

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*



## **DIPLOMSKA NALOGA**

### **UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM PRVE STOPNJE GRADBENIŠTVO**

Ljubljana, 2017

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



Jamova cesta 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si

**UNIVERZITETNI  
ŠTUDIJSKI PROGRAM  
PRVE STOPNJE  
GRADBENIŠTVO**

Kandidat/-ka:

**Mentor/-ica:**

**Predsednik komisije:**

**Somentor/-ica:**

**Član komisije:**

## STRAN ZA POPRAVKE

*Stran z napako*

*Vrstica z napako*

*Namesto*

*Naj bo*

»Ta stran je namenoma prazna.«

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

|                         |                                                                                                                                      |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>UDK:</b>             | <b>624.151:699.86(043.2)</b>                                                                                                         |
| <b>Avtor:</b>           | <b>Simon Arčan</b>                                                                                                                   |
| <b>Mentor:</b>          | <b>izr. prof. dr. Janko Logar</b>                                                                                                    |
| <b>Somentor:</b>        | <b>doc. dr. Boštjan Pulko</b>                                                                                                        |
| <b>Naslov:</b>          | <b>Mehansko obnašanje toplotno izoliranih temeljev</b>                                                                               |
| <b>Tip dokumenta:</b>   | <b>diplomska naloga – univerzitetni študij</b>                                                                                       |
| <b>Obseg in oprema:</b> | <b>38 str., 18 pregl., 8 sl., 2 en.</b>                                                                                              |
| <b>Ključne besede:</b>  | <b>temeljna plošča, toplotno izolirani temelji, ekstrudirani polistiren (XPS), peščena podlaga, zdrs, direktna strižna preiskava</b> |

### **Izvleček**

Zaradi vse večje težnje k zmanjšanju porabe energije in stroškov obratovanja stavbe se veliko pozornosti namenja izvedbi kvalitetnega in neprekinjenega stavbnega ovoja, ki zagotavlja ohranjanje toplote v stavbi. Zato je potrebna tudi izvedba toplotne izolacije dela stavbe v stiku s tlemi.

V prvem delu diplomske naloge smo predstavili pravilnike, ki podajajo pogoje in rešitve za zmanjšanje porabe energije in preprečevanje toplotnih izgub. Talni del stavbe najenostavneje in najučinkoviteje zaščitimo z vgradnjo toplotne izolacije pod temeljno ploščo. Kot toplotnoizolacijski material lahko uporabimo ekstrudirani polistiren (XPS), ekspandiran polistiren (EPS) ali penjeno steklo (FG). Predstavljene so prednosti in slabosti posameznega materiala, v nadaljevanju pa še način vgradnje.

V drugem delu smo preučili problem zdrs, prevrnitve in posedanja zaradi vložka toplotne izolacije pod temeljno ploščo. Osredotočili smo se na zdrs konstrukcijskega sklopa, ki vsebuje toplotno izolacijo, položeno na podlago iz peska. Zdrs smo preverjali z direktno strižno preiskavo, ki smo jo izvedli na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo. Izračunali smo koeficiente lepenja in jih primerjali z vrednostmi koeficientov lepenja na podložnem betonu, ki so jih s predhodnimi raziskavami pridobili drugi avtorji, ter ocenili možnost zdrs in varnost vgradnje toplotne izolacije na podlago iz peska.

**BIBLIOGRAPHIC AND DOCUMENTATION INFORMATION AND ABSTRACT**

|                       |                                                                                                                              |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>UDC:</b>           | <b>624.151:699.86(043.2)</b>                                                                                                 |
| <b>Author:</b>        | <b>Simon Arčan</b>                                                                                                           |
| <b>Supervisor:</b>    | <b>izr. prof. dr. Janko Logar</b>                                                                                            |
| <b>Co-advisor:</b>    | <b>doc. dr. Boštjan Pulko</b>                                                                                                |
| <b>Title:</b>         | <b>Mechanical behaviour of thermally insulated foundations</b>                                                               |
| <b>Document type:</b> | <b>Graduation thesis – University Studies</b>                                                                                |
| <b>Notes:</b>         | <b>38 p., 18 tab., 8 fig., 2 eq.</b>                                                                                         |
| <b>Keywords:</b>      | <b>mat foundations, thermally insulated foundations, extruded polystyrene (XPS), sand basis, slippage, direct shear test</b> |

**Abstract**

Because of increasing tendency to reduce energy consumption and operating expenses, a lot of attention is given to the installation of quality and continuous building envelope that provides heat preservation in a building. That is why, it is also necessary to install thermal insulation on the bottom of a building.

In the first part of the thesis we presented regulations, that explain terms and solutions for reduction of energy consumption and prevention of heat loss. The easiest and the most effective way to protect the bottom of a building is to install thermal insulation under slab-on-grade foundations. We can use extruded polystyrene (XPS), expanded polystyrene (EPS) or foam glass (FG) as thermal insulation material.

In the second part we examined problem of the slippage, overturning and subsidence caused by the insertion of thermal insulation under slab-on-grade. We focused on the slippage of structural component that consists of thermal insulation laid on the layer of sand. We controlled slippage by direct shear test, performed at the Faculty of civil and geodetic engineering. We calculated coefficients of static friction and compared them with the ones obtained by other authors who performed tests with concrete slab instead of sand. After that we evaluated the possibility of slippage and safety of installation of thermal insulation on the layer of sand.

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentorju, izr. prof. dr. Janku Logarju, za strokovne nasvete in pomoč pri izdelavi diplomske naloge ter somentorju, doc. dr. Boštjanu Pulku, za vso predano znanje.

Zahvala gre tudi asist. dr. Mateju Mačku, Franciju Čeponu in Boštjanu Jursinoviču za pomoč pri pripravi materiala in izvedbi preiskav.

Iskrena hvala družini, predvsem mami Tatjani in očetu Danijelu, za finančno in moralno podporo ter Iris, ki mi vedno stoji ob strani.

Hvala tudi sošolcem in prijateljem za podporo in vzpodbudo tekom študija in izdelave diplomske naloge.

