaže večja učinkovitost AC, saj pri vsebnosti 11 % doseže povprečno  $q_u$  279 kPa po 28 dneh in vrednost 494 kPa po 91 dneh, medtem ko je pri C z 10% vsebnosti vrednost bistveno manjša in sicer 138 kPa po 28 dneh in 313 kPa po 91 dneh. Takšno razliko bi lahko prepisali kratkotrajnemu učinku apna, saj se je vsebnost vode v mešanici z AC in zemljino zmanjšala za 2,20 % po 28 dneh in za 7,20 % po 91 dneh, medtem ko se je vsebnost vode v cementni mešanici povišala za 1,00 % po 28 dneh in zmanjšala za 5,80 % po 91 dneh.

Pri nižjih vsebnostih veziva se dodatno izkaže večja učinkovitost AC, saj pri vsebnosti 11 odstotkov doseže povprečno  $q_u$  279 kPa po 28 dneh in vrednost 494 kPa po 91 dneh, medtem ko je pri C z 10 odstotki vsebnosti vrednost bistveno manjša, in sicer 138 kPa po 28 dneh in 313 kPa po 91 dneh. Takšno razliko bi lahko pripisali kratkotrajnemu učinku apna, saj se je vsebnost vode v mešanici z AC in zemljino zmanjšala za 2,20 odstotka po 28 dneh in za 7,20 odstotka po 91 dneh, medtem ko se je vsebnost vode v cementni mešanici povišala za 1,00 odstotek po 28 dneh in zmanjšala za 5,80 odstotka po 91 dneh.

Apno in nižje vsebnost AC (AC11) in C (C7,C10) se izkažejo za slabše stabilizatorje in niso vključeni v nadaljnje komentarje.

Povprečne vrednosti preiskav po 28 dneh, nam kažejo na primerljivo učinkovanja AC in C. Pri primerljivi vsebnosti je vrednost  $q_u$  pri AC14 = 458 kPa in C13 = 365 kPa, kar pomeni 26 odstotkov manjšo učinkovitost C13 v primerjavi z AC14;  $q_u$  pri AC17 = 589 kPa in C16 = 596 kPa, kar interpretiramo kot boljše učinkovanje cementa pri višjih vsebnostih.

Povprečne vrednosti preiskav po 91 dneh kažejo na boljše učinkovanje C v primerjavi s AC, z upoštevanjem vsebnosti in dosežene povprečne vrednosti  $q_u$ . Pri primerljivi vsebnosti veziva je vrednost  $q_u$  pri AC14 = 564 kPa in C13 = 532 kPa, kar pomeni le za šest odstotkov manjšo učinkovitost C13 v primerjavi z AC14;  $q_u$  pri AC17 = 756 kPa in C16 = 941 kPa, kar pomeni za 25 odstotkov boljše učinkovitost C16 v primerjavi z AC17.

V primerjavi z izbranimi vrednostmi zvišanja (C13, C16, AC14, AC17)  $q_{u,91}$  na  $q_{u,28}$  stabiliziranja s cementom (52-odstotno zvišanje) je stabiliziranje z apno-cementom (26-odstotno zvišanje) stabiliziranje doseglo nižje vrednosti zvišanja za 26 odstotkov.

Iz grafikona 13 je lepo razviden trend priraščanja trdnosti z večanjem količine veziva. Lepo se prikazuje neučinkovitost apna in višje priraščanje trdnosti z večanjem vsebnosti cementa v primerjavi z apneno-cementnim vezivom.

Po 28 dneh testiranja bi se lahko odločili za vezivo, in sicer pri višjih vsebnostih za cement (lahko bi raziskali tudi učinkovanje pri še višjih vsebnostih), pri nižjih vsebnostih boljše učinkovanje kaže apneno-cementno vezivo. To nam dodatno potrdijo preiskave po 91 dneh.

Zaključim lahko z ugotovitvijo, da je optimalno vezivo za stabiliziranje preiskovane zemljine pri vsebnostih, višjih od 14 odstotkov, cement C II/B-V in pri vsebnostih, manjših od 14 odstotkov, apneno-cementno vezivo (CL 90 Q; C II/B-V 42.5).

#### 4.6.3 Dodatne preiskave – vpliv hranjenja

Namen primerjave hranjenja je zajetje robnih možnih razmer in vzpostavitev korelacije trdnosti glede na način hranjenja.

Pri preizkušancih, hranjenih v zapečatenih razmerah ( $hr_2$ ), predvidevam, glede na vzorce hranjene z dostopom do vode ( $hr_1$ ), bistveno večje dosežene trdnosti in nižjo vlažnost mešanic, kar je tesno povezano. Vlažnost nam pomembno vpliva na pridobitev trdnosti, višja vlažnost mešanice se odraža kot znižanju dosežene trdnosti. Pri hranjenju z dostopom vode na dnu je omogočeno srkanje vode in posledično višja vlažnost kot pri hranjenju v zapečatenih pogojih, saj nam zvišanje vlažnosti mešanice pri hranjenju  $hr_1$  kot posledica omogočena srkanja, kjer se pri stabilizaciji količina vode zmanjša, saj se pri reakcijah porablja tudi voda. Razmere na terenu omogočajo delno srkanje vode, odvisno od zgoščenosti (v odvisnosti od globine), torej lahko predvidevam, da sem z uporabljenima metodama hranjenja simuliral robne razmere omogočene spremembe vlažnosti mešanice pri izvedbi na terenu.

Vzrok testiranja je možna uporaba rezultatov pri korelaciji vrednosti laboratorijskih preiskav ( $q_{u,lab}$ ) in predvidenih vrednosti stabiliziranja na terenu ( $q_{u,ter}$ ), saj večina korelacij temelji na

merjenju trdnosti na preizkušancih, hranjenjih v zapečatenih razmerah, brez dostopa vode in zraka, kar je identično hranjenju  $hr_2$ .

Vpliv hranjenja je prikazan s primerjavo vrednosti enoosnih preiskav istih mešanic preizkušancev, hranjenih v različnih razmerah. Za namene preiskav so bili pripravljene dodatni vzorci pri vsebnosti celotne vode 47 odstotkov in z uporabo različnega veziva in sicer: apno-cementa 14 odstotkov (AC14) pri masnem razmerju apno cementa 0,25/0,75, cementa 13 odstotkov (C13) in apna 9 odstotkov (A9), ki so bili hranjeni brez dostopa vode in zraka (hranjenje  $hr_2$ ).

#### **4.6.3.1 Označevanje v grafikonih in preglednicah**

Preizkušanec in mešanica se označujeta po navodilih v poglavju 4.5.1.

Način hranjenja vzorcev označujemo za oznako preizkušanca, in sicer z rimsko številko v oklepaju:

- (I) označuje metodo hranjenja preizkušanca z dostopom do vode,
- (II) označuje metodo hranjenja preizkušanca v zapečatenih razmerah.

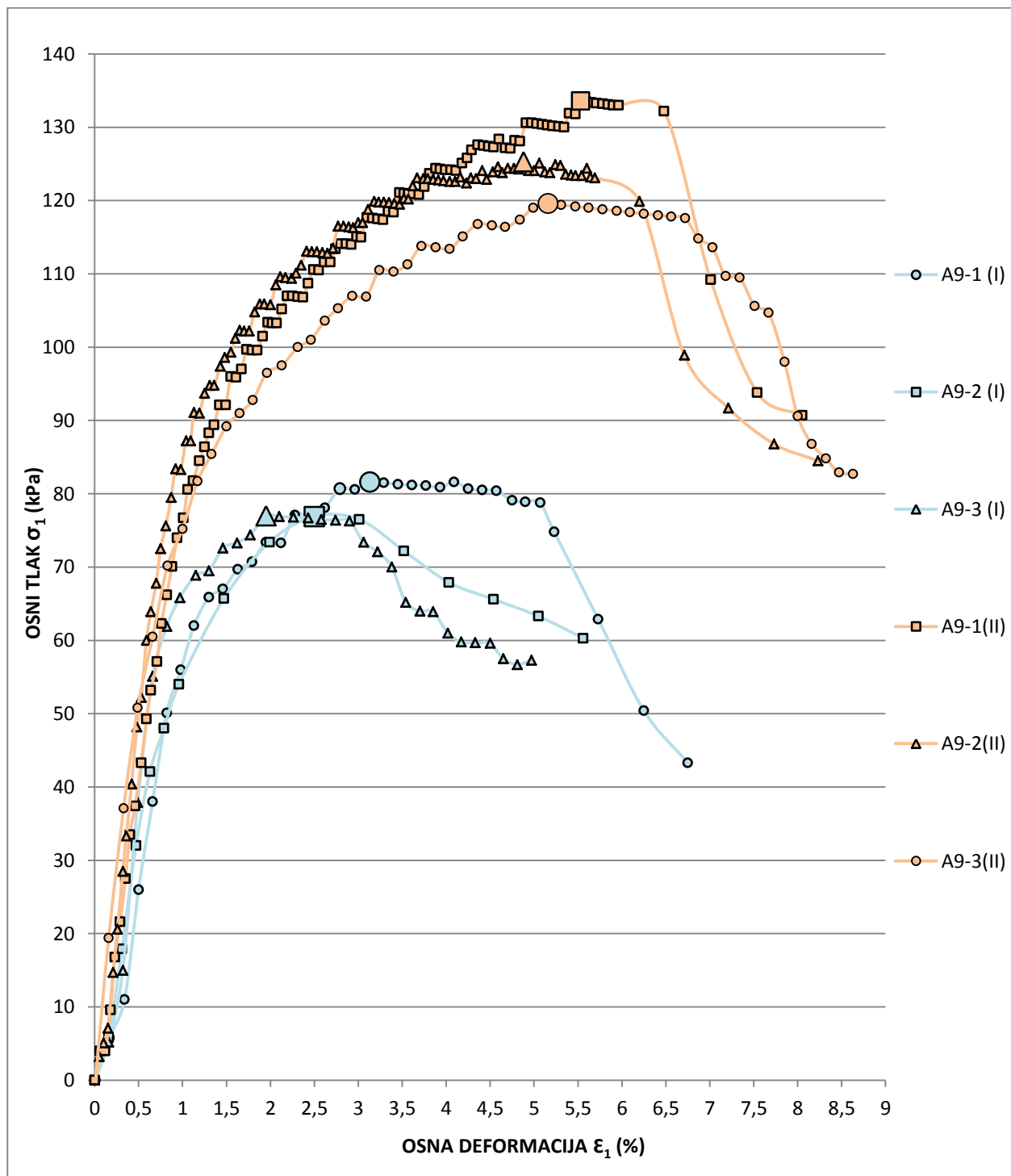
Primer: AC11-1(I): vezivo apno-cement z masnim razmerjem apno-cementa 0,25/0,75; 11 odstotkov veziva, glede na suho zemljino, zaporedna številka preizkušanca je 1,(I) označuje hranjenje vzorca z dostopom do vode na dnu preizkušanca.

V besedilu je metoda hranjenja označevana z  $hr_1$  (I) in  $hr_2$  (II), kot je opisano v poglavju 4.5.1.

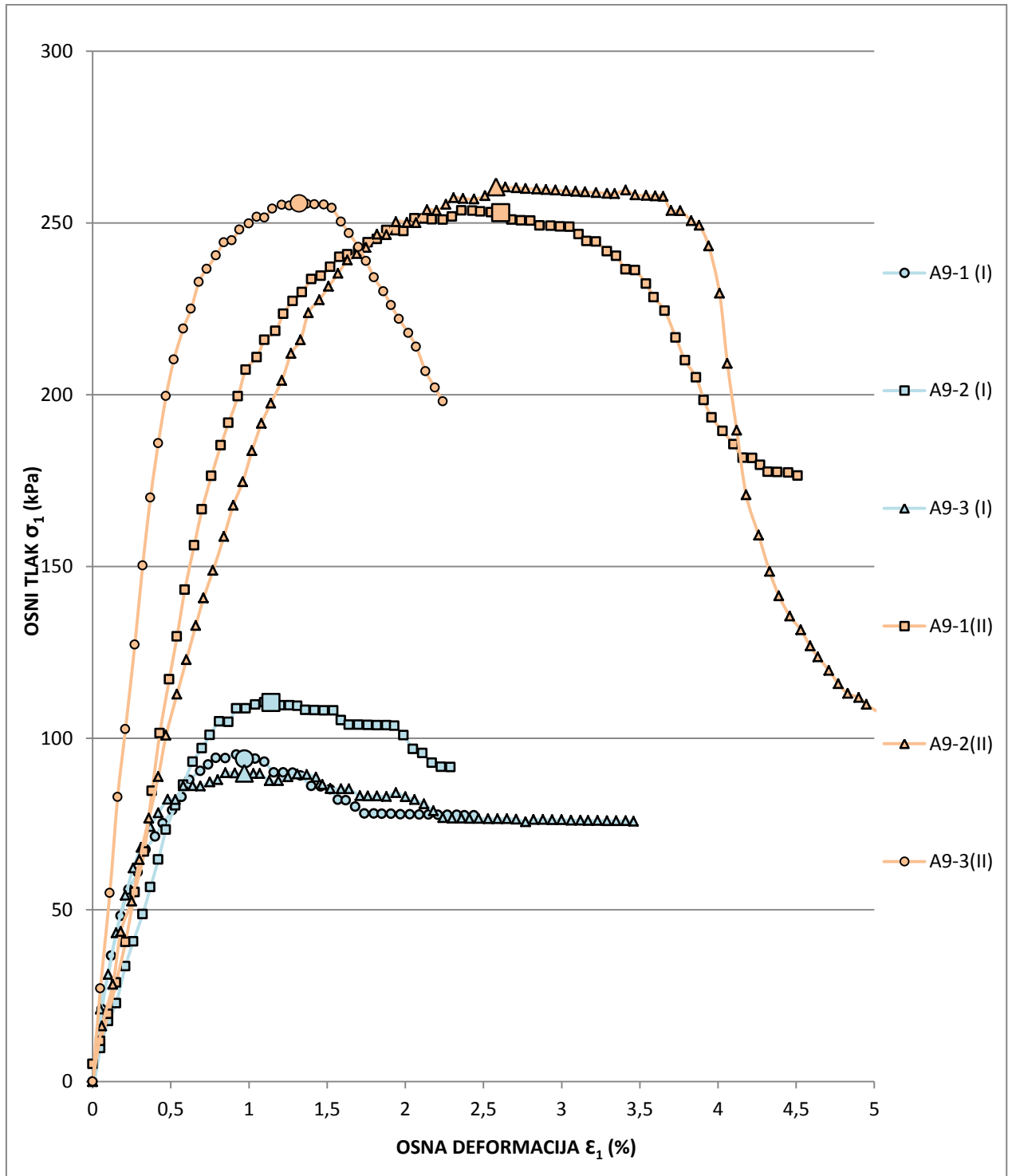


#### 4.6.3.2 Apno; CL 90 Q (A9)

- Poteki enoosnih tlačnih poskusov



Grafikon 14: Potek enoosnih preiskav mešanice z 9-odstotno vsebnostjo apna (CL 90 Q) pri različnem hranjenju, hranjenje z dostopom do vode na dnu vzorca ( $hr_1$ ), brez dostopa zraka in hranjenje brez dostopa vode in zraka ( $hr_2$ ); mešanica 1,00/A9/0,47; po 91 dneh hranjenja



Grafikon 15: Potek enosnih preiskav mešanice z 9-odstotno vsebnostjo apna (CL 90 Q) pri različnem hranjenju, hranjenje z dostopom do vode na dnu vzorca ( $hr_1$ ), brez dostopa zraka in hranjenje brez dostopa vode in zraka ( $hr_2$ ); mešanica 1,00/A9/0,47; po 91 dneh hranjenja