**KAZALO VSEBINE**

|                                                                                                                                                                         |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....                                                                                                                  | III       |
| BIBLIOGRAPHIC AND DOCUMENTATION INFORMATION AND ABSTRACT .....                                                                                                          | IV        |
| ZAHVALA .....                                                                                                                                                           | V         |
| <b>1 UVOD .....</b>                                                                                                                                                     | <b>1</b>  |
| <b>2 PRAVILNIKI IN ZAKONODAJA .....</b>                                                                                                                                 | <b>3</b>  |
| 2.1 Evropska direktiva 2010/31/UE in Okvir podnebne in energetske politike do 2030 ..                                                                                   | 3         |
| 2.2 Energetski zakon (EZ-1) .....                                                                                                                                       | 3         |
| 2.3 Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah (PURES) in Tehnična smernica TSG-1-004:2010 – učinkovita raba energije .....                                         | 4         |
| 2.4 Standard SIST EN ISO 13793:2002 – Toplotne značilnosti stavb – Dimenzioniranje toplotnih lastnosti temeljev proti dviganju zaradi zmrzovanja (ISO 13793:2001) ..... | 5         |
| <b>3 ZASNOVA KONSTRUKCIJSKEGA SKLOPA TOPLOTNO IZOLIRANIH TEMELJEV ..</b>                                                                                                | <b>6</b>  |
| 3.1 Temeljna plošča.....                                                                                                                                                | 6         |
| 3.2 Toplotnoizolacijski materiali .....                                                                                                                                 | 7         |
| 3.2.1 Ekstrudiran polistiren (XPS).....                                                                                                                                 | 8         |
| 3.2.2 Ekspandiran polistiren (EPS) .....                                                                                                                                | 9         |
| 3.2.3 Penjeno steklo (FG).....                                                                                                                                          | 11        |
| 3.3 Vgradnja toplotne izolacije pod temeljno ploščo.....                                                                                                                | 12        |
| <b>4 KONTROLA ZDRSA PLOŠČE IZ EKSTRUDIRANEGA POLISTIRENA NA PEŠČENI PODLAGI .....</b>                                                                                   | <b>15</b> |
| 4.1 Opredelitev problema stabilnosti .....                                                                                                                              | 15        |
| 4.2 Materiali in metode .....                                                                                                                                           | 18        |
| 4.3 Rezultati preiskave .....                                                                                                                                           | 20        |
| 4.3.1 Preizkušane 1 (XPS 700).....                                                                                                                                      | 21        |
| 4.3.2 Preizkušane 2 (pesek) .....                                                                                                                                       | 22        |
| 4.3.3 Preizkušane 3 (2× XPS 700).....                                                                                                                                   | 24        |
| 4.3.4 Preizkušane 4 (XPS 700 + pesek) .....                                                                                                                             | 26        |
| 4.4 Primerjava rezultatov direktne strižne preiskave .....                                                                                                              | 29        |

|                   |                                                                             |           |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.5               | Primerjava rezultatov preiskav s peščeno podlago in podložnim betonom ..... | 31        |
| <b>5</b>          | <b>ZAKLJUČEK .....</b>                                                      | <b>33</b> |
| <b>VIRI .....</b> |                                                                             | <b>34</b> |

**KAZALO SLIK**

|                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 1: Prikaz enega od možnih konstrukcijskih sklopov s toplotno izolacijo XPS pod temeljno ploščo (Fibran Nord, 2017c)..... | 12 |
| Slika 2: Polaganje toplotnoizolacijskih plošč iz ekstrudiranega polistirena (Varčujem z energijo, 2014) .....                  | 13 |
| Slika 3: Penjeno steklo (PasivnaGradnja.si, 2017) .....                                                                        | 14 |
| Slika 4: Obnašanje (toge) stavbe na podajni podlagi (npr. XPS) (Kilar, 2012) .....                                             | 16 |
| Slika 5: Možno obnašanje energijsko učinkovite stavbe med potresom (Kilar, V., Azinović, B., Koren D., 2016) .....             | 17 |
| Slika 6: Direktni strižni aparat in strižna celica (KMTal, 2017) .....                                                         | 18 |
| Slika 7: Strižna celica s preizkušancem v direktnem strižnem aparatu .....                                                     | 19 |
| Slika 8: Preizkušane 4 .....                                                                                                   | 27 |

## KAZALO PREGLEDNIC

|                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Preglednica 1: Informativne lastnosti toplotnoizolacijskih materialov (Tekavec, 2015a; AURE, 2003; Zegowitz, 2010) .....                                  | 8  |
| Preglednica 2: Lastnosti ekstrudiranih polistirenov XPS 400 in XPS 700 (Fibran Nord, 2017b; Fibran Nord, 2017f; Kilar, 2013a; Norik, 2017) .....          | 9  |
| Preglednica 3: Lastnosti ekspandiranih polistirenov EPS 300 in EPS 400 (JUBHome, 2017b) .....                                                             | 10 |
| Preglednica 4: Lastnosti agregata iz penjenega stekla (Glapor, 2017; Zegowitz, 2010) .....                                                                | 11 |
| Preglednica 5: Strižne karakteristike preizkušanca 1 pri treh različnih normalnih napetostih                                                              | 21 |
| Preglednica 6: Strižne karakteristike preizkušanca 2 pri treh različnih normalnih napetostih                                                              | 23 |
| Preglednica 7: Strižne karakteristike preizkušanca 3 pri treh različnih normalnih napetostih                                                              | 24 |
| Preglednica 8: Strižne karakteristike preizkušanca 4 pri treh različnih normalnih napetostih                                                              | 27 |
| Preglednica 9: Primerjava strižnih trdnosti (bremenska stopnja 50 kPa) .....                                                                              | 30 |
| Preglednica 10: Primerjava koeficientov lepenja (bremenska stopnja 50 kPa) .....                                                                          | 30 |
| Preglednica 11: Primerjava strižnih trdnosti (bremenska stopnja 100 kPa) .....                                                                            | 30 |
| Preglednica 12: Primerjava koeficientov lepenja (bremenska stopnja 100 kPa) .....                                                                         | 30 |
| Preglednica 13: Primerjava strižnih trdnosti (bremenska stopnja 150 kPa) .....                                                                            | 30 |
| Preglednica 14: Primerjava koeficientov lepenja (bremenska stopnja 150 kPa) .....                                                                         | 30 |
| Preglednica 15: Primerjava vrednosti strižnih kotov in kohezije .....                                                                                     | 31 |
| Preglednica 16: Primerjava strižnih trdnosti in koeficientov lepenja iz preiskav s peščeno podlago in podložnim betonom (bremenska stopnja 50 kPa) .....  | 31 |
| Preglednica 17: Primerjava strižnih trdnosti in koeficientov lepenja iz preiskav s peščeno podlago in podložnim betonom (bremenska stopnja 150 kPa) ..... | 32 |
| Preglednica 18: Primerjava vrednosti strižnih kotov in kohezije preiskav s peščeno podlago in podložnim betonom .....                                     | 32 |