• **Rezultati enoosnih tlačnih preiskav s povprečnimi vrednostmi**

Preglednica 41: Rezultati enoosnih preiskav mešanice z 9-odstotno vsebnostjo apna (CL 90 Q) pri različnem hranjenju, hranjenje z dostopom do vode na dnu vzorca ( $hr_1$ ), brez dostopa zraka in hranjenje brez dostopa vode in zraka ( $hr_2$ ); mešanica 1,00/A9/0,47; po 28 in po 91 dneh hranjenja

	OZNAKA	$q_u$ (kPa)	$\epsilon$	POVPREČNE VREDNOSTI		$w_{zač}$	$w_{kon}$	SPREMEMBA VLAGE	$\gamma$ (Mg/m <sup>3</sup> )
VZORCI HRANJENI BREZ DOSTOPA DO ZRAKA IN VODE (II), PO 28 DNEH	A9-1 (II)	134	5,53%	$C_u$ (kPa)	$\epsilon$	47,0%	41,3%	$\Delta W^{*(-1)}$	1,75
	A9-2 (II)	125	4,88%	126	5,19%	47,0%	41,5%	5,50%	1,73
	A9-3 (II)	120	5,16%			47,0%	41,7%		1,71

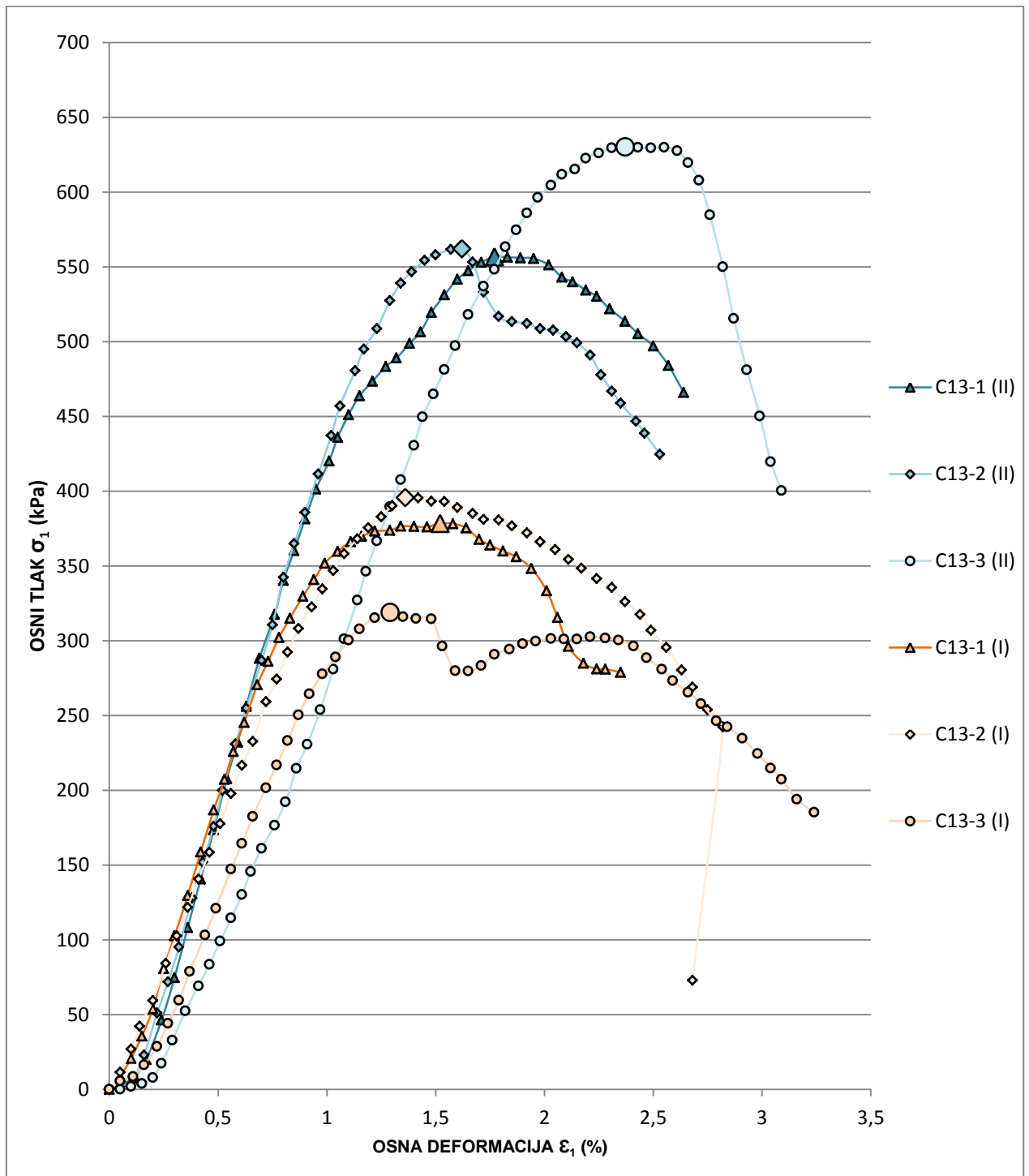
VZORCI HRANJENI Z DOSTOPOM DO VODE IN BREZ DOSTOPA ZRAKA (I), PO 28 DNEH	A9-1 (I)	82	3,13%	79	2,53%	47,0%	45,0%	2,10%	1,69
	A9-2 (I)	77	2,50%			47,0%	44,5%		1,77
	A9-3 (I)	77	1,95%			47,0%	45,2%		1,75

VZORCI HRANJENI BREZ DOSTOPA DO ZRAKA IN VODE (II), PO 91 DNEH	A9-1 (II)	253	2,61%	256	2,22%	47,0%	32,5%	14,00%	1,74
	A9-2 (II)	261	2,58%			47,0%	33,0%		1,77
	A9-3 (II)	255	1,48%			47,0%	33,5%		1,75

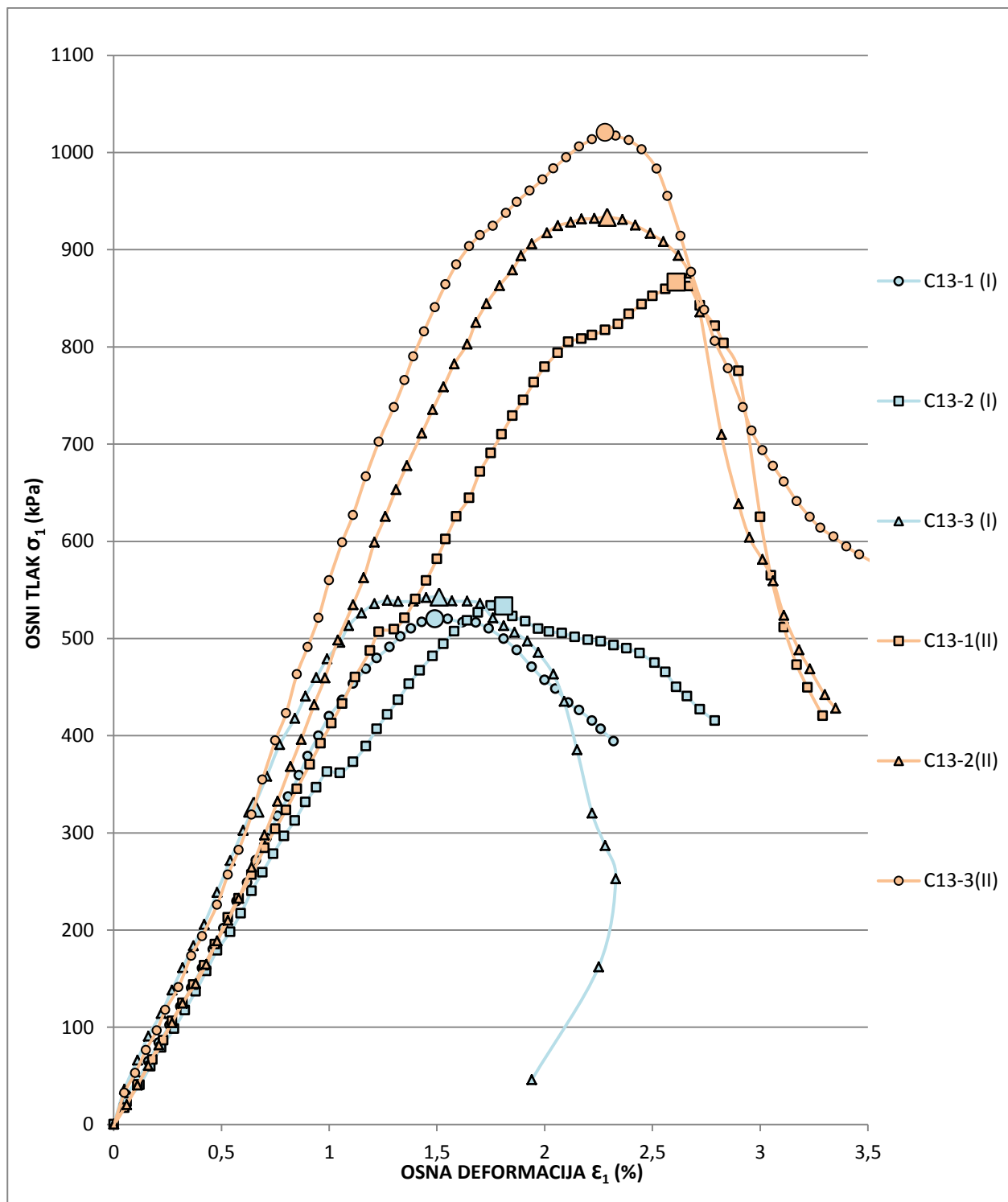
VZORCI HRANJENI Z DOSTOPOM DO VODE IN BREZ DOSTOPA ZRAKA (I), PO 91 DNEH	A9-1 (I)	95	0,92%	98	0,96%	47,0%	44,5%	2,57%	1,71
	A9-2 (I)	110	1,10%			47,0%	44,6%		1,73
	A9-3 (I)	90	0,85%			47,0%	44,2%		1,74

#### 4.6.3.3 Cement; C II/B-V 42.5 (13 %)

- Poteki enoosnih tlačnih poskusov



Grafikon 16: Potek enoosnih preiskav mešanice s 13-odstotno vsebnostjo cementa (C II/B-V 42.5) pri različnem hranjenju, hranjenje z dostopom do vode na dnu vzorca (I), brez dostopa zraka in hranjenje brez dostopa vode in zraka (II); mešanica 1,00/C13/0,47; po 28 dneh hranjenja



Grafikon 17: Potek enoosnih preiskav mešanice s 13-odstotno vsebnostjo cementa (C II/B-V 42.5) pri različnem hranjenju, hranjenje z dostopom do vode na dnu vzorca (I), brez dostopa zraka in hranjenje brez dostopa vode in zraka (II); mešanica 1,00/C13/0,47; po 91 dneh hranjenja

• **Rezultati enoosnih tlačnih preiskav s povprečnimi vrednostmi**

*Preglednica 42: Rezultati enoosnih preiskav mešanice s 13-odstotno vsebnostjo cementa (C II/B-V 42.5) pri različnem hranjenju, hranjenje z dostopom do vode na dnu vzorca (I), brez dostopa zraka in hranjenje brez dostopa vode in zraka (II); mešanica 1,00/C13/0,47; po 28 in po 91 dneh hranjenja.*

	OZNAKA	q <sub>u</sub> (kPa)	ε	POVPREČNE VREDNOSTI		W <sub>zač</sub>	W <sub>kon</sub>	SPREMEMBA VLAGE	Y(Mg/m <sup>3</sup> )
				C <sub>u</sub> (kPa)	ε				
VZORCI HRANJENI BREZ DOSTOPA DO ZRAKA IN VODE (II), PO 28 DNEH	C13-1 (II)	557	1,77%	583	1,92%	47,0%	39,0%	ΔW*(-1)	1,73
	C13-2 (II)	562	1,62%			47,0%	38,6%		
	C13-3 (II)	630	2,37%			47,0%	38,6%		

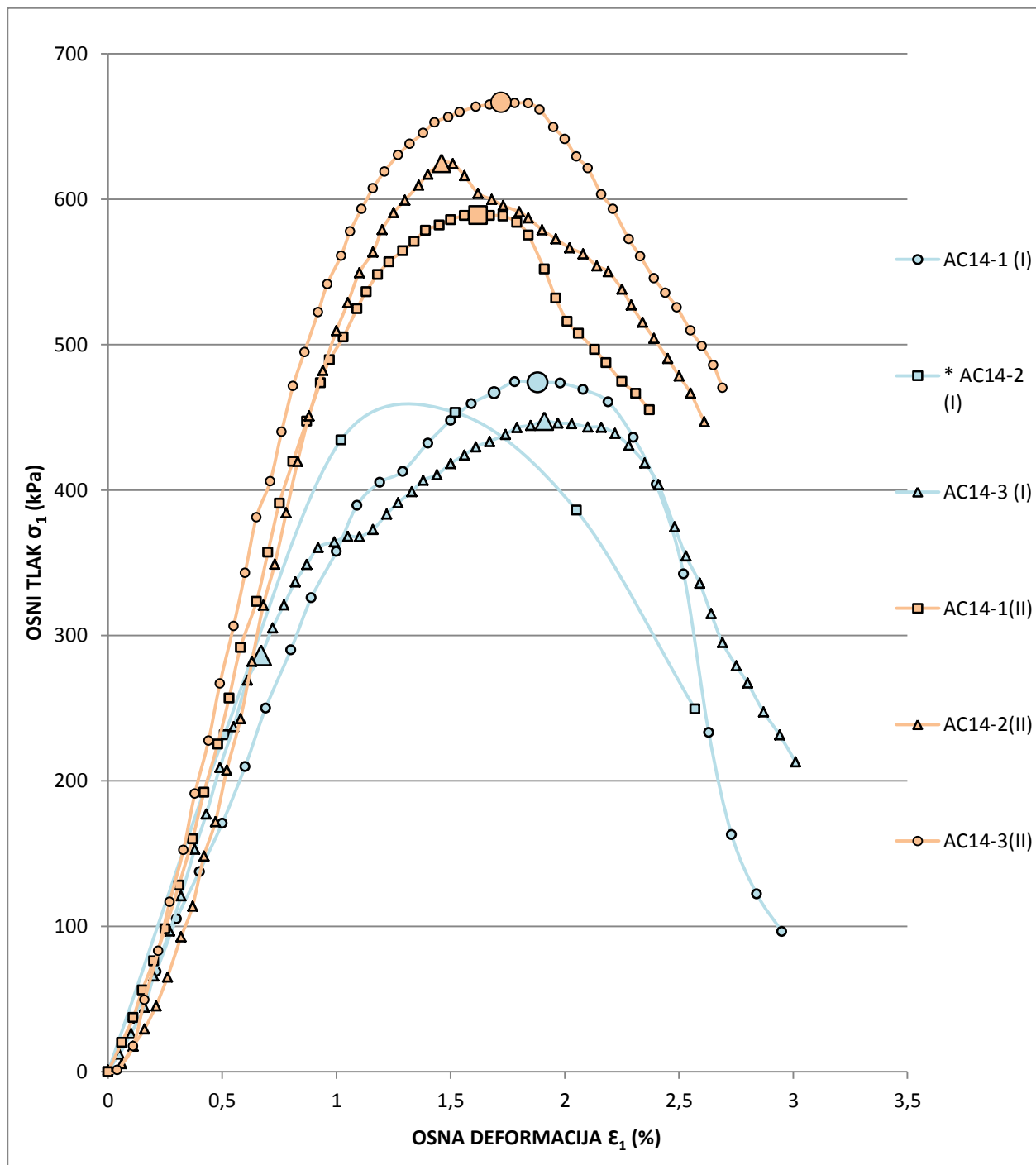
VZORCI HRANJENI Z DOSTOPOM DO VODE IN BREZ DOSTOPA ZRAKA (I), PO 28 DNEH	C13-1 (I)	379	1,52%	365	1,39%	47,0%	45,0%	1,80%	1,68
	C13-2 (I)	396	1,36%			47,0%	45,4%		1,73
	C13-3 (I)	319	1,29%			47,0%	45,2%		1,73