**KAZALO GRAFIKONOV**

|                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Grafikon 1: Definicija koeficienta lepenja.....                                                            | 20 |
| Grafikon 2: Sprememba strižne napetosti v odvisnosti od horizontalnega premika pri preizkušancu 1.....     | 21 |
| Grafikon 3: Sprememba vertikalnega premika v odvisnosti od horizontalnega premika pri preizkušancu 1.....  | 22 |
| Grafikon 4: Strižna premica preizkušanca 1.....                                                            | 22 |
| Grafikon 5: Sprememba strižne napetosti v odvisnosti od horizontalnega premika pri preizkušancu 2.....     | 23 |
| Grafikon 6: Sprememba vertikalnega premika v odvisnosti od horizontalnega premika pri preizkušancu 2.....  | 23 |
| Grafikon 7: Strižna premica preizkušanca 2.....                                                            | 24 |
| Grafikon 8: Sprememba strižne napetosti v odvisnosti od horizontalnega premika pri preizkušancu 3.....     | 25 |
| Grafikon 9: Sprememba vertikalnega premika v odvisnosti od horizontalnega premika pri preizkušancu 3.....  | 25 |
| Grafikon 10: Strižna premica preizkušanca 3.....                                                           | 26 |
| Grafikon 11: Koeficienti lepenja preizkušanca 3.....                                                       | 26 |
| Grafikon 12: Sprememba strižne napetosti v odvisnosti od horizontalnega premika pri preizkušancu 4.....    | 28 |
| Grafikon 13: Sprememba vertikalnega premika v odvisnosti od horizontalnega premika pri preizkušancu 4..... | 28 |
| Grafikon 14: Strižna premica preizkušanca 4.....                                                           | 29 |
| Grafikon 15: Koeficienti lepenja preizkušanca 4.....                                                       | 29 |

## 1 UVOD

Kakovost bivalnega okolja in varčevanje z energijo postajata vse bolj pomembna dejavnika pri graditvi objektov. V zadnjih letih močno posegata tudi na področje toplotne zaščite stavb. Investitorji težijo k čim manjši porabi energije za ogrevanje stavb in k ohranjanju toplote v stavbi ter s tem povezanimi manjšimi stroški obratovanja. V takšno razmišljanje nas usmerjajo tudi pravilniki in zakonodaja, ki prav tako vse bolj poudarjajo skrb za okolje in ohranjanje energije ter spodbujajo pasivno gradnjo.

Toplotnih izgub ne moremo preprečiti samo z osnovnimi konstruktivnimi materiali, katerih glavna funkcija je zagotavljanje nosilnosti, zato je potrebna vgradnja toplotnoizolacijskih materialov, ki ne le preprečujejo nastanek toplotnih mostov, ampak tudi zaščitijo nosilno konstrukcijo pred vremenskimi vplivi. Prispevajo pa tudi h kakovosti bivalnega okolja, saj zaradi ohranjanja toplote pripomorejo k večjemu ugodju v stavbi (AURE, 2003).

Nezanemarljiv del toplote se izgublja tudi skozi tla (približno od 5 do 10 % (Norik, 2017)), kar je kljub navidezno majhnemu deležu treba preprečiti, da zagotovimo ravnotežje prehodov toplote skozi posamezne sklope ovoja stavbe (Tekavec, 2015a). Zato se je pričelo uveljavljati temeljenje na temeljni plošči, podloženi s toplotno izolacijo. Proizvajalci ponujajo možnosti uporabe različnih materialov, konstrukcijskih sklopov in tehnologij, ki pa še vedno niso splošno uveljavljene, saj vzbujajo pri investitorjih dvome glede varnosti in nenazadnje nujnosti takšnega temeljenja. Zato se tej temi posveča tudi vse več raziskav, spodbudila pa je tudi izdelavo pričujoče diplomske naloge.

V prvem delu diplomske naloge so predstavljeni pravilniki, ki nas usmerjajo v pravilno izvedbo energijsko varčnih stavb, ter zakonodaja, ki jo moramo upoštevati, da zadostimo zahtevam glede učinkovite rabe energije. S tem je v veliki meri povezana uporaba temeljne plošče, ki pri izvedbi neprekinjenega stavbnega ovoja ponuja številne prednosti pred uporabo pasovnih temeljev. Predstavljeni so še materiali, ki jih lahko vgradimo za toplotno zaščito temeljev, in postopek izvedbe toplotnega izoliranja, ki je v praksi pogosto nepravilno upoštevan, zato ni dosežena ustrezna zaščita pred vodo, zmrzaljo in uhajanjem toplote.

V drugem delu je opredeljena problematika stabilnosti toplotno izolirane temeljne plošče. Skladno z Evrokodom 7 moramo preveriti, da nobeno geotehnično projektno stanje ne presega mejnega stanja nosilnosti in mejnega stanja uporabnosti. V okviru kontrole mejnih stanj nosilnosti je zato potrebna kontrola ravnotežja konstrukcije (možnost zdrsa in prevrnitve) ter možnosti porušitve ali prekomernega deformiranja. Prevelike pomike, zasuke in neugodne vibracije pa preverjamo z mejnimi stanji uporabnosti. Zanimal nas je predvsem zdrs ekstrudiranega polistirena (XPS) na peščeni podlagi. Preverjali smo ga z direktno strižno

preiskavo, preko katere smo prišli do koeficientov lepenja, ki smo jih primerjali s koeficienti lepenja, do katerih je v svoji raziskavi prišel Janez Mikec (2014). Koeficient lepenja smo definirali kot razmerje med strižno napetostjo ob prvi prevojni točki in normalno napetostjo.