VZORCI HRANJENI BREZ DOSTOPA DO ZRAKA IN VODE (II), PO 91 DNEH	C13-1 (II)	867	2,61%	940	2,39%	47,0%	29,9%	16,87%	1,70
	C13-2 (II)	933	2,29%			47,0%	30,9%		1,72
	C13-3 (II)	1021	2,28%			47,0%	29,6%		1,74

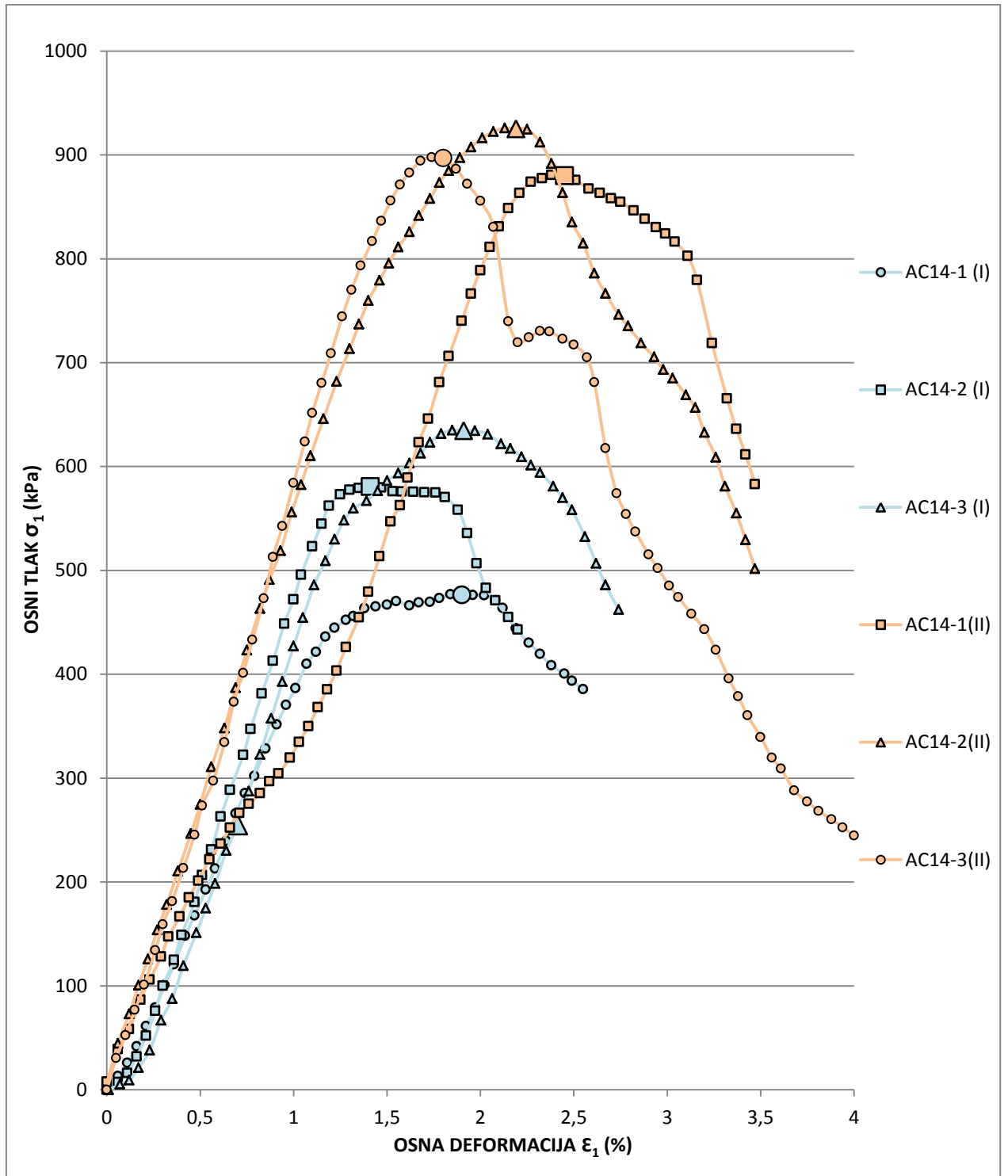
VZORCI HRANJENI Z DOSTOPOM DO VODE IN BREZ DOSTOPA ZRAKA (I), PO 91 DNEH	C13-1 (I)	520	1,55%	532	1,62%	47,0%	37,8%	6,77%	1,74
	C13-2 (I)	533	1,81%			47,0%	40,6%		1,75
	C13-3 (I)	543	1,51%			47,0%	42,3%		1,71

#### 4.6.3.4 Apno Cement; CL 90 Q, II/B-V 42.5 (14 odstotkov)

- Poteki enoosnih tlačnih poskusov



Grafikon 18: Potek enoosnih preiskav mešanice s 14-odstotno vsebnostjo apno (CL 90 Q) cementa (C II/B-V 42.5) v razmerju 0.25/0.75 pri različnem hranjenju: hranjenje z dostopom do vode na dnu vzorca (I), brez dostopa zraka in hranjenje brez dostopa vode in zraka (II); mešanica 1,00/C13/0,47; po 28 dneh hranjenja.



Grafikon 19: Potek enosnih preiskav mešanice s 14-odstotno vsebnostjo apno (CL 90 Q) cementa (C II/B-V 42.5) v razmerju 0.25/0.75 pri različnem hranjenju: hranjenje z dostopom do vode na dnu vzorca (I), brez dostopa zraka in hranjenje brez dostopa vode in zraka (II); mešanica 1,00/C14/0,47; po 91 dneh hranjenja.



• **Rezultati enoosnih tlačnih preiskav s povprečnimi vrednostmi**

*Preglednica 43: Podatki enoosnih preiskav mešanice s 14-odstotno vsebnostjo apno (CL 90 Q) cementa (C II/B-V 42.5) v razmerju 0.25/0.75 pri različnem hranjenju: hranjenje z dostopom do vode na dnu vzorca (I), brez dostopa zraka in hranjenje brez dostopa vode in zraka (II); mešanica 1,00/C14/0,47; po 28 in 91 dneh hranjenja.*

	OZNAKA	q <sub>u</sub> (kPa)	ε	POVPREČNE VREDNOSTI		w <sub>zač</sub>	w <sub>kon</sub>	SPREMEMBA VLAGE	γ (Mg/m <sup>3</sup> )
				C <sub>u</sub> (kPa)	ε				
VZORCI HRANJENI BREZ DOSTOPA DO ZRAKA IN VODE (II), PO 28 DNEH	AC14-1 (II)	589	1,62%	627	1,60%	47,0%	38,1%	8,83%	1,74
	AC14-2 (II)	625	1,46%			47,0%	38,0%		1,74
	AC14-3 (II)	667	1,72%			47,0%	38,4%		1,75

VZORCI HRANJENI Z DOSTOPOM DO VODE IN BREZ DOSTOPA ZRAKA (I), PO 28 DNEH	AC14-1 (I)	474	1,78%	458	1,74%	47,0%	42,0%	4,00%	1,76
	AC14-2 (I)	453	1,52%			47,0%	42,8%		1,75
	AC14-3 (I)	447	1,91%			47,0%	44,2%		1,75

VZORCI HRANJENI BREZ DOSTOPA DO ZRAKA IN VODE (II), PO 91 DNEH	AC14-1 (II)	881	2,38%	901	2,12%	47,0%	29,6%	16,33%	1,71
	AC14-2 (II)	925	2,19%			47,0%	29,6%		1,71
	AC14-3 (II)	897	1,80%			47,0%	32,8%		1,73

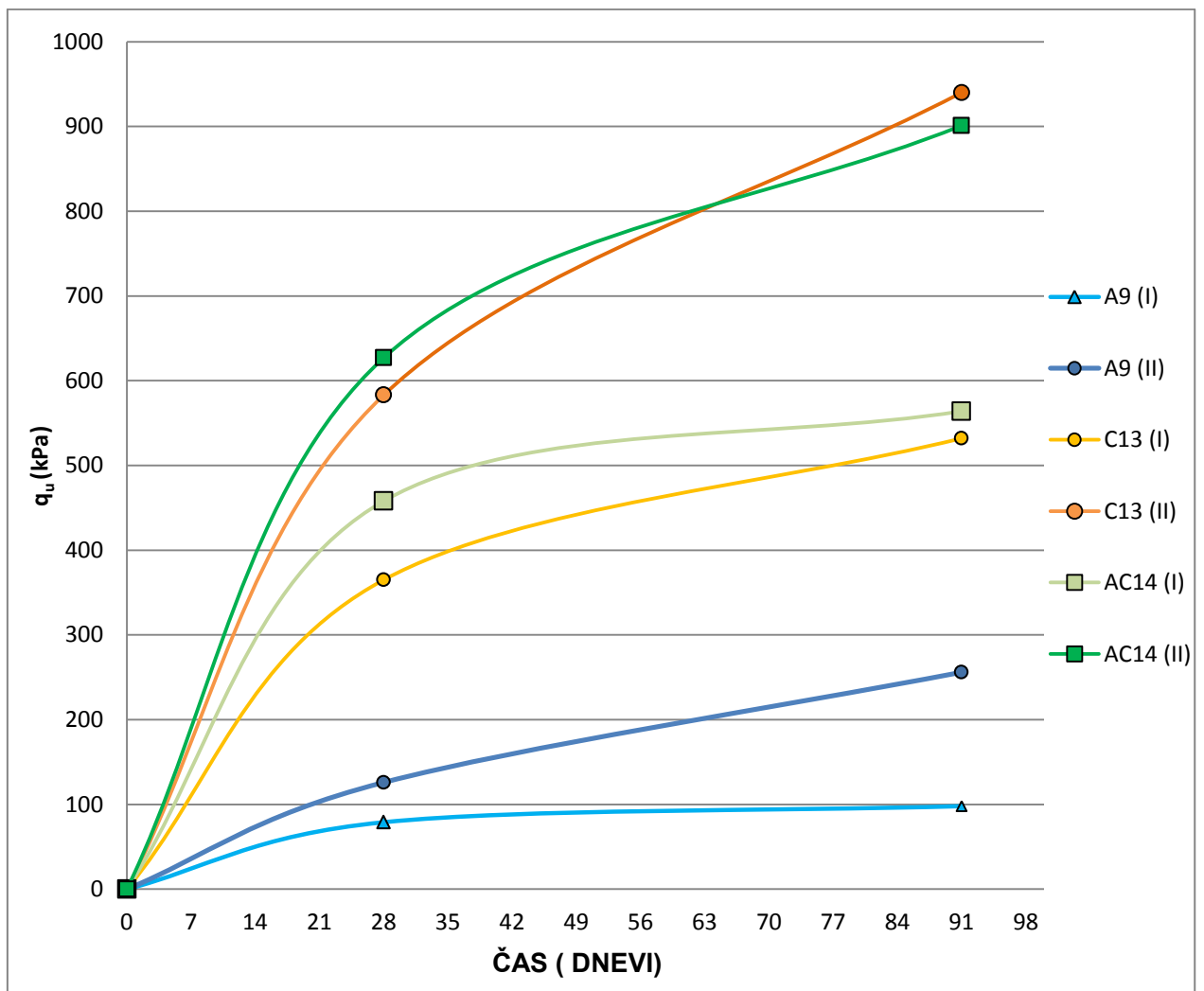
VZORCI HRANJENI Z DOSTOPOM DO VODE IN BREZ DOSTOPA ZRAKA (I), PO 91 DNEH	AC14-1 (I)	477	1,84%	564	1,74%	47,0%	37,4%	10,70%	1,74
	AC14-2 (I)	580	1,47%			47,0%	35,3%		1,77
	AC14-3 (I)	635	1,91%			47,0%	36,2%		1,74

**4.6.4 Analiza povprečnih rezultatov mešanic z različnimi vrstami veziv in vsebnosti in z različnim hranjenjem**

Kot posledica dokazane neprimernosti apnene stabilizacije (glej poglavje 4.6.4) v razpravo ni vključena analiza rezultatov mešanja z apnom.

Preglednica 44: Povprečne vrednosti  $q_u$  (kPa) mešanic A9, AC14 in C13; mešanic 1,00/A9/0,47, 1,00/AC14/0,47 in 1,00/C13/0,47; po 28 in po 91 dneh hranjenja.

VEZIVO	HRANJENI 28 DNI			HRANJENI 91 DNI		
	NAČIN HRANJENJA (I);	NAČIN HRANJENJA (II);	RAZMERJE (II)/(I)	NAČIN HRANJENJA (I);	NAČIN HRANJENJA (II);	RAZMERJE (II)/(I)
APNO (9%)	79	126	1,59	98	256	2,61
CEMENT (13%)	365	583	1,60	532	940	1,77
APNO CEMENT (14%)	458	627	1,37	564	901	1,60



Grafikon 20: Prikaz povprečnih vrednosti  $q_u$  mešanic A9, AC14 in C13; mešanice 1,00/A9/0,47, 1,00/AC14/0,47 in 1,00/C13/0,47; po 28 in po 91 dneh hranjenja.

Pri vsebnosti cementa 13 odstotkov je vrednost razmerja dosežene trdnosti pri različnem hranjenju II/I po 28 dneh 1,60. Pri AC je vrednost II/I po 28 dneh 1,37.

Razvidno je vpliv hranjenja na pridobljeno trdnost velik. Vsi preizkušanci, hranjeni v zapečatenih razmerah, so imeli nižjo vsebnost vode in so dosegali višjo trdnost, glede na hranjenje enakih preizkušancev z dostopom vode na dnu vzorca. S tem so potrjene domneve o večjem doseganju trdnosti pri manjši vsebnosti vode.

Če izrazimo zvišanje trdnosti po 28 dneh pri hranjenju  $hr_2$  (II), glede na hranjenje  $hr_1$  (II), dobimo sledeča razmerja trdnosti: po 28 dneh hranjenja pri AC14 = 1,37, pri C13 = 1,60 in pri A9 = 1,59; in po 91 dneh AC14 = 2,61; C13 = 1,77 in za A9 = 1,60.

Za uporabo so zanimive predvsem vrednosti razmerij trdnosti  $hr_2$  na  $hr_1$ , (II/I) po 28 dneh hranjenja, saj se za načrtovanje uporablja vrednost, pridobljena po 28 dneh.

Za natančne korelacije bi morali opraviti dodatne teste, vsekakor pa se iz rezultatov vidi trend razmerij med navedenima postopkoma hranjenja in jasno nakazuje vpliv vrste veziva. Vpliv količine veziva bi bilo treba še raziskati.

#### 4.6.5 Zaključki

Zaključim lahko, da je z analizo učinkovanja veziv v zemljini z znanimi lastnostmi možno načrtovati uporabo veziva (vrsto in količino) za optimalno učinkovanje.

Ugotovim lahko, da je z analizo učinkovanja veziv v zemljini z znanimi lastnostmi možno načrtovati uporabo veziva (vrsto in količino) za optimalno učinkovanje.

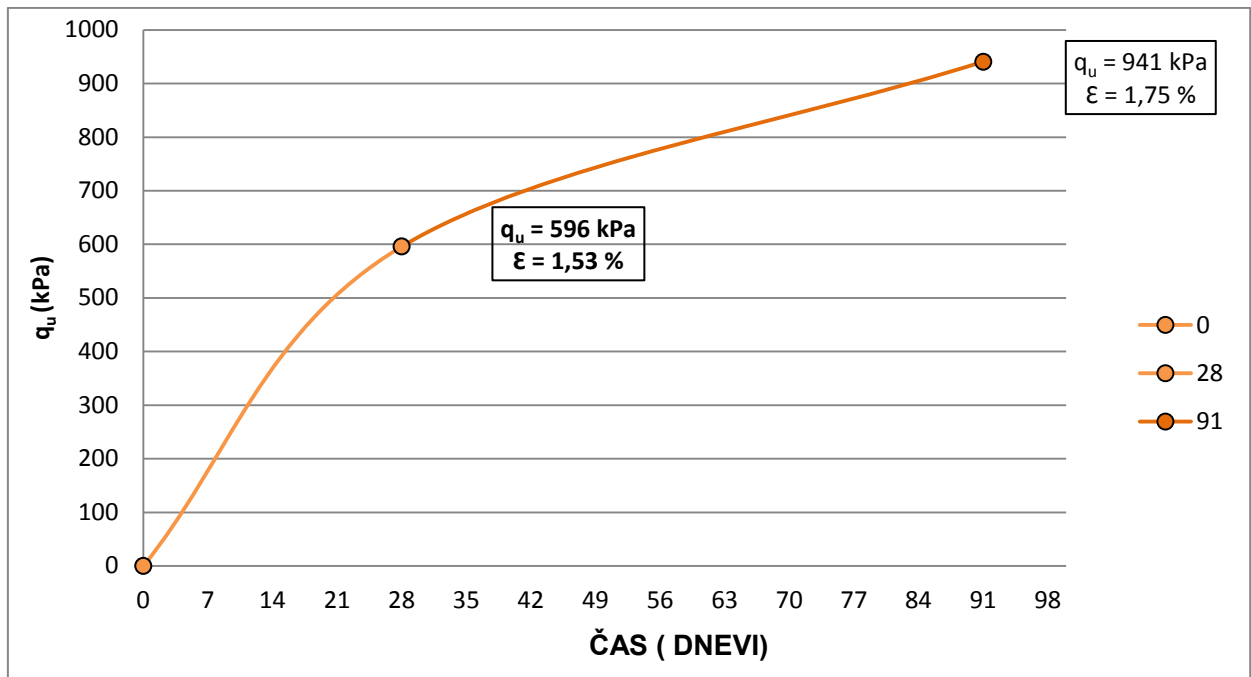
Organska zemljina predvidoma zmanjša učinkovanje apna v zemljini, zato v organskih zemljinah kot vezivo pretežno uporabljamo cement. Za doseganje enake stopnje trdnosti so v organskih zemljinah potrebne večje količine cementnega veziva.

Na podlagi zrnivosti sem predvideval učinkovitost stabiliziranja pri višjih vsebnostih veziva. Zaradi prisotnosti organskih snovi je predvidevano nizko učinkovanje žganega apna.

Obe predvidevanji sta z laboratorijskimi testi potrjeni. Za najučinkovitejše se je (glede na doseženo trdnost in vsebnost veziva) izkazalo stabiliziranje z dodatkom cementa C II/B-V 42,5 pri vsebnosti 16 odstotkov, glede na težo suhe zemljine. Stabiliziranje z apno-cementom se je izkazalo za manj učinkovito glede na cementno stabilizacijo, apneno stabiliziranje pa za neučinkovito.

Na podlagi predhodnih preskusov sem ugotovil, da izmed dveh uporabljenih vrst cementa (C II/B-V 42.5 in C II/B-P 42.5) bolje učinkuje cementno vezivo C II/B-V 42.5.

Pri uporabi apneno-cementnega veziva se je kot ustreznejše izkazalo razmerje A/C = 0,25/0,75 v primerjavi z razmerjem A/C = 0,50/0,50. Uporabljena sta bila apno CL 90 Q in cement C II/B-V 42.5.



Grafikon 21: Prikaz povprečnih doseženih trdnosti po času za mešanico s 16-odstotno vsebnostjo cementa C II/B-V 42,5 in vlažnostjo mešanice 47 odstotkov ; mešanica 1,00/0,16/0,47.

Pri izbiri korelacij za oceno predvidenih vrednosti na terenu je potrebo upoštevati vrednosti pridobljene po 28 dneh hranjenja.

#### 4.6.5.1 Priporočila za nadaljnje preiskave

V možnih nadaljnjih preiskavah bi priporočal hranjenje vzorcev brez dostopa do vode in zraka (zapečateni).

Tako hranjenje pomeni predvsem neposredno uporabo vrednosti doseženih trdnosti laboratorijskih vzorcev v predvidevanju vrednosti na terenu. S tem se zmanjša možnost napak pri dodatni korelaciji. Po drugi strani pa je primerjava obeh načinov hranjenja preizkušancev pokazala, da so preizkušanci, hranjeni z možnostjo dostopa vlage, dosegali primerljivo nižje vrednosti trdnosti od nepredušno zaprtih preizkušancev, podobno kot jih literatura navaja za razmerja med trdnostmi na terenu, glede na laboratorijske vrednosti. Zato bi bilo treba nadaljevati tudi take meritve v primerih, ko imamo možnosti vzporednih kontrolnih meritev na terenskih vzorcih.

Rezultati preiskav kažejo na potrebo po dodatnih preiskavah zemljine z višjimi vsebnostmi cementa. Možna je tudi uporaba drugih vrst cementa, npr. cement z dodatkom granularne plavžne žlindre, s katerim je predvideno ugodno učinkovanje.

Za možno uporabo metode mokrega mešanja so potrebne dodatne preiskave, kjer priporočam vsebnost celotne vode 64 odstotkov (utemeljitev v točki 4.3.2) in uporabo višjih vsebnosti cementa. Zavedati se je treba omejitev vodo-cementnega faktorja (glej 2.4).

#### **4.7 Ocena vrednosti mehanskih parametrov stabilizirane zemljine iz Luke Koper na podlagi rezultatov enoosnih tlačnih preiskav**

Za nadaljnjo uporabo je bilo treba iz laboratorijskih testov oceniti pričakovane vrednosti mehanskih lastnosti stabiliziranih zemljin na terenu. Najprej je bila ocenjena tlačna trdnost na terenu, na podlagi katere so bili ocenjeni tudi drugi parametri inženirskih lastnosti izvedbe na terenu.

Poglavje 4.7 prikazu principa ocene pričakovanih vrednosti osnovnih inženirskih parametrov stabiliziranih zemljin na terenu na podlagi enoosne tlačne trdnosti, kar je ključno za načrtovanje metode globinskega mešanja in nadaljnje primerjave z ostalimi metodami. Omenjene ocene se osredotočajo na stabiliziranje z apnom, cementom in apno-cementom. Ocene parametrov temeljijo na pričakovani ali doseženi trdnosti izvedenih kolov.

Vključen prikaz interpretacije rezultatov enoosnih preiskav. Interpretirani so rezultati laboratorijske mešanice zemljine, cementa C II/B-V 42.5 in vode v razmerju 1,00/0,16/ 0,47, glede na suho težo zemljine. Mešanica je označena z oznako C16. C16 je bila izbrana za prikaz na podlagi laboratorijskih preiskav stabilizirane zemljine (4.6).

Za nadaljnjo interpretacijo vrednosti je najprej potrebna ocena pričakovanih vrednosti na terenu, glede na vrednosti pridobljene na laboratorijsko pripravljenih vzorcih (odnos med laboratorijskimi in terenskimi vrednostmi trdnosti stabiliziranih zemljin je opisan v poglavju 4.7.2. Prikazana je ocena trdnosti mešanice C16.

Zatem so v poglavju 4.7.2, opisani osnovni principi načrtovanja metode globinskega mešanja.

##### **4.7.1 Ocena pričakovanih vrednosti $q_u$ na terenu za mešanico zemljina/cement (C II/B-V 42-5)/voda = 1.00/0.16/0.47**

Za realno oceno inženirskih parametrov (poglavje 4.7.1.3) je treba najprej oceniti pričakovano vrednost trdnosti stabilizirane zemljine na terenu. Prikazan je princip ocene za mešanico s 16 odstotki cementa C II/B-V 42,5 za postopek suhega mešanja. Ocena temelji na rezultatih enoosnih tlačnih preiskav laboratorijsko pripravljenih vzorcev.

Faktorjev, ki vplivajo na dosego končne trdnosti, je veliko: tehnologija mešanja, okoljski razmere, količina stabilizirane mase, ki generira toploto zaradi hidratacije, itd.

##### **4.7.1.1 Korelacija laboratorijskih in terenskih vrednost**

Zanesljivost korelacij je nizka, na eni strani zaradi že omenjenih odstopanj laboratorijskih rezultatov in še bolj zaradi zelo različnih tehnologij in postopkov izvedbe globinskega mešanja na terenu. Spodaj navedene korelacije so povzete iz različnih virov, bodisi kot priporočila ali kot dejanske izmerjene primerjave trdnosti.

Preglednica 45: Priporočene korelacije laboratorijskih in terenskih vrednosti tlačne trdnosti

AVTOR	KORELACIJA	VEZIVO
Cement Deep Mixing Association of Japan( 1994)	$q_{u(teren)} = (0,2 - 0,5) q_{u(lab)}$	Cementna pasta
EuroSoilStab (2002), Broms (2004)	$q_{u(teren)} = (0,2 - 0,5) q_{u(lab)}$	Cementna in apno-cement pasta
Dry Jet Deep Mixing Association of Japan( 1993)	$q_{u(teren)} = (0,25 - 0,33) q_{u(lab)}$	Suh cement
V. Bhadriraju, J. Puppala, S. Madhyannapu (2006)	$q_{u(teren)} = (0,67 - 0,86) q_{u(lab)}$	Cementna pasta

#### 4.7.1.2 Interpretacija trdnosti laboratorijskih preizkušancev

Pri večini korelacij (preglednica 45) med vrednostmi laboratorijsko pripravljenih vzorcev in predvidenimi vrednostmi na terenu so bile upoštevane laboratorijske vrednosti, dobljene na vzorcih, hranjenih brez dostopa vode in zraka, torej v zapečatenih razmerah.

Uporabljeni korekcijski faktor je bil ugotovljen na mešanici (C13) z vsebnostjo cementa 13 odstotkov, zemljina/(C II/B-V 42,5)/voda = 1,00/0,13/0,47, glede na suho maso zemljine. Razmerje doseženih trdnosti C13, hranjenih v zapečatenih razmerah, glede na uporabljeno hranjenje (brez dostopa do zraka, v stiku z vodo na dnu vzorca) je po 28 dneh 1,60 in po 91 dneh 1,77.

Preglednica 46: Podatki iz enosnih poskusov mešanic zemljina/(C II/B-V 42,5)/voda = 1,00/0,16/0,47

CEMENT 28 DNI	$q_u$ (kPa)	$\epsilon$ (%)	POVPREČNE VREDNOSTI		$W_{zač}$	$W_{kon}$	SPREMEMBA VLAGE	$\gamma$ (Mg/m <sup>3</sup> )
			$q_u$ (kPa)	$\epsilon$				
C16-1	607	1,40%	596	1,53%	47,0%	41,8%	4,90%	1,75
C16-2	631	1,68%			47,0%	41,6%		1,76
C16-3	550	1,50%			47,0%	42,9%		1,74
<b>CEMENT 91 DNI</b>								
C16-1	1077	1,88%	941	1,75%	47,0%	34,4%	12,50%	1,74
C16-2	864	1,56%			47,0%	34,9%		1,75
C16-3	883	1,80%			47,0%	34,2%		1,73

Podrobnejši rezultati preskusov so podani v grafikonih 9, 10 preglednicah 36, 37..

Pri večini korelacij (preglednica 44) med vrednostmi laboratorijsko pripravljenih vzorcev in predvidenimi vrednostmi na terenu so bile upoštevane laboratorijske vrednosti dobljene na vzorcih, hranjenih brez dostopa vode in zraka, torej v zapečatenih pogojih.

Uporabljeni korekcijski faktor je bil ugotovljen na mešanici (C13) z vsebnostjo cementa 13 odstotkov, zemljina/(C II/B-V 42.5)/voda = 1.00/0.13/0.47, glede na suho maso zemljine. Razmerje doseženih trdnosti C13, hranjenih v zapečatenih razmerah, glede na uporabljeno hranjenje (brez dostopa do zraka, v stiku z vodo na dnu vzorca) je po 28 dneh 1,60 in po 91 dneh 1,77.

To razmerje z zavedanjem možnega odstopanja privzamem tudi za interpretacijo rezultatov mešanice (C16) z vsebnostjo cementa 16 odstotkov (zemljina/(C II/B-V 42.5)/voda = 1.00/0.16/0.47). Prikaz predvidenih vrednosti, korigiranih z zgoraj utemeljenimi faktorji, je prikazan v spodnjem grafikonu.

Za oceno trdnosti mešanice s 16 odstotki cementa na terenu tako upoštevam ocenjene vrednosti:

$$q_{u,28} = 596 \text{ kPa} \times 1,60 = 954 \text{ kPa},$$

$$q_{u,91} = 956 \text{ kPa} \times 1,77 = 1666 \text{ kPa}.$$

Karakteristična vrednost  $q_u$ , upoštevana pri projektiranju za stabilizacijo zemljin s cementom in apno-cementom, je običajno dobljena na vzorcih, hranjenih 28 dni (Broms, 2004; EuroSoilStab, 2002; Porbaha, 2000 itd.). Vrednost, pridobljena po 91 dneh hranjenja, je namenjena potrditvi končne izbire veziva in oceni časovnega priraščanja trdnosti. Vrednost, pridobljena po 91 dneh, je upoštevana kot karakteristična vrednost za projektiranje pri stabiliziranju z apnom.

V nadaljevanju je za interpretacijo upoštevana predvidena vrednost mešanice C16 (zemljina/C/v = 1,00/0,16/0,47)  $q_{u,28} = 954 \text{ kPa}$ .