## **2 PRAVILNIKI IN ZAKONODAJA**

### **2.1 Evropska direktiva 2010/31/UE in Okvir podnebne in energetske politike do 2030**

Evropski svet je leta 2007 sprejel ukrepe Evropske unije v zvezi s podnebnimi spremembami in energijo. V ukrepih, poimenovanih »20-20-20« do 2020, so predstavljeni naslednji cilji:

- zmanjšanje emisij toplogrednih plinov za 20% glede na raven v letu 1990, ob ustreznih pogojih pa celo za 30 %,
- zmanjšanje rabe primarne energije (fosilnih goriv) s povečanjem energetske učinkovitosti za 20 %,
- povečanje deleža obnovljivih virov v primarni energijski bilanci na vsaj 20 % (Energetska učinkovitost, 2017).

Ukrepi se v veliki meri navezujejo na gradbeništvo, saj predstavlja raba energije v stavbah kar 40 % celotne rabe energije v Evropski uniji, zato so v direktivi predlagane tudi smernice za doseganje energetske učinkovitosti stavb (Energetska izkaznica, 2017).

Januarja 2014 pa je Evropska komisija sprejela Okvir podnebne in energetske politike do leta 2030, ki se navezuje na obdobje 2020–2030 in spodbuja nadgradnjo ukrepov »20-20-20« (Evropski svet, 2015).

Evropska komisija si je za leto 2030 zadala naslednje ukrepe za konkurenčnost, zanesljivost in trajnost gospodarstva in energetskega sistema Evropske unije:

- zmanjšanje emisij toplogrednih plinov za 40 % glede na leto 1990,
- povečanje deleža energije iz obnovljivih virov na vsaj 27 % skupne porabe,
- izboljšanje energetske učinkovitosti za vsaj 27 % (Evropski svet, 2015).

### **2.2 Energetski zakon (EZ-1)**

Zakon temelji na Direktivi 2013/31/EU Evropskega parlamenta in Sveta o energetske učinkovitosti stavb. Določa, da morajo biti po 31. 12. 2018 vse nove stavbe, ki so v lasti Republike Slovenije ali samoupravnih lokalnih skupnosti in jih uporabljajo osebe javnega sektorja, skoraj nič-energijske, do 31. 12. 2020 pa še vse nove stavbe, ki za svoje delovanje porabljajo energijo za ogrevanje in/ali hlajenje (Portal Energetika, 2017).

Zakon definira »skoraj nič-energijsko stavbo« kot stavbo »z zelo visoko energetsko učinkovitostjo oziroma zelo majhno količino potrebne energije za delovanje, pri čemer je potrebna energija v veliki meri proizvedena iz obnovljivih virov na kraju samem ali v bližini« (Portal Energetika, 2017).

### **2.3 Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah (PURES) in Tehnična smernica TSG-1-004:2010 – učinkovita raba energije**

PURES določa »tehnične zahteve, ki morajo biti izpolnjene za učinkovito rabo energije v stavbah na področju toplotne zaščite, ogrevanja, hlajenja, prezračevanja ali njihove kombinacije, priprave tople vode in razsvetljave v stavbah, zagotavljanja lastnih obnovljivih virov energije za delovanje sistemov v stavbi ter metodologijo za izračun energijskih lastnosti stavbe v skladu z Direktivo 31/2010/EU Evropskega parlamenta in Sveta z dne 19. maja 2010 o energetski učinkovitosti stavb (UL L št. 153 z dne 18. 6. 2010, str. 13)« (Pures, 2010).

Zahteve iz pravilnika so izpolnjene z upoštevanjem gradbenih ukrepov oziroma rešitev, ki jih podaja Tehnična smernica za graditev TSG-1-004:2010, katere uporaba je obvezna. Tehnična smernica določa tudi metodologijo za izračun energijskih lastnosti stavbe.

Na podlagi tehnične smernice je treba pri zagotavljanju učinkovite rabe energije v stavbah »upoštevati celotno življenjsko dobo stavbe, njeno namembnost, podnebne podatke, materiale konstrukcije in ovoja, lego in orientiranost, parametre notranjega okolja, vgrajene sisteme in naprave ter uporabo obnovljivih virov energije« (TSG, 2010).

»Stavbo je treba zasnovati in graditi tako, da je energijsko ustrezno orientirana, da je razmerje med površino toplotnega ovoja stavbe in njeno kondicionirano prostornino (neto prostornina stavbe, ki jo obdaja površina toplotnega ovoja stavbe) z energijskega stališča ugodno, da so prostori v stavbi energijsko optimalno razporejeni, in da materiali in elementi konstrukcije ter celotna zunanja površina stavbe omogočajo učinkovito upravljanje z energijskimi tokovi« (TSG, 2010).

Namen toplotne zaščite ovoja stavbe in ločilnih elementov delov stavbe, ki imajo različne režime notranjega toplotnega ugodja, je:

- zmanjšanje prehoda energije skozi površino toplotnega ovoja stavbe,
- zmanjšanje podhlajevanja ali pregrevanja stavbe,
- zagotovitev zaščite gradbene konstrukcije pred difuzijskim prehodom vodne pare,
- nadzorovanje (uravnavanje) zrakotesnosti stavbe (TSG, 2010).

Z ustreznim projektiranjem in gradnjo stavb moramo zagotoviti zmanjšanje vpliva toplotnih mostov na letno porabo energije in na morebitno povzročanje škode stavbi ali njenim uporabnikom (TSG, 2010).

Tehnična smernica določa, da toplotna prehodnost skozi tla na terenu ne sme presegati vrednosti  $0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$  (TSG, 2010).

## **2.4 Standard SIST EN ISO 13793:2002 – Toplotne značilnosti stavb – Dimenzioniranje toplotnih lastnosti temeljev proti dviganju zaradi zmrzovanja (ISO 13793:2001)**

Tvorba ledenih leč, ki nastanejo zaradi zamrznitve zemljine pod temelji, lahko privede do dviga temeljev, v času taljenja pa lahko povzroči izpiranje finih delcev zemljine in s tem diferenčno posedanje (Tekavec, 2015b). Zato standard SIST EN ISO 13793:2002 določa, da mora globina temeljenja segati pod globino zmrzovanja. Drugi možen ukrep je odstranitev zemljine, ki je dovzetna za zmrzovanje, do globine zmrzovanja in nadomestitev odstranjene zemljine z zmrzlinso odpornim in dreniranim nasipnim materialom. Ponuja pa se še možnost izoliranja temeljev. Ta ukrep je v standardu omenjen kot najbolj ekonomičen, predvsem v območjih s hladnejšim podnebjem, saj omogoča izvedbo plitvejšega temeljenja. Standard podaja metode za določitev širine, globine, toplotne upornosti in lege toplotne izolacije (SIST EN ISO 13793:2002).