#### 4.7.1.3 Ocena pričakovane vrednosti enoosne tlačne trdnosti ( $q_{u,ter}$ ) na terenu

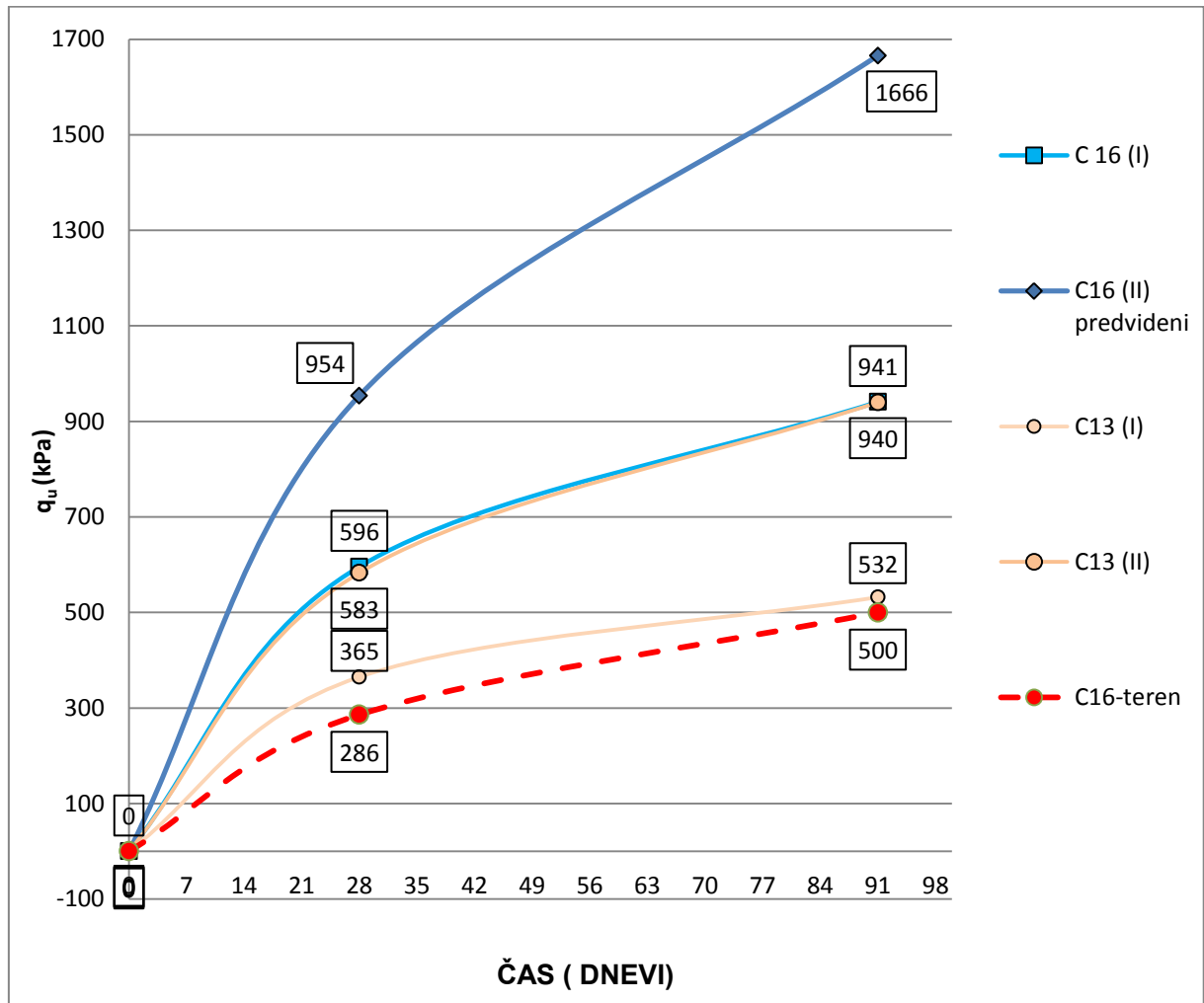
Pregled obstoječih korelacij med laboratorijskimi rezultati in pričakovanimi vrednostmi trdnosti na terenu je v poglavju 6.7. Interpretacijo izvajamo za tehnologijo suhega mešanja, v primeru mokrega mešanja bi upoštevali druge vrednosti korelacij.

Preglednica 47: Ocena pričakovane vrednosti  $q_u$  mešanice C16 in  $v = 47$  odstotkov

AVTOR	KORELACIJE	$q_{u,lab,28}$ korigirana vrednost	Pričakovana vrednost $q_{u,ter,28}$	$q_{u,ter,28} \cdot 0,30$
	$q_{u,ter} / q_{u,lab}$	(kPa)	(kPa)	(kPa)
Dry Jet Deep Mixing Association of Japan (1993)	0,25 – 0,33	954	239 - 315	<b>286</b>

Najbolj izkustveno podprt korekcijski faktor za metodo suhega mešanja je 0,25 do 0,33. Pri upoštevanju korekcijskih faktorjev je treba upoštevati način njihove določitve. V nadaljnjem računu bom v odsotnosti terenskih meritev na materialu iz Luke Koper upošteval za

korekcijo laboratorijskih trdnosti faktor 0,30 , kar je v mejah zgornje korekcije Dry Jet Deep Mixing Association of Japan (1993).



Grafikon 22: Prikaz dosežene trdnosti mešanic C16 (I), C13 (I), C13 (II) s časom: pričakovane vrednosti trdnosti C16 (II); C16-teren je grobo ocenjena vrednost tlačnih trdnosti na terenu; C16 (I) in C13(I) merjene vrednosti mešanic hranjeni z dostopom do vode

Za nadaljnjo interpretacijo je upoštevana pričakovana vrednost mešanice zemljina/(C II/B-V 42,5)/v = 1,00/0,16/0,47 na terenu:

$$q_{u,ter,28} = q_{u,lab,28} \times 0,30 = 286 \text{ kPa.}$$

#### 4.7.2 Ocene mehanskih lastnosti na terenu

##### 4.7.2.1 Ocena nedrenirane strižne trdnosti ( $T_u$ )

- **Enačbe za izračun**

Enačbe so prevzete po Broms (2004), Topolnicki (2004) in Kempfert (2006).



Pri spodnji enačbi je upoštevano naraščanje nedrenirane strižne trdnosti stabilizirane zemljine z naraščanjem normalnega tlaka:

$$\tau_u = c_u + \sigma \times \tan \varphi_u,$$

kjer je  $\Phi_u$  nedreniran kot notranjega trenja,  $c_u$  notranja kohezija (kPa) in  $\sigma$  normalen totalni tlak (kPa).

S predpostavko, da je kot notranjega trenja  $30^\circ$  lahko mejno notranjo nosilnost (trdnost) kola  $\sigma_{ult}$  izrazimo z enačbo:

$$\sigma_{ult} = 2 \times c_u + 3 \times \sigma_h,$$

kjer je  $\sigma_h$  horizontalni pritisk med zemljino in kolom.

Trdnost kolov na meji lezenja je običajno ocenjena na 65 odstotkov mejne nosilnosti. Tako lahko izrazimo maksimalno obtežbo na posamezen kol po enačbi:

$$q_{1,max} = 0,65 \times a \times \sigma_{ult},$$

kjer je  $a$  delež ploščine stabiliziranja.

- **Vrednosti**

Vrednost nedrenirane kohezije ( $c_u$ ), izračunamo iz predvidene vrednosti enoosnih trdnosti na terenu ( $q_{u,ter,28}$ ):

$$c_u = 0,5 \times q_{u,ter,28}.$$

Običajne vrednosti nedreniranega kota notranjega trenja ( $\Phi_u$ ) so pri apnenih in apneno-cementnih kolih  $\Phi_u = 30^\circ$  (Broms (2004), EuroSoilStab (2002) in Kempfert (2006)). To vrednost privzamemo tudi za cementne kole, kar je konzervativna ocena, saj literatura navaja večje  $\Phi_u$  pri cementnih kolih.

Deformacija pri poružitvi je običajno višja pri mokri kot pri suhi metodi. Prav tako je višja v organskih zemljinah. S časom se deformacija pri poružitvi znižuje  $\tau$  pa zvišuje (Broms, 2004). Z večanjem bočnega pritiska se deformacija pri poružitvi povečuje od 1,5 odstotka pri 50 kPa na 8 odstotkov pri 400 kPa (Terasagi; 1983).

Rezultati preiskav so ovrgli trditev Bromsa (2004) o znižanju deformacije pri poružitvi s časom za specifično zemljino, saj pri vseh mešanicah opazimo zvišanje deformacije pri poružitvi s časom (glej preglednice in grafikone v poglavju 4.6).

- **Izračun za mešanje s 16 % cementa (C II/B-V 42.5), suho mešanje**

Za uporabo pri načrtovanju je prikazan izračun vrednosti za stabiliziranje s 16 % dodatkom cementa C II/B-V 42,5.

Za uporabo pri načrtovanju je prikazan izračun vrednosti za stabiliziranje s 16-odstotnim dodatkom cementa C II/B-V 42,5.

Nedrenirana kohezija ( $c_u$ ):

$$q_{u,ter,28} = 286 \text{ kPa}$$

$$c_u = 143 \text{ kPa} = 0,5 \times q_{u,ter,28}$$

Nedrenirana strižna trdnost:

$$\tau_u = 143 \text{ kPa} + \sigma_h \times \tan 30^\circ = c_u + \sigma_h \times \tan \varphi_u.$$

Izberem vrednost  $\Phi_u = 30^\circ$

Mejna notranja nosilnost:

$$\sigma_{ult} = 277 \text{ kPa} + 3 \times \sigma_h = 2 \times c_u + 3 \times \sigma_h.$$

Trdnost kolov na meji lezenja:

$$q_{1,max} = 0,65 \times a \times \sigma_{ult}.$$

#### 4.7.2.2 Ocena modula stisljivosti (M)

Za oceno posedkov se uporablja modul stisljivosti, določen iz preiskav stisljivosti.

Za oceno posedkov se uporablja modul stisljivosti, določen iz preiskav stisljivosti.

Začetni modul stisljivosti M narašča linearno z večanjem prekonsolidacijskega tlaka (Broms, 2004, str. 266).

Modul stisljivosti, merjen na terenu ( $M_{kol}$ ), je do petkrat večji kot določen v laboratoriju ( $M_{lab}$ ). Razmerje modula stisljivosti (M) in nedrenirane kohezije ( $c_u$ ) na splošno narašča z naraščanjem nedrenirane strižne trdnosti ( $\tau_u$ ) (Broms, 2004).

- **Ocena vrednosti modula stisljivosti (M)**

*Preglednica 48: Priporočene korelacije za oceno modula stisljivosti*

AVTOR	M/*Cu	Vezivo	Opombe
Rogbeck in Trank (1995)	50–150	apno-cement	50 za organske zemljine 150 za meljne gline
Ekstrom (1992)	50–150	apno-cement	$c_u = 50–200$
	100–200	apno-cement	$c_u = 200–400$
	150–250	cement	$c_u = 150–250$
Hansom (1994)	70, 100	apno-cement	

Modul stisljivosti  $M_{o,lab}$ , določen s CBR-poskusom do  $p'_c$ , je 2 meseca po vgradnji značilno 40 MPa za cementne kole in 10 do 30 MPa za apno-cementne kole (Ekstrom, 1992).

Ahnberg (1995) je določila vrednost  $M_{o,lab}$  med 60- in 300-krat  $c_u$  do  $p'_c$ . Nižje vrednosti so bile zabeležene pri stabilizaciji z apnom in apnom ter mavcem.

Udin (1995) je po obsežnih preiskavah na zemljini Bangkok clay poročal o 12- do 19-krat povečani vrednosti koeficienta konsolidacije ( $C_v$ ), glede na začetno vrednost pri uporabi dodatka 15 – cementa.

- **Ocena vrednosti prekonsolidacijskega tlaka ( $p'_c$ )**

Enačba za izračun prekonsolidacijskega tlaka  $p'_c$ .

$$p'_c = f \times q_u,$$

kjer je  $f$  korekcijski faktor in je naveden v preglednici 48.

Preglednica 49: Priporočene vrednosti korekcijskega faktorja  $f$  za oceno  $p'_c$  (različni avtorji)

AVTOR	$f$	Vezivo	Opombe
Endo (1976)	1,37	C	"marine clay"
Sugiyama (1984); Kohata (1996)	1,2–1,7	C	
CMD Assotiation of Japan (1994)	1,27	C	
Broms (2004)	1,7	C, AC	
Ahnberg (1995)	0,8–1,6		
Terasagi in Tanaka(1983), Okumura in Terashi (1975)	1,3		

- **Izračun za mešanice s 16 % cementa (C II/B-V 42.5), suho mešanje**

Predvidena nedrenirana kohezija ( $c_u$ ) stabiliziranja z vmešavanjem 16 % cementa.

$$c_u = 143 \text{ kPa}$$

$$q_u = 286 \text{ kPa}$$

Na podlagi priporočil avtorjev sem se v oceni modula stisljivosti ( $M$ ) odločil za upoštevanje korelacije:

$$M = 150 \times c_u = 150 \times 143 \text{ kPa} = 21 \text{ MPa},$$

kar je v mejah navedenih korelacij Ekstroma (1992) in Ahnberga (1995). Za oceno posedkov lahko upoštevamo tudi navedbe Udina (1995).

Prekonsolidacijski tlak ( $p'_c$ ) je povezan z vrhunsko tlačno trdnostjo ( $q_u$  preko spodnje enačbe). Pri oceni vrednosti sem se odločil za upoštevanje približno srednje vrednosti predlaganih korelacij in sicer za faktor  $f = 1,30$ :

$$p'_c = f \times q_u = 1,30 \times 286 \text{ kPa} = 372 \text{ kPa}.$$

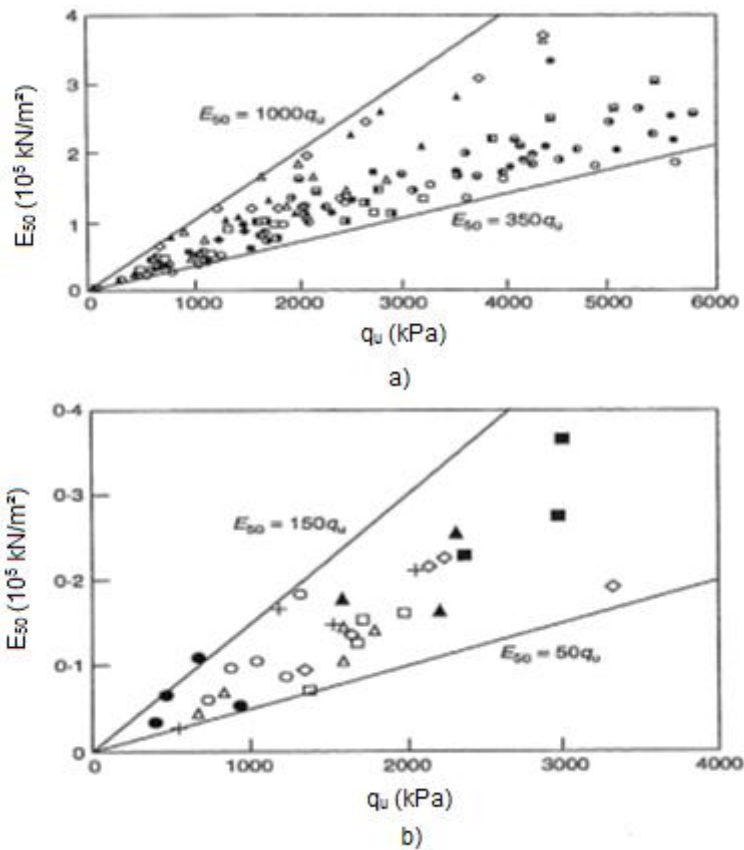
#### 4.7.2.3 Ocena modula elastičnosti ( $E_{50}$ )

Za oceno  $E_{50}$  je običajno navedeno razmerje  $E_{50}/c_u$ . Razmerje  $E_{50}/c_u$  je višje za cementne kot za apnene in apneno-cementne kole. To razmerje je bilo večje pri vzorcih, pridobljenih na terenu, kot pri vzorcih, pripravljenih v laboratoriju (Broms, 2004).

• **Priporočene vrednosti**

*Preglednica 50: Priporočene vrednosti modula elastičnosti ( $E_{50}$ ) različnih avtorjev*

AVTOR	MODUL ELASTIČNOSTI	VEZIVO	Opombe
Ekstrom (1994)	$150 \times c_u$	apno-cement	$\tau > 50$ kPa laboratorijsko pripravljene vzorci laboratorijsko pripravljene vzorci
	$130 \times c_u$	cement	
	$75 \times c_u$	apno	
	$200 \times c_u$	apno-cement, cement	
Baker (1997)	$125-175 \times c_u$	apno-cement	
Ansano (1996)	$70-250 \times c_u$	cement	
	$25-150 \times c_u$	cement-mavec-pepel	
Carlsten in Ekstrom	$200 \times c_u$	apno-cement	
	$250-300 \times c_u$	cement	
Saito (1980)	$175-500 \times c_u$	Portland cement (5-15 %),	
O'Rourke (1998), GeoTesting Express (1996)	$25-75 \times c_u$	cement	
Futaki (1996)	$50-125 \times c_u$	cement	
Goh (1999)	$75-200 \times c_u$	cement	



Slika 40: Razmerje vrhunske tlačne trdnosti  $q_u$  in modula elastičnosti  $E_{50}$ : a) Saito (1980); b) O'Rourke (1998)

Na Japonskem je modul elastičnosti običajno ocenjen s SPT do 0,7N v MPa, kjer je N odpornost vtiskanja v udarcih/0,3 m (Suzuku, 1996).