Omenjeni standard se uporablja v kombinaciji z drugimi standardi:

- SIST EN ISO 6946:2008 – Gradbene komponente in gradbeni elementi – Toplotna upornost in toplotna prehodnost – Računska metoda,
- SIST EN ISO 7345:1997 – Toplotna izolacija – Fizikalne količine in definicije,
- SIST EN ISO 10211:2008 – Toplotni mostovi v stavbah – Toplotni tokovi in površinske temperature – Podrobni izračuni,
- SIST EN ISO 10456:2008 – Gradbeni materiali in proizvodi – Higrotermalne lastnosti – Tabelirane računske vrednosti in postopki za določevanje nazivnih in računskih vrednosti toplotnih vrednosti,
- SIST EN ISO 13370:2008 – Toplotne karakteristike stavb – Prenos toplote skozi zemljo – Računske metode.

### 3 ZASNOVA KONSTRUKCIJSKEGA SKLOPA TOPLOTNO IZOLIRANIH TEMELJEV

#### 3.1 Temeljna plošča

Pri gradnji nizkoenergijske, pasivne ali skoraj nič-energijske hiše se moramo izogniti nastanku toplotnih mostov. Preprečimo ga z izvedbo neprekinjenega ovoja toplotne izolacije okoli stavbe, zato je pri temeljenju najboljša izbira temeljna plošča, podložena s toplotno izolacijo (Tekavec, 2015a). Izvede se kot armiranobetonska plošča. Deluje kot »pasivno ogrevalo«, saj lahko akumulira veliko toplote (kar je ugodno predvsem v primeru talnega gretja) in zagotavlja stabilno temperaturo prostora (Vide Lutman, 2009).

Uporaba temeljne plošče je primerna za vse vrste konstrukcijskih sistemov (montažna, skeletna, opečna, porobeton in sistem opažnih zidakov) (JUBHome, 2017a). Gradimo jo lahko tudi na manj nosilnem in manj homogenem terenu, saj se napetosti pod njo širše in enakomerneje razporedijo pri prenosu obtežbe na temeljna tla (Tekavec, 2015a).

Debelina temeljne plošče je pogojena z gostoto in razporeditvijo notranjih nosilnih sten in s kvaliteto temeljnih tal. Od debeline temeljne plošče je odvisna tudi količina vgrajenega betona, ki je običajno nekoliko večja kot pri pasovnih temeljih (Tekavec, 2015a). Sicer pa je poraba betona lahko velika tudi pri pasovnih temeljih, saj je lahko zaradi globine dna pasovnih temeljev, ki mora biti spuščeno pod globino zmrzovanja (na nadmorski višini, manjši od 500 m, je ta pri sredozemskem podnebju najmanj 40 cm, pri kontinentalnem 80 cm, v gorskem podnebju pa od 80 do 120 cm) z upoštevanjem od 10 do 20 cm rezerve (Majes, 2017).

Temeljna plošča je v primerjavi s pasovnimi temelji dražja na račun večje količine vgrajenega betona (Tekavec, 2015a), vendar omogoča zagotavljanje boljše toplotne učinkovitosti, kar pomeni manjše stroške obratovanja stavbe. K prihranku doprinese še možnost uporabe toplotne izolacije z manjšo tlačno trdnostjo in manjše debeline toplotne izolacije (Zbašnik Senegačnik, 2010). Armiranje temeljne plošče je zaradi uporabe armaturnih mrež in s tem manjše potrebe po vezanju enostavnejše (Tekavec, 2015a). K zmanjšanju stroškov in k hitrejšemu delu pripomoreta še manjši izkop in manjša količina opaža. Ta se izdelava samo po obodu temeljne plošče, pogosto pa zaradi izvedbe »toplotnoizolacijske kadi« uporaba klasičnega opaža niti ni potrebna, zato je izdelava temeljne plošče še hitrejša in kvalitetnejša. Preprečen je tudi nastanek toplotnih mostov, neprekinjen hidroizolacijski sloj pa temeljno ploščo še bolje ščiti pred talno vlago in talno vodo pod pritiskom (JUBHome, 2017a).

Edina večja prednost pasovnih temeljev je možnost naknadne izdelave ali spremembe horizontalnih razvodov kanalizacije, kar je potrebno pri temeljni plošči izvesti pred gradnjo (Tekavec, 2015a).

Pri dimenzioniranju temeljne plošče moramo zaradi velike kontaktne površine upoštevati interakcijo posedkov tal in temeljne konstrukcije. Za izračun vertikalnih premikov (posedkov) in notranjih sil v temeljni plošči (momentov in prečnih sil) pogosto uporabljamo Winklerjev model, ki pa zaradi upoštevanja konstantne vrednosti modula reakcije tal in linearnega odnosa med kontaktnim tlakom in posedkom ni popolnoma zanesljiv. Ustreznejša je uporaba metode psevdopovezanih vzmeti, saj za razliko od Winklerjevega modela v izračun vključuje tudi strižno odpornost temeljnih tal (Pulko, 2012). Ker se temeljna plošča na toplotni izolaciji obnaša kot togo telo na elastični podlagi, je vertikalni modul reakcije tal sestavljen iz modula reakcije osnovnih tal  $k_z$  in prispevka toplotne izolacije pod talno ploščo  $k_{TI}$ . Pri dimenzioniranju moramo del temeljne plošče, pod katerim se pri horizontalni obtežbi pojavijo natezne napetosti, izločiti iz sodelujoče kontaktne površine (Tekavec, 2016a).

### 3.2 Toplotnoizolacijski materiali

Na izbiro toplotnoizolacijskega materiala vpliva veliko različnih dejavnikov, pomembni pa sta predvsem toplotna prevodnost  $\lambda$  [W/mK] in toplotna prehodnost  $k$  [W/m<sup>2</sup>K], ki opiše, kolikšne so toplotne izgube skozi površine ovoja stavbe (AURE, 2003).

Ker je treba upoštevati, da je toplotna izolacija pod temeljno ploščo obremenjena z obtežbo stavbe ter s pasivnimi in aktivnimi pritiski, stalno izpostavljena vodi, zemeljski vlagi, zmrzovanju in odtajanju (Fibran Nord, 2017b), pa so pomembne še lastnosti materiala kot so trdnost in deformabilnost, požarna odpornost, trajnost, difuzijska prepustnost ter občutljivost na navlaževanje. Na izbiro vpliva še enostavnost, način ter mesto vgradnje, nenazadnje pa tudi cena materiala in izvedbe. Pozornost pa moramo nameniti tudi vsebnosti škodljivih snovi, porabi energije pri proizvodnji ter možnosti reciklaže materiala (AURE, 2003).

Minimalne tehnične zahteve, ki jim mora zadostiti toplotna izolacija v zemljini so naslednje:

- minimalna tlačna trdnost 300 kPa,
- maksimalna vodovpojnost pri difuziji 0,7 vol. %,
- maksimalna vodovpojnost pri dolgotrajni potopitvi 5 vol. % (Fibran Nord, 2009).

Kot toplotnoizolacijski materiali se pod temeljno ploščo uporabljajo ekstrudiran polistiren (XPS), ekspandiran polistiren (EPS) in penjeno steklo (FG).

Preglednica 1 prikazuje primerjavo informativnih lastnosti ekstrudiranega polistirena (XPS), ekspandiranega polistirena (EPS) in penjenega stekla (FG).

Preglednica 1: Informativne lastnosti toplotnoizolacijskih materialov (Tekavec, 2015a; AURE, 2003; Zegowitz, 2010)

| Material                                                                                                         | XPS         | EPS         | FG          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Tlačna trdnost (10 %) [kPa]</b>                                                                               | 300–700     | 300–400     | 300–820     |
| <b>Računska tlačna trdnost [kPa]</b>                                                                             | 180–350     | 130–170     | 200–370     |
| <b>Toplotna prevodnost [W/mK]</b>                                                                                | 0,035–0,040 | 0,033–0,040 | 0,080–0,115 |
| <b>Potrebna debelina za <math>U = 0,2 \text{ W/m}^2\text{K}</math> [cm]</b>                                      | 16–20       | 16–19       | 40–58       |
| <b>Relativni strošek za material brez vgradnje za <math>k = 0,4 \text{ W/m}^2\text{K}</math> [ ]<sup>1</sup></b> | 1,00        | 0,31–0,36   | 1,62–1,80   |
| <b>Dolgotrajno navzemanje vode pri potopitvi [%]</b>                                                             | < 0,7       | < 2,0       | /           |

### 3.2.1 Ekstrudiran polistiren (XPS)

Ekstrudiran polistiren (XPS) je trden in homogen material, narejen iz kristalno čistega visoko temperaturno obstojnega penjenega polistirena (termoplastičnega polimera iz stirena), barve, pudra in raznih dodatkov. Penjenje se izvede s pomočjo penilcev v kombinaciji s CO<sub>2</sub>, ki se v celicah sčasoma izmenjajo z zrakom. Plošče iz XPS-a se izdelujejo s postopkom ekstrudiranja (iztiskanja) polistirenske pene (Fibran Nord, 2017a). Razrežejo se v pravilne pravokotne oblike. Njihova površina je lahko gladka ali ima utore, robovi pa imajo običajno obliko črke L, zaradi česar je njihova vgradnja enostavnejša in natančnejša, nastanek toplotnih mostov pa je preprečen. Dobavljive so plošče različnih deklariranih tlačnih trdnosti (300, 400, 500 in 700 kPa) (Fibran Nord, 2017b). Proizvodnja XPS-a je, zaradi uporabe škodljivih CFC plinov in zaradi večje porabe energije, okolju manj prijazna kot proizvodnja EPS-a (AURE, 2003).

XPS ima zaprto celično strukturo, v večini zapolnjeno z zrakom, zato ima majhno gostoto in je odličen toplotni izolator (Fibran Nord, 2017a). Zaradi velike tlačne trdnosti in vodoodbojnosti je zelo primeren za izoliranje temeljne plošče (AURE, 2003). Ima nekajkrat višjo ceno od EPS-a, vendar se veliko bolje obnese v stiku z vodo, saj ima minimalno vodovpojnost pri dolgotrajni izpostavljenosti vodi in vlagi ter minimalno dolgotrajno difuzijsko vpojnost, ima pa tudi višjo trdnost (AURE, 2003). Njegova vgradnja je enostavna in cenovno ugodna (Finance, 2012).

Mravlje in glodavci ne uživajo polistirenov, lahko pa se v njih nastanijo, kar lahko preprečimo z namestitvijo hidroizolacije ali sloja armiranega cementnega lepila na izpostavljene dele toplotne izolacije. Geotehnični polistireni ne trohnijo ter ne omogočajo razvoja plesni in lišajev.

<sup>1</sup> Kot referenčni podatek je uporabljen relativni strošek XPS-a.

Največjo nevarnost za polistirene predstavlja razlitje ogljikovodikovih goriv v bližini, saj le-ti zaradi enake kemijske osnove raztapljajo polistirene. Zato je priporočljivo, da toplotno izolacijo zaščitimo s folijami ali drugimi zaščitnimi prevlekami (Tekavec, 2015a).

Po gorljivosti spada XPS v razred E, kar pomeni, da je težko vnetljiv (Fibran Nord, 2017a).