Ekstrom (1994) je ugotovil, da laboratorijski vzorci dajejo višje vrednosti  $E_{50}$  od ugotovljenih na terenu. Priporoča, da se  $E_{50}$  ne določa na laboratorijsko pripravljениh vzorcih.

- **Izračun za mešanice s 16 odstotki cementa (C II/B-V 42.5), suho mešanje**

Preglednica 51: Ocena modula elastičnosti mešanice s 16 odstotki cementa (C II/B-V 42,5)

AVTOR	MODUL ELASTIČNOSTI	VEZIVO	Predvidene vrednosti $E_{50}$ , mešanice C16
Ekstrom (1994)	$130 \times c_u$	cement	19 MPa
Ansano (1996)	$70-250 \times c_u$	cement	10-36 MPa
Futaki (1996)	$50-125 \times c_u$	cement	7-18 MPa
Goh (1999)	$75-200 \times c_u$	cement	11-29 MPa

Za oceno mešanja s cementom so upoštevane najpogosteje navedene vrednosti. Za korektno izbiro ocene bi bila potrebna natančna proučitev ozadja ugotovljenih korelacij.

Izbrana je ocena vrednosti elastičnega modula, ki je:

$$E_{50} = 11-18 \text{ MPa.}$$

#### 4.7.2.4 Ocene propustnosti (k)

Propustnost je pomemben faktor pri ugotavljanju vpliva stabilizacije. Vrednost je pogosto različna v laboratoriju kot na terenu, kjer razpoke in nepravilnosti narekujejo vrednost. Priporočljivo je vrednotenje iz merjenja presežnih pornih tlakov v kolih (Larsson, 2003).

Ocene predvidene propustnosti kolov stabilizirane zemljine ( $k_{stab}$ ) temeljijo večinoma na primerjavi propustnosti zemljine na terenu ( $k_{zem}$ ).

- **Priporočene vrednosti**

#### Apno

Glavna prednost stabiliziranja z apnom je visoka propustnost, kol deluje kot drenaža.

Propustnost laboratorijsko pripravljenih vzorcev je nizka, med 1,5- in 5-krat propustnost zemljine ( $k_{zem}$ ) (Ahnberg, 1994). Ekstrom (1992) navaja vrednost propustnosti na terenu, ki so 5- do 10-krat večje od propustnosti laboratorijskih vzorcev.

Ahnberg (1995) je ugotovil, da je propustnost višja pri meljnih glinah kot pri glini.

Broms in Broman (1977) za uporabo žganega apna navajata vrednost:

$$k_{stab} = 100-1000 \times k_{zem}.$$

## Apno/cement

Kot je navedeno v EuroSoilStab (2002), se propustnost s časom niža.

EuroSoilStab (2002):  $k_{stab} = 100-1000 \times k_{zem.}$

Carlsten in Ekstrom(1995):  $k_{stab} = 400-800 \times k_{zem.}$

Rogbeck (1995):  $k_{stab} = 750-1000 \times k_{zem.}$

Albertsson (1992):  $k_{stab} = 200 \times k_{zem.}$

Arner (1996):  $k_{stab} = 40 \times k_{zem.}$

ugotovljeno pri izvedbi testnega polja na Švedskem, 8 m nasipa na 6 m gline, presežni porni tlak se je izenačil po petih mesecih.

### 4.7.3 Pregled pričakovanih inženirskih parametrov pri stabiliziranju s 16 % suhega cementa (C II/B-V 42,5) na terenu

Za oceno možnosti izboljšave tal z metodo globinskega mešanja so ocenjene predvidene vrednosti na podlagi priporočil različnih avtorjev. Ocene pričakovanih vrednosti z uporabo metode suhega mešanja pri stabiliziranju s 16 odstotki cementa C II/B-V 42,5, ki se je na podlagi laboratorijskih preiskav (poglavje 4.5) izkazalo za optimalno.

*Preglednica 52: Pregled pričakovanih inženirskih parametrov na terenu pri stabilizaciji s 16 odstotki cementa (C II/B-V 42,5)*

INŽENIRSKI PARAMETER	OZNAKA	PRIČAKOVANA VREDNOST NA TERENU	PODROBNEJŠI OPIS IN POJASNILO OZNAK
Vrhunska tlačna trdnost	$q_u$	<b>286 kPa</b>	Poglavje 4.7.1
Nedrenirana strižna trdnost	$\tau_u$	<b><math>143\text{kPa} + \sigma_h \times \tan 30^\circ</math></b>	Poglavje 4.7.2.1
Nosilnost	$\sigma_{ult}$	<b><math>286\text{kPa} + 3 \times \sigma'_h</math></b>	Poglavje 4.7.2.1
Trdnost kolov na meji lezenja	$q_{1,max}$	<b><math>0.65 \times a \times \sigma_{ult}</math></b>	Poglavje 4.7.2.1
Modul stisljivosti	<b>M</b>	<b>21 MPa</b>	Poglavje 4.7.2.2
Prekonsolidacijski pritisk	$p'_c$	<b>372 kPa</b>	Poglavje 4.7.2.2
Modul elastičnosti	$E_{50}$	<b>11-18 MPa</b>	Poglavje 4.7.2.3
Propustnost	$K_{stab}$	<b>Manjša od <math>k_{zemljine}</math></b>	Poglavje 4.7.2.3



Zavedati se je treba, da se pri cementni stabilizaciji ustvari t. i. cona med kolom in okoliško zemljino, katere učinkovanje zmanjšuje interakcijsko delovanje zemljine in stabiliziranih kolov, kar lahko zmanjšamo z dodatkom apna (Larsson, 2003). Ta pojav je verjetno posledica krčenja in nepropustnosti kola, kot navaja Larsson (2003)

#### **4.7.4 Priporočila za načrtovanje**

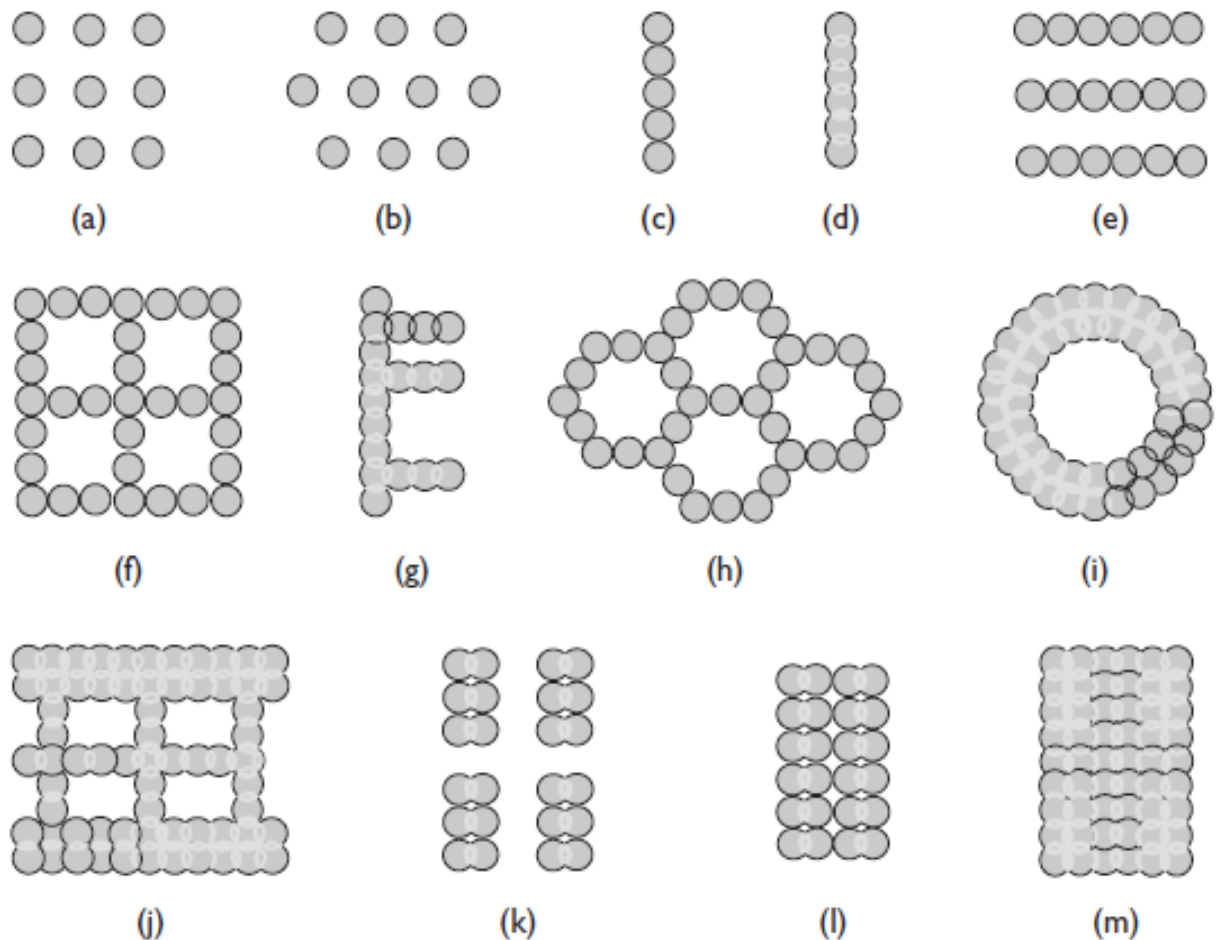
V tem poglavju so kratko povzeta osnovna priporočila za projektiranje stabilizacije tal z metodo globinskega mešanja in osnovni principi načrtovanja.

Več podrobnosti o načrtovanju metode globinskega mešanja najdemo v Broms (2004), EuroSoilStab (2002), v sklopu člankov Portaba in poročilu kongresa Dry Mix Method of Deep Mixing (1999), od koder so priporočila povzeta.

Pri projektiranju je treba tudi upoštevati omejitve tehnologij za izvedbo, ki so podana v drugem poglavju.

##### **4.7.4.1 Geometrija izvedbe kolov globinskega mešanja**

Odstotek mešanja zemljine je lahko 100 odstotkov, in sicer pri plitvem mešanju, običajno je razmerje nižje. Izbrano razmerje je pogojeno s tehnologijo izvedbe in opremo. Izbiro geometrije pogojujejo cena, dosegljiva tehnologija in geotehnične analize. Tipični geometrijski vzorci izvedbe so podani na sliki 41.



Slika 41: Primeri geometrijskih vzorcev globinskega mešanja: (a), (b) pravokotna in trikotna razporeditev; (c) stena dotikajočih kolov; (d) stena dotikajočih kolov; (e) stene dotikajočih kolov; (f) mreža sten dotikajočih kolov; (g) prekrivajoči koli v delni mreži; (h) tangenta celica; (i) krog; (j) rešetka; (k) skupine kolov; (l) skupine kolov v stiku; (m) blok (Topolnicki, 2004, str.375).

Pravokotni ali trikotni geometrijski vzorci ločenih ali kombiniranih kolov se običajno uporabljajo, ko je cilj GM zmanjšanje posedkov in v nekaterih primerih izboljšanje stabilnosti. Običajen primer uporabe je izboljšava tal pod cestnimi nasipi.

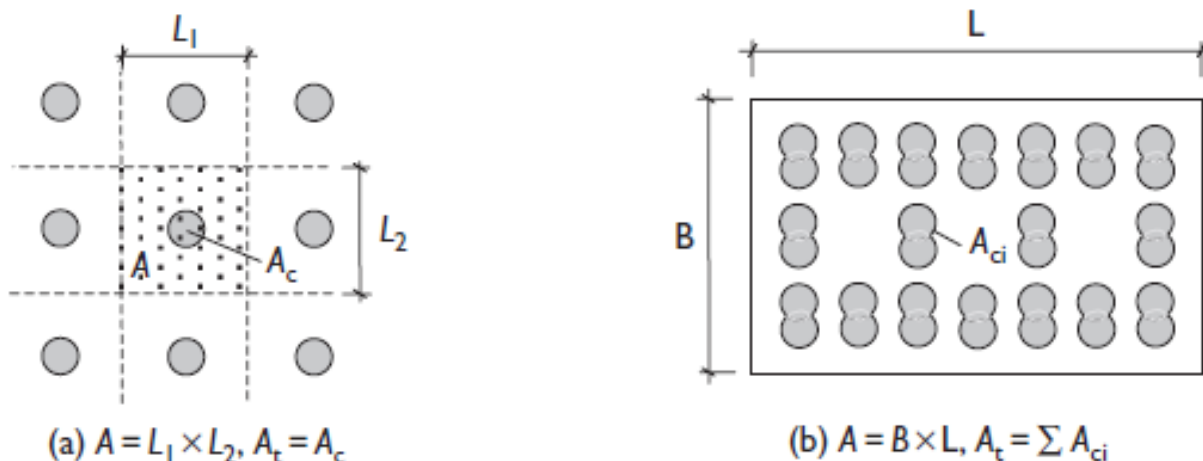
Stene se uporabljajo pri izkopih, za stabilizacijo sten gradbenih jam in zaščito plitvih temeljev okoliških objektov ter zaščito pred zaledno vodo. Zgrajene so tudi za izboljšanje nosilnosti za prenos horizontalnih obtežb. Lahko so sestavljene iz samostojnih ali prekrivajočih se elementov. Prekrivanje je pomembno pri izvedbi sten gradbenih jam ali vodotesnih sten v okoljskih projektih.

Skupina kolov se običajno uporablja za ojačitev tal pod nasipi in temelji z namenom zmanjšanja posedkov in/ali zvišanja nosilnosti.

Za primerjavo različnih geometrijskih vzorcev je predlagano razmerje površin (v nadaljevanju  $a_p$ ), ki je definirano z izrazom:

$$a_p = \frac{A_t}{A},$$

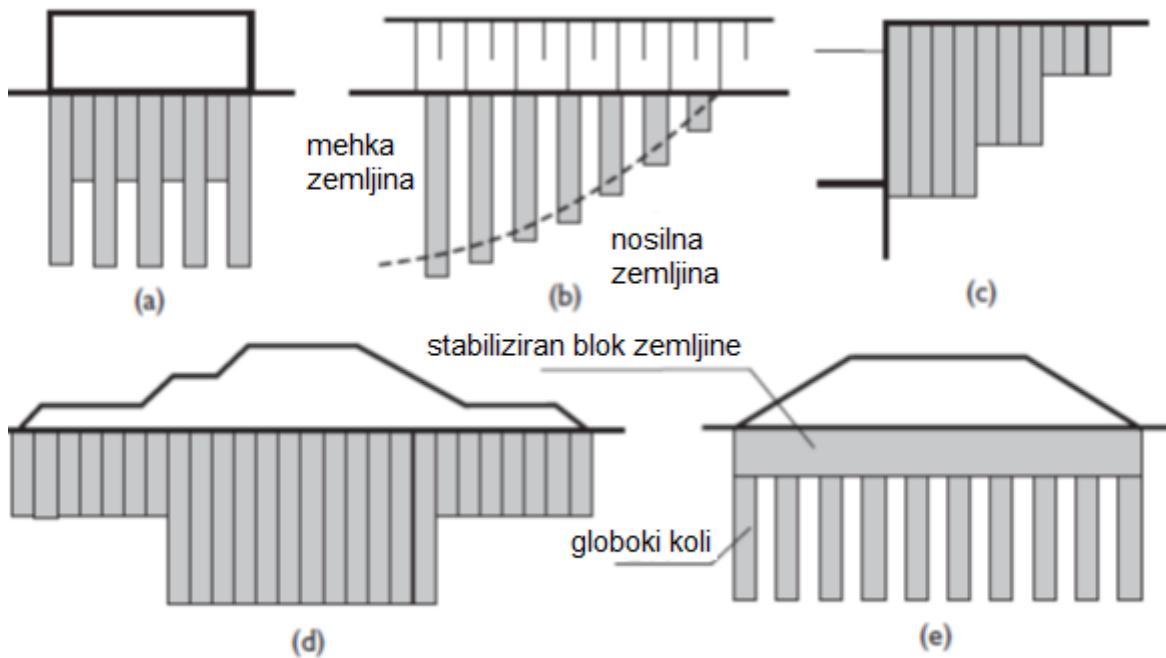
kjer je  $A_t$  prečni prerez kola ali skupine in  $A$  ploščina vplivnega območja kola ali tlorisa objekta. Slika 42 prikazuje primer ocene ploščinskega razmerja izboljšanja tal.