Preglednica 2: Lastnosti ekstrudiranih polistirenov XPS 400 in XPS 700 (Fibran Nord, 2017b; Fibran Nord, 2017f; Kilar, 2013a; Norik, 2017)

| Material                                                                                                        | XPS 400                                  | XPS 700                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|
| <b>Nazivna tlačna trdnost ob dolgotrajni obremenitvi; deklarirana tlačna trdnost pri deformaciji 10 % [kPa]</b> | 400                                      | 700                                      |
| <b>Računska tlačna trdnost ob dolgotrajni obremenitvi [kPa]</b>                                                 | 215                                      | 285                                      |
| <b>Nazivna vrednost tlačne trdnosti pri deformaciji &lt; 2 % [kPa]</b>                                          | 150                                      | 200                                      |
| <b>Deklarirana toplotna prevodnost (po 25-ih letih) [W/mK]</b>                                                  | 0,035 (d = 100 mm)<br>0,040 (d = 200 mm) | 0,035 (d = 100 mm)<br>0,040 (d = 200 mm) |
| <b>Dolgotrajno navzemanje vode pri potopitvi (pri zglašeni površini) [vol. %]</b>                               | 0,3                                      | 0,4                                      |
| <b>Dolgotrajno navzemanje vode pri difuziji [vol. %]</b>                                                        | 1,5                                      | 1,2                                      |
| <b>Modul elastičnosti [MPa]</b>                                                                                 | 25                                       | 40                                       |
| <b>Strižna trdnost [MPa]</b>                                                                                    | 0,14                                     | 0,22                                     |
| <b>Strižni modul [MPa]</b>                                                                                      | 4,5                                      | 7,5                                      |
| <b>Temperaturni razteznostni koeficient <math>\alpha_{+20-+70\text{ °C}}</math> [mm/mK]</b>                     | 0,075                                    | 0,075                                    |
| <b>Temperaturno območje uporabe [°C]</b>                                                                        | Od - 50 do + 75                          |                                          |

### 3.2.2 Ekspandiran polistiren (EPS)

Ekspandirani polistiren, znan tudi kot stiropor, je trden organski penjen material zaprte celične strukture (AURE, 2003). Snežno bela zrna ekspandiranega polistirena imajo obliko poliedra, polnjenega z zrakom. Kljub veliki vsebnosti zraka ima EPS zaradi uporabe zrn z manjšo ekspanzijo in večjo nosilnostjo sten celic trdno nosilno strukturo (Tekavec, M. 2016b). Zrna se med seboj zlepijo ob prisotnosti nasičene pare pri 110 do 120 °C (AURE, 2003). Sodobni procesi proizvodnje ekspandiranega polistirena so precej manj škodljivi okolju, saj temeljijo na pentanu in ne na škodljivih plinih (CFC, HCFC) (AURE, 2003). Ker polistirenu niso dodana

druga veziva, ga lahko v celoti recikliramo (Kunič, 2010). Pogosto ima prednost pri izbiri tudi zaradi nizke cene v primerjavi z drugimi materiali (AURE, 2003). Ima izredno dolgo življenjsko dobo in je dimenzijsko stabilen (Kunič, 2010).

Zaradi zaprte celične strukture je, razen v primeru izpostavljenosti dolgotrajnemu delovanju vode pri spreminjanju temperature in tlaka (AURE, 2003), odporen na vodo (navzemanje vode je večinoma le površinsko), vpojnost vode pri zemeljski vlagi pa je zanemarljiva (Tekavec, 2016b). Odporen je tudi na zmrzal ter na anorganske kisline in soli (AURE, 2003). Enako kot toplotno izolacijo iz XPS-a, moramo tudi toplotno izolacijo iz EPS-a zaščititi pred razlitjem ogljikovodikovih goriv, ki raztapljajo polistiren. Prav tako pa ne gnije, ne propada, ne trohni ter ne privablja mravelj in glodavcev (Tekavec, 2015b).

Toplotna prevodnost EPS-a je med 0,033 W/mK in 0,04 W/mK (AURE, 2003). Njegova tlačna trdnost narašča premo sorazmerno z gostoto (Tekavec, M. 2016b). Zaradi majhne teže je, predvsem v fazi vgradnje, podvržen nevarnosti vzgona ob potopitvi ali poplavljanju (Kunič, 2010). Njegova slabost je tudi neodpornost na ogenj in temperature preko 80 °C, saj se ob prisotnosti plamena in visoke temperature prične topiti (spada v razred gorljivosti E) (AURE, 2003). Na zmanjšanje kakovosti materiala lahko vpliva že daljši transport pri višjih temperaturah. Pretirano segrevanje namreč povzroči počasno izhlapevanje plinov iz zrn (Karlošek, 2007).

Preglednica 3: Lastnosti ekspanziranih polistirenov EPS 300 in EPS 400 (JUBHome, 2017b)

| Material                                                                                                 | EPS 300         | EPS 400 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------|
| Nazivna tlačna trdnost ob dolgotrajni obremenitvi; deklarirana tlačna trdnost pri deformaciji 10 % [kPa] | 300             | 400     |
| Nazivna vrednost tlačne trdnosti pri deformaciji < 2 % [kPa]                                             | 90              | 120     |
| Deklarirana toplotna prevodnost (po 25-ih letih) pri debelini 100 mm [W/mK]                              | 0,033           | 0,033   |
| Dolgotrajno navzemanje vode pri potopitvi (pri zglajeni površini) [vol. %]                               | 1               | 1       |
| Dolgotrajno navzemanje vode pri difuziji [vol. %]                                                        | 1               | 1       |
| Modul elastičnosti [MPa]                                                                                 | 15              | 20      |
| Strižni modul [MPa]                                                                                      | 6,5             | 8,6     |
| Temperaturno območje uporabe [°C]                                                                        | Od - 30 do + 75 |         |
| Gostota [kg/m <sup>3</sup> ]                                                                             | 43              | 52      |

### 3.2.3 Penjeno steklo (FG)

Penjeno steklo je toplotnoizolacijski material z zaprto celično stekleno strukturo. Izdelan je iz recikliranega stekla in naravnih dodatkov (Tekavec, 2015a). Steklene vezi pripomorejo k veliki tlačni trdnosti, zaprtost celic pa k popolni vodotesnosti, preprečevanju kapilarnosti (Glapor, 2017) in odpornosti na zmrzal (Geocell Schaumglas, 2017). Po vgradnji znaša poroznost oblikovane strukture med 30 in 35 % in deluje kot drenaža (odvaja vodo). Granule agregata se po vgradnji zagostijo med seboj, zato je material tudi oblikovno stabilen. Je trajen, obstojen na staranje, odporen proti kemičnim vplivom ter proti napadu žuželk in glodavcev, inerten (ne absorbira snovi iz okolice, niti jih ne izloča). Ima nizko težo (gostota razsutega materiala je med 130 in 160 kg/m<sup>3</sup>, v zgoščenem stanju pa med 170 in 210 kg/m<sup>3</sup>), kar v kombinaciji z medsebojno zagostjenostjo zrn pripomore k izboljšanju nosilnosti tal (Glapor, 2017). Je pa tudi dober zvočni izolator (PasivnaGradnja.si, 2012).