Slika 42: Primer ocene ploščinskega razmerja izboljšanja tal ( $a_p$ ); (a) običajna razporeditev kolov pri izvedbi mreže kolov ( $A$  = horizontalna ploščina vplivnega območja kola); (b) primer razporeditve kolov pod temeljno ploščo ( $A$  = ploščina temeljne plošče;  $A_c$  = horizontalni prerez kola,  $L$  in  $B$  = mera dolžin). (Topolnicki, 2004)

Zgornja meja  $a_p$  pravokotne mreže samostojnih kolov (slika 41a) je 78,5 odstotka, za enakostranične trikotne mreže (slika 41b) pa 90,7 odstotka. Za izvedbo dvojnih kolov (slika 41k) je zgornja meja  $a_p$  19,6 in 22,7 odstotka ter za trojne kole 8,7 in 10,1 odstotka. Za stabiliziranje z izvedbo treh kolov hkrati je priporočena minimalna razdalja med koli za zmanjšanje medsebojnega vpliva, njeno razmerje  $a_p$  je ocenjeno za najmanjše. Na Japonskem je običajna vrednost  $a_p$  za stabiliziranje tal pod nasipi med 30 in 50 odstotki, na območju Skandinavije pa med 10 in 30 odstotki.

GM lahko optimiziramo tudi z uporabo različnih globin kolov. Nekatere shematične izvedbe so prikazani na sliki 43.



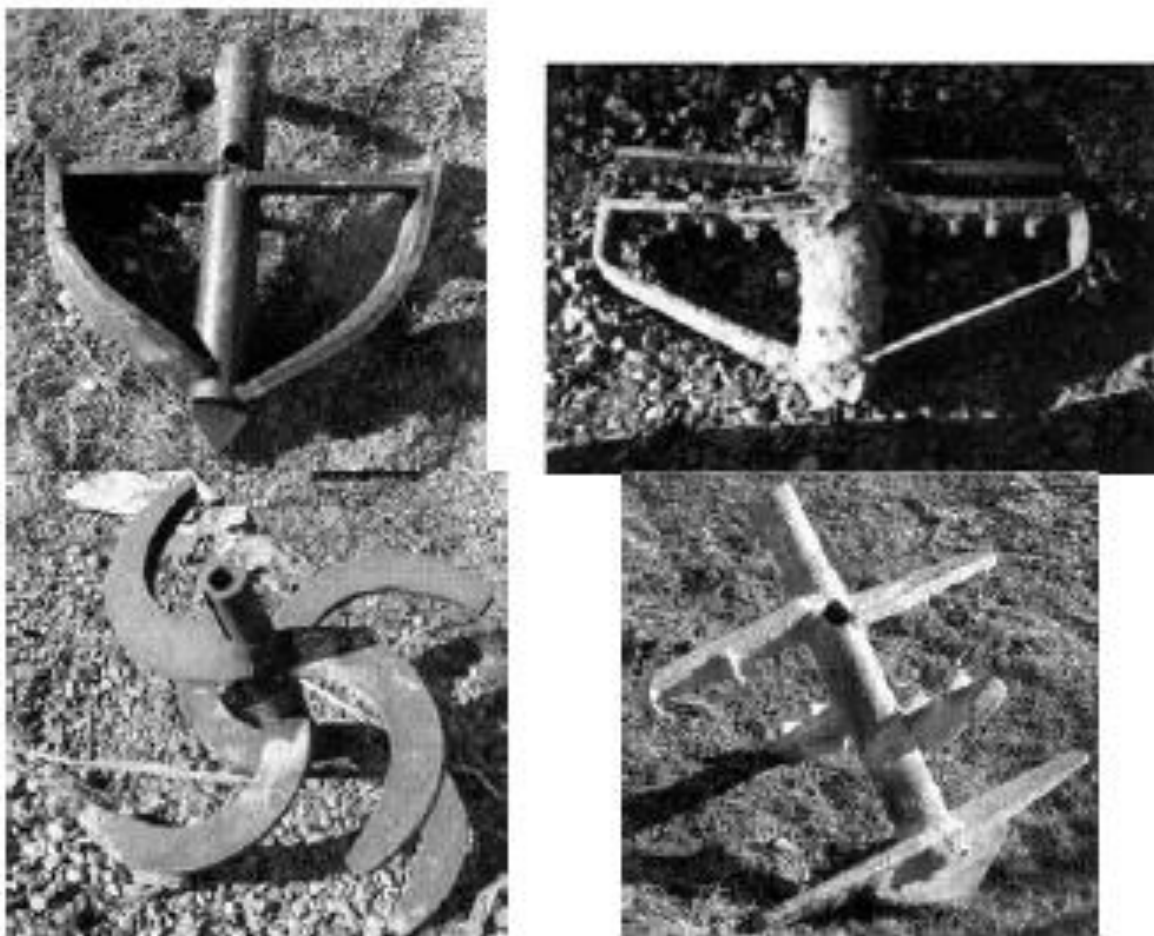
Slika 43: Primeri izvedbe globinskega mešanja z različno dolžino kolov: (a) kombinacija dolgih in kratkih sten; (b) prehodno območje; (c) stopničasti koli; (d) nasip; (e) kombinacija stabiliziranja bloka zemljine in globokih kolov (Topolnicki, 2004).

#### 4.7.4.2 Vgradnja

Natančnejši vpliv vgrajevanja po MM je proučil Larrson (2003) pod okriljem SGI. V tem poglavju so le na kratko predstavljene osnovne predlagane korelacije in kratek povzetek.

Tipični postopek vgradnje je sestavljen iz pozicioniranja mešalk, vtiskanja mešalnega orodja v zemljino, verifikacije in izboljšave spodnje plasti zemljine, dviganja mešalk s predvideno hitrostjo in premika na naslednjo lokacijo. Detajli izvedbe so odvisni od tehničnih lastnosti opreme, razmer na terenu in zahtev temeljenja. Vtiskanje veziva v zemljino je računalniško nadzorovano in odvisno od energije, potrebne za mešanje, in od lastnosti sloja zemljine. Na splošno lahko dodajamo vezivo v zemljino med vtiskanjem ali med dviganjem.

Homogenost in trdnost kolov je odvisna predvsem od učinkovitosti mešanja veziva in zemljine. Pri tem so poglavitni parametri čas, tip mešalk, vrsta in obnašanje zemljine ter energija vtiskanja veziva v zemljino. Za oceno potrebne energije za mešanje in kontrolo izvedbe na terenu je bil na Japonskem predstavljen poenostavljen pristop, osnovan na številu rotacij rezil (CDIT, 2002; Topolnicki, 2002).



Slika 44: Mešalke za izvebo globinskega mešanja s horizontalnimi rezili (Larrson, 2003).

Število rotacij rezil (v nadaljevanju T) je definirano kot število prehodov mešalnih rezil v horizontalni ravnini pri vertikalnem premiku mešalne opreme za en meter. Za primer stabiliziranja med vtiskanjem in za lokacijo injekcijske odprtine pod mešalnim orodjem je T definiran z izrazom:

$$T = \sum M \times \left( \frac{R_p}{V_p} + \frac{R_w}{V_w} \right),$$

za primer stabiliziranja med vtiskanjem in lokacijo injekcijske odprtine na mešalnem orodju je T definiran z izrazom:

$$T = \sum M \times \left( \frac{R_w}{V_w} \right),$$

za delno stabiliziranje med vtiskanjem in polno stabiliziranje med dviganjem z aktivno injekcijsko odprtino pod mešalnim orodjem med vtiskanjem in aktivno odprtino nad mešalnim orodjem med dviganjem pa je izražena korelacija:

$$T = \sum M \times \left( \frac{R_p}{V_p} \times \frac{W_p}{W} + \frac{R_w}{V_w} \right).$$

Za vse enačbe velja, da je  $T$  število prehodov mešalnih rezil v horizontalni ravnini pri vertikalnem premiku mešalne opreme za en meter (število prehodov/m),  $\Sigma M$  je celotno število mešalnih rezil,  $R_p$  in  $R_w$  sta hitrosti rotacije mešalnega orodja med vtiskanjem ( $p$ ) in dviganjem ( $w$ ) (število obratov/min),  $V_p$  in  $V_w$  sta hitrosti vtiskanja in dviganja mešalnega orodja med vtiskanjem ( $p$ ) in dviganjem ( $w$ ) (m/min),  $W_p$  je količina paste, vtisnjene med vtiskanjem ( $\text{kg/m}^3$ ), ter  $W$  celotna količina vezivne malte ( $\text{kg/m}^3$ ).

GM podobno kot druge metode izboljšanja zemljine uporablja posredne metode za kontrolo kakovosti. Glavni cilj kontrolnega sistema je zagotovitev vnosa pravilne količine veziva in mešalne energije za zagotovitev homogenosti po celotnem elementu. Obseg nadzora je tesno povezan z vrsto projekta in zahtevano stopnjo kontrole kakovosti.

#### 4.7.4.3 Princip temeljenja in sistem izboljšanja zemljine

Projektiramo lahko kole z visoko trdnostjo, kar je običajno za območje Japonske, ZDA, Kitajske. Taki koli se obnašajo kot nosilni elementi, odpoved pa nastopi pri manjši deformaciji (EuroSoilStab, 2002).

Kole lahko projektiramo tudi kot poltrdne s primerno trdnostjo in odpovedjo pri večji deformaciji. Poltrdni koli delujejo bolj skladno z okoliško nestabilizirano zemljino. V večini skandinavskih držav uporabljajo sistem stabiliziranja s poltrdnimi koli, kar se je izkazalo za bolj konkurenčno in ekonomično metodo (Broms, 2004). Nedrenirana strižna trdnost je omejena na 150 kPa, ne glede na laboratorijske in terenske teste (EuroSoilStab, 2002).

- **Nosilnost posameznih kolov**

Dejanska nosilnost kola je odvisna od strižne nosilnosti okoliške zemljine (zdrs) ali od strižne trdnosti kola, ki je opisana v poglavju 4.7.2.1. V primeru odpovedi zemljine je nosilnost odvisna od odpornosti plašča in odpornosti konice. Kratkotrajna dejanska nosilnost kola je lahko izražena:

$$Q_{ult} = (\Pi \times d \times I_c + 2,25 \times \Pi \times d^2) \times c_u$$

kjer je  $d$  premer kola,  $I_c$  je dolžina kola,  $c_u$  je povprečna nedrenirana strižna trdnost okoliške zemljine. V zgornji enačbi je predpostavljeno, da je trenje ob plašču enako  $c_u$  in odpornost konice približno  $9 \times c_u$ . Odpornost konice je običajno majhna v primerjavi z odpornostjo po plašču.

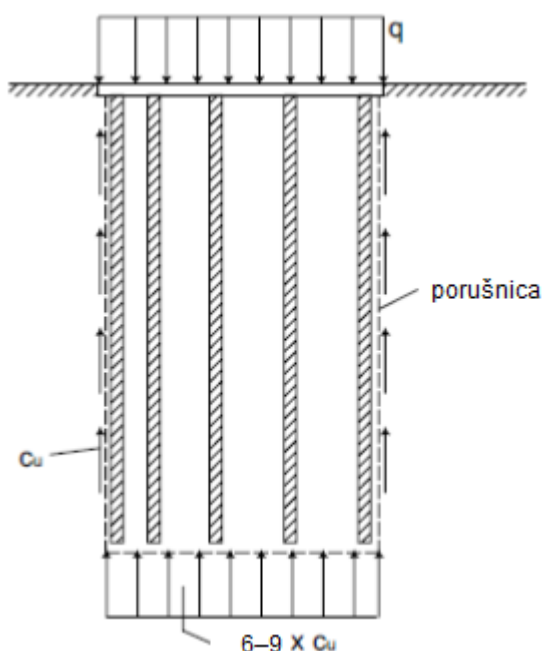
- **Nosilnost skupine kolov**

Podobno kot pri kolu je nosilnost skupine kolov odvisna od strižne nosilnosti okoliške zemljine ali trdnosti kolov. Možna porušitev skupine kolov je prikazana na spodnji sliki 45.

Nosilnost skupine kolov se poveča odvisno od obsega odpora skupine kolov ( $2 \times c_u \times I_c \times (B+L)$ ), glej spodnjo enačbo, in odpor konic skupine, kar je 6- do 9-krat vrednost nedrenirane strižne trdnosti zemljine. Celotno nosilnost skupine kolov lahko izrazimo kot:

$$Q_{skupine} = 2 \times c_u \times I_c (B + L) + (6-9) \times c_u \times B \times L,$$

kjer je B širina in L dolžina tlorisa skupine kolov,  $l_c$  je dolžina kola,  $c_u$  pa povprečna nedrenirana strižna trdnost okoljske zemljine.



Slika 45: Strižna odpoved skupine kolov v bloku

Faktor 6 velja za temelje z  $L > B$ , faktor 9 velja za pravokotne temelje. Za mobilizacijo maksimalne odpornosti na konicah so potrebne relativno velike deformacije od 5 do 10 odstotkov širine ploščine delovanja obtežbe. Posledično je priporočeno v projektiranju zanemariti odpor na konic.

Dejanska nosilnost je lahko odvisna od lokalnega zdrsa na robu bloka. Takšno nosilnost lahko izračunamo z metodami klasičnih stabilnostnih analiz, lahko pa jo ocenimo tudi po naslednji enačbi:

$$Q_{ult} = 5,5 \times c_u \times \left(1 + 0,2 \times \frac{B}{L}\right),$$

kjer sta B in L širina in dolžina tlorisa skupine kolov,  $c_u$  je povprečna trdnost po predvideni porušnici.

- **Posedki skupine kolov**

Učinkovitost GM je v literaturi splošno opredeljena z vrednostjo zmanjšanja posedkov med 25 do 80 odstotki. Posedek lahko izračunamo po enačbi:

$$s_1 = \sum \left( \frac{\Delta h}{a} \times \frac{q_1}{M} \right),$$

kjer je  $\Delta h$  debelina sloja,  $q_1$  pritisk na kole in M kompresijski modul kolov.

Podobno se lahko izračunajo posedki nestabilizirane zemljine:

$$s_2 = \sum \left( \frac{\Delta h}{1-a} \times \frac{q_2}{M_s} \right),$$

kjer je  $q_2$  obtežba zemljine in  $M_s$  modul stisljivosti zemljine. Celotni pritisk je  $q = q_1 + q_2$ .

Prvi izračun posedkov lahko naredimo s predvidevanjem  $q_1 = q_{1,max}$ . Pridobljene posedke  $s_1$ , lahko primerjamo s posedki nestabilizirane zemljine  $s_2$ . Če je  $s_1 > s_2$ , lahko porazdelimo obtežbo z velikim zmanjšanjem  $q_1$  in zvečanjem  $q_2$ , tako da dosežemo  $s_1 = s_2$ . Tako dosežemo enakomerno posedanje in lahko izrazimo skupni posedek  $s_m$ :

$$s_m = s_1 = s_2 = \sum \left( \frac{\Delta h \times q}{a \times M_c + (1-a) \times M_s} \right).$$

V primeru  $s_1 < s_2$  koli ne morejo prevzeti več obtežbe in velja  $s_m = s_2$ .

Za plavajoče kole se posedki mehke zemljine pod skupino kolov izračunajo s standardnim pristopom za plitve temelje. Celotni posedki so odvisni od komponent posedanja.

V večini primerov je različno posedanje vzrok poškodb objektov. Te primarno povzročajo strižna deformacija nestabilizirane zemljine med koli (Broms, 1991). Maksimalen kotni zasuk  $\alpha$  med dvema vrstama kolov bo sorazmeren povprečni strižni napetosti po obodu stabiliziranega bloka in povprečnemu strižnemu modulu  $G_{zem}$  zemljine po enačbi:

$$\alpha = \frac{\tau_{pov}}{G_{zem}}.$$



## 5 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi Preiskave mulja iz Luke Koper za načrtovanje stabilizacije z globinskim mešanjem so opisane prednosti in pomanjkljivosti ter omejitve metode globinskega mešanja, podan je tudi prikaz možnih uporab. Podrobneje so opisane metode izvedbe in pregled tehnologij, vključen je tudi ekonomski vidik izvedbe globinskega mešanja.

Povzete so teoretične osnove vplivov učinkovanja veziv, glede na lastnosti zemljine. Opisane so osnovne reakcije veziv v zemljini ter vpliv lastnosti zemljine in vsebnosti vode v mešanici na učinkovanje posameznih veziv. Podana so priporočila za uporabo posameznih veziv s predvidenim priraščanjem trdnosti. Povzeta so priporočila za izbiro veziva, glede na vrsto zemljine, učinkovanje mineralnih veziv v zemljini in predvideno delovanje kompozitov tal.

Z laboratorijskimi preiskavami morske gline iz Luke Koper so bile ocenjene lastnosti zemljine. Pregledani so bili podatki o referenčni zemljini na terenu. Na podlagi lastnosti zemljine je bilo podrobneje analizirano učinkovanje veziv v zemljini. Glede na analizo učinkovanja veziv v zemljini z znanimi lastnostmi in s pomočjo priporočil iz literature lahko sklepamo, da je zemljina primerna za stabilizacijo z metodami globinskega mešanja.

Glede na zrnavost (odstotek zrn premera pod 0,063 mm je 98,2) in visoke vsebnosti organskih snovi (žaro izguba je 16 odstotkov pri 950 °C), je predvideno optimalno učinkovanje cementne stabilizacije pri visokih vsebnostih veziva in ugodno učinkovanje apno-cementne stabilizacije ter slabo učinkovanje apnene stabilizacije.

Na podlagi literature je bila načrtovana vsebnost veziva in optimalna vsebnost vode za stabilizacijo zemljine s cementom.

Po zgledu obstoječih procedur je bila zasnovana in preizkušena metoda priprave laboratorijskih vzorcev. Pri preskusu metode se je izkazalo, da je potrebno za dosego enakomerne porazdeljenosti veziva v mešanici in za doseganje homogenosti preizkušancev izhodiščno metodo modificirati. Zaradi lepljivosti (visoke plastičnosti) zemljine je bilo onemogočeno mešanje veziva in vlažne zemljine, posledično sem se odločil za mešanje suhe zemljine z vezivom in nato z vodo. Zavedati se je potrebno, da posledično priprava ni ponazarjala stabiliziranja na terenu. Pri optimalni vlažnosti mešanice je lepljivost onemogočala primerno vgradnjo mešane mase v kalupe, za zagotovitev homogenosti preizkušancev je bila posledično izbrana simulacija suhega mešanja. Vsebnost vode v mešanici je enaka naravni vlažnosti zemljine.

Sestavljen je bil program preiskav za podrobnejše preizkušanje dodatkov veziv (apno, cement, apno-cement) mulju iz Luke Koper. Za oceno učinkovanja globinskega mešanja na zemljini iz Luke Koper in ovrednotenje vpliva hranjenja je bilo preiskovanih 14 receptur pri različnih vsebnostih veziva (apno, cement, apno-cement). Pripravljenih in preizkušenih je bilo 99 vzorcev.

Za zmanjšanje obsega preiskav so bile najprej izvedene predhodne preiskave, kjer je bilo preizkušeno učinkovanje dveh vrst cementa in dveh razmerij apna in cementa pri apno-cementnem stabiliziranju. Za učinkovitejše se je izkazalo stabiliziranje s cementom C II/B-V 42,5 in apno/cementom pri razmerju 0,25/0,75.

V osnovnih preiskavah je bilo natančneje preiskovano učinkovanje stabiliziranja z uporabo različnih vrst in vsebnosti veziv. Preiskovano je bilo mešanje z žganim apnom (CL 90 Q) pri vsebnosti 7,9 in 11 odstotkov, cementa (C II/B-V 42,5) pri vsebnosti 7, 10, 13 in 16 odstotkov in mešanico apno-cementa pri vsebnosti 11, 14, 17 in 20 odstotkov. Ugotovljen optimalen dodatek veziva pri uporabi metode suhega mešanja je cement z dodatkom pepela (C II/B-V 42,5) pri vsebnosti 16 odstotkov, glede na suho težo zemljine. Merjena enoosna tlačna

trdnost laboratorijsko pripravljenih optimalnih mešanic je po 28 dneh hranjenja 596 kPa, po 91 dneh je trdnost 941 kPa.

V dodatnih preiskavah je bil preiskovan vpliv hranjenja na doseženo enoosno tlačno trdnost. Primerjanih je bilo dvoje verjetno skrajnih razmer hranjenja na terenu. Metoda hranjenja v predhodnih in osnovnih preiskavah je preizkušancem omogočala srkanje vode, dostop zraka je bil onemogočen. V dodatnih preiskavah so bili vzorci hranjeni brez dostopa zraka in vode.

Na podlagi ugotovljene korelacije je bila ocenjena vrednost enoosne tlačne trdnosti optimalne mešanice, ki je po 28 dneh 954 kPa in po 91 dneh 1666 kPa. Treba se je zavedati, da je to samo ocena vrednosti na podlagi laboratorijskih testov z drugim načinom hranjenja, ki verjetno ne ustreza povsem vrednosti stabiliziranja na terenu, saj je razlik med razmerami pri laboratorijskem in terenskim mešanjem veliko.

Na podlagi literature so bile ocenjene pričakovane vrednosti mehanskih parametrov optimalne mešanice na terenu, saj izvedba stabiliziranja na terenu ni bila mogoča. Navedene korelacije se razlikujejo od avtorja do avtorja, kar kaže na potencialno veliko napako pri oceni in potrebo po preskusih na terenu pred obsežnejšo uporabo v praksi. Po razmisleku so bile upoštevane srednje vrednosti korelacij verodostojnih virov. Ocenjena enoosna tlačna trdnost optimalne mešanice na terenu je 286 kPa. Vsi drugi mehanski parametri stabilizirane zemljine so ocenjeni na podlagi vrednosti enoosne tlačne trdnosti.

Na podlagi rezultatov enoosnih tlačnih preskusov je potrjeno predvideno učinkovanje veziv v zemljini, ki je opravljeno na podlagi lastnosti zemljine. Trdim lahko, da je na podlagi lastnosti zemljine mogoče izbrati učinkovito vrsto veziva, grobo je lahko ocenjena tudi potrebna vsebnost. Na drugi strani pa se izkaže netočnost in raznolikost korelacij laboratorijskih in terenskih vrednosti. Izkaže se, da je možnost odstopanja predvidenih vrednosti na terenu prevelika. Za pridobitev dejanskih parametrov mehanske lastnosti zemljine je potrebna testna izvedba stabiliziranja na terenu. Na podlagi izvedbe na terenu in laboratorijskega testiranja bi bilo mogoče vzpostaviti korektno korelacijo laboratorijskih in terenskih vrednosti.

## VIRI

- Ahnberg, H., Johansson, S. E., Retelius, A., Ljungkrantz, C., Holmqvist, L., Holm, G. 1995. Cement and lime for deep stabilisation of soil. Swedish Geotechnical Institute, Report No. 48., Linköping: p. 213.
- Ahnberg, H., and Holm, G. 1999. Stabilisation of Some Swedish Organic Soils With Different Types of Binder. Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilisation. Brendenberg, Holm, and Broms, eds., Balkema, Rotterdam: p. 101-108.
- Ahnberg, H. 2004. Effects of back pressure and strain rate used in triaxial testing of stabilised organic soils and clays. Geotechnical Testing Journal 27, 3: p. 250–259.
- Ahnberg, H. 2006. Effects of consolidation stresses on the strength of some stabilised Swedish soils. Ground Improvement 10, 1: p. 1–13.
- Ahnberg, H. 2006. A Laboratory Study on Clays and Organic Soils Stabilised with Different Types of Binder. Doktorska disertacija. Swedish Deep Stabilization Research Centre: 191 f.
- Ahnberg, H., Holm, G. 1999. Stabilisation of Some Swedish Organic Soils With Different Types of Binder. Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilisation. Brendenberg, Holm, and Broms, eds., Rotterdam, Balkema: p. 101-108.
- An Introduction to the Deep Soil Mixing Methods as Used in Geotechnical Applications. 2002. Geosystems, Department of Transportation, Federal Highway Administration: 143 f.
- Andromalos, K. B., Hegazy, Y. A., Jasperse, B. H. 2000. Stabilisation of soft soils by soil mixing, Proceedings of the Soft Ground Technology Conference, United Engineering Foundation and ASCE Geo-Institute, Nootwikerout, Nizozemska, 28 maj-2 junij.
- Axelsson, K., Johansson, S. E., Andersson, R. 2002. Stabilization of Organic Soils by Cement and Puzzolanic Reactions. Swedish Deep Stabilization Research Centre: 47 f.
- Babasaki, R., Terashi, M., Suzuki, T., Maekawa, A., Kawamura, M. and Fukazawa, E. 1996. JGS TC Report: Factors influencing the strength of improved soil, Proceedings of the 2nd Int. Conference on Ground Improvement Geosystems, Grouting and Deep Mixing, Tokyo 2: p. 913-918.
- Broms, B. 2004. Lime and lime/cement columns. V: Moseley, M. A. , Kirsch . Ground Improvement: p. 252-329.
- Bhadriraju, V., Puppala, A. J., Madhyannapu, R. S., Williammee, R. 2006. Laboratory Procedure to Obtain Well-Mixed Soil Binder Samples of Medium Stiff to Stiff Expansive Clayey Soil for Deep Soil Mixing Simulation. Geotechnical Testing Journal 31, 3: p. 225-238.
- Development of design and construction methods to stabilise soft organic soils. 2002. EuroSoilStab, Design Guide Soft Soil Stabilisation. European Commission Project BE 96-3177.
- Horpibulsuk, S., Miura, N., Nagaraja, T. S. 2005. Clay-Water/Cement Ratio Indentity for Cement Admixed Soft Clays. J. Geoenviron. Eng.: ASC 131, 2: p. 187-192.
- Janz, M., Johansson, S. E. 2002. The Function of Different Binding Agents in Deep Stabilization. Swedish Deep Stabilization Research Centre, 46 f.

Kamon, M. 1996. Effect of grouting and DMM on big construction projects in Japan and the 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, Grouting and Deep Mixing, Proceedings of IS-Tokyo '96, 2nd International Conference on Ground Improvement, Geosystems, Tokyo, 14–17 May: p. 807–823.

Kawanabe, S., Nozu, M. 2002. Combination mixing method of Jet grout and Deep mixing, Proceedings of Deep Mixing Workshop 2002 in Tokyo, Port and Airport Research Institute & Coastal Development Institute of Technology.

Kawasaki, K., Kotera, H., Nishida, K., Murase, T. 1996. Deepmixing by spreadable wing method, Grouting and Deep Mixing, Proceedings of IS-Tokyo '96, The 2nd International Conference on Ground Improvement Geosystems, Tokyo, 14–17 May: p. 631–636.

Larsson, S. 2003. Mixing Processes for Ground Improvement by Deep Mixing. Doktorska disertacija. Swedish Deep Stabilization Research Centre, 213 f.

Lambrechts, J., Nagel, S. 2003. Coring Soil–Cement Installed by Deep Mixing at Boston's CA/T Project, Proceedings of the 3rd International Conference on Grouting and Ground Treatment, ASCE Geotechnical Special Publication 120: p. 670–680.

Logar, J. 2009. Geotehnika v Luki Koper na začetku 21. stoletja. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tal z laboratorijem.

Lorenzo, G. A., Bergado, D. T., Soralump, S. 2006. New and Economical Mixing Method of Cement-Admixed Clay for DMM Application. Geotechnical Testing Journal: 29, 1: p. 54–63.

Matuso, O. 2002. Determination of Design Parameters for Deep Mixing, Proceedings of Deep Mixing Workshop 2002 in Tokyo, Port and Airport Research Institute & Coastal Development Institute of Technology.

Miaura, N., Bergado, D.T., Sakai, A., Nakamura, R. 1987. Improvement of Soft Marine Clays by Special Asmixtures Using Dry and Wet Jet Mixing Methods, Proceedings of the 9th Southern Asian Geotechnical Conference, Bangkok, Thailand: p. 8–46.

Okumura, T. 1996. Deep mixing method of Japan, grouting and deep mixing, Proceedings of IS-Tokyo '96, the 2nd International Conference on Ground Improvement Geosystems, Tokyo 2: p. 879–887.

Porbaha, A. 1998. State of the art in deep mixing technology. Part I: Basic concepts and overview. Ground Improvement 2, 2: p. 81–92.

Porbaha, A., Tanaka, H. Kobayashi, M. 1998. State of the art in deep mixing technology. Part II: Applications. Ground Improvement 2, 2: p. 125–139.

Porbaha, A., Shibuya, S., Kishida, T. (2000) State of the art in deep mixing technology. Part III: geomaterial characterization. Ground Improvement 3: p. 91–110.

Porbaha, A. 2000. State of the art in deep mixing technology. Part IV: Design Considerations. Ground Improvement 3: p. 111–125.

Porbaha, A. (2002) State of the art in quality assessment of deep mixing technology. Ground Improvement 6, 3: p. 95–120.

Porbaha, A., Raybaut, J. L., Nicholson, P. 2001. State of the art in construction aspects of deep mixing technology. Ground Improvement 5, 3: p. 123–140.

SIST EN 14679:2005. – Izvedba posebnih geotehničnih del – Globinsko mešanje

SIST TS 17892-2:2004: Geotehnično preiskovanje in preskušanje – Laboratorijsko preskušanje zemljin – 2.del: Ugotavljanje specifične gostote zrn

SIST TS 17892-4:2004: Geotehnično preiskovanje in preskušanje – Laboratorijsko preskušanje zemljin – 4.del: Ugotavljanje zrnnavostne sestave

SIST TS 17892-5:2004: Geotehnično preiskovanje in preskušanje – Laboratorijsko preskušanje zemljin – 5.del: Edometriški preskus s postopnim obremenjevanjem

SIST TS 17892-7:2004: Geotehnično preiskovanje in preskušanje – Laboratorijsko preskušanje zemljin – 7.del: Enoosni tlačni preskus drobnozrnatih zemljin

SIST TS 17892-12:2004: Geotehnično preiskovanje in preskušanje – Laboratorijsko preskušanje zemljin – 12.del: Ugotavljanje Atterbergovih meja plastičnosti

Terashi, M. 1997. Theme lecture: Deep mixing method–Brief state-of-the-art, Proc. 14<sup>th</sup> Int. Conf. Soil. Mech. Found. Engeng.: 4: p. 2475-2478.

Topolnicki, M. 2004. In situ soil mixing. V: Moseley, M. , Kirsch . Ground Improvement : p. 252-329.

Uddin, K., Balasubramaniam, A.S., Bergado, D.T. 1997. Engineering Behavior of Cement-Treated Bangkok Soft Clay. Geotech. Eng.: 28, 1: p. 89–119.