Spada v razred gorljivosti A1, kar pomeni, da je negorljivo (točka zmeščanja je pri temperaturi 700 °C) (Glapor, 2017).

Vgradnja penjenega stekla je hitra in enostavna. Pod temeljno ploščo se običajno vgrajuje v obliki granulata, zrnivosti od 32 do 64 mm. Ustrezno zbitost granulata zagotovimo z uvaljanjem z lažjimi komprimacijskimi sredstvi (Tekavec, 2015a). Debelina zbite plasti izolacije iz penjenega stekla je med 15 in 60 cm (Glapor, 2017). Njegova slabost je velika poraba energije za proizvodnjo in visoka cena (AURE, 2003).

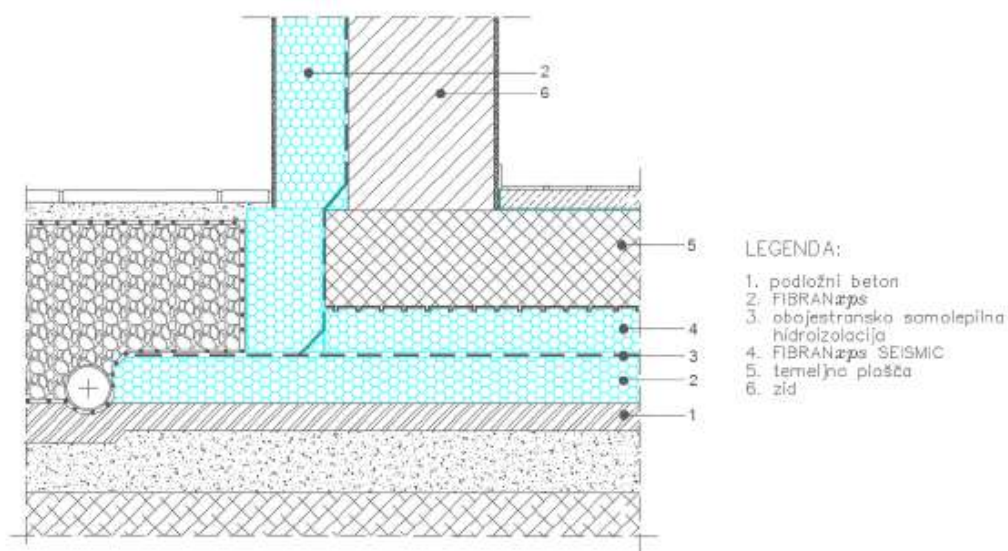
Preglednica 4: Lastnosti agregata iz penjenega stekla (Glapor, 2017; Zegowitz, 2010)

| Material                                                                                                      | Agregata iz penjenega stekla |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Nazivna tlačna trdnost zrna ob dolgotrajni obremenitvi; deklarirana tlačna trdnost pri deformaciji 10 % [kPa] | 300–820                      |
| Nazivna vrednost tlačne trdnosti pri deformaciji < 2 % [kPa]                                                  | 370                          |
| Deklarirana toplotna prevodnost (po 25-ih letih) pri debelini 100 mm [W/mK]                                   | 0,080–0,115                  |
| Specifična toplota [J/kgK]                                                                                    | 850                          |
| Gostota razsutega materiala [kg/m <sup>3</sup> ]                                                              | 130–160                      |
| Gostota v zgoščenem stanju [kg/m <sup>3</sup> ]                                                               | 170–210                      |
| Poroznost $n$ pri komprimiranem stanju [vol. %]                                                               | 30–35                        |
| Strižni kot $\phi$ [°]                                                                                        | 40–50                        |

### 3.3 Vgradnja toplotne izolacije pod temeljno ploščo

V Sloveniji moramo pri gradnji stavb upoštevati lego na potresno aktivnem območju. Temu dejstvu je treba prilagoditi tudi izvedbo toplotne zaščite stavb. Kot najbolj ugodna se je izkazala uporaba »temeljne blazine« (toplotno izolirane temeljne plošče s potresno varno zasnovo) (Fibran Nord, 2017d), pri kateri se pod temeljno ploščo vgradi toplotna izolacija z utori, ki potekajo v eni smeri na zgornji strani toplotnoizolacijske plošče, omogočajo pa boljšo sprijemnost z betonom (Mikec, 2014). Prednost takšne izvedbe je predvidljivo in kontrolirano obnašanje stavbe pri potresu in ublažitev morebitnih potresnih sunkov (Fibran Nord, 2017d).

Da zadostimo pogojem potresne varnosti in zaščite pred vodo, vlago in zmrzaljo ter preprečimo izgubo toplote, moramo natančno vgraditi in povezati vse elemente konstrukcijskega sklopa. V nadaljevanju je opisan postopek gradnje temeljne plošče, podložene z XPS ploščami, sledi pa predstavitev vgradnje agregata iz penjenega stekla.



Slika 1: Prikaz enega od možnih konstrukcijskih sklopov s toplotno izolacijo XPS pod temeljno ploščo  
(Fibran Nord, 2017c)

Začnemo z izkopom gradbene jame do nosilnih tal. Lahko izvedemo:

- globlji izkop, pri katerem mora spodnji rob temeljne plošče segati pod globino zmrzovanja, s čimer preprečimo poškodbe konstrukcije zaradi zmrzovanja in taljenja zemljine (Mojmojster, 2017),
- plitvejši izkop, pri katerem moramo povečati obodno širino polaganja prvega sloja toplotne izolacije, s čimer dosežemo, da je pot hladu daljša, zato je učinek podoben kot pri temeljenju pod globino zmrzovanja (Fibran Nord, 2017e).

Sledi namestitvev instalacij, ureditev odvodnjavanja ter izravnava in komprimacija površine z enakomerno uvaljanim tamponskim slojem iz gramoza. Potrebna je še natančnejša izravnava s podložnim (pustim) betonom ali utrjenim finim peskom, frakcije 0–4 mm (Fibran Nord, 2017e). Najmanjša priporočena kvaliteta podložnega betona je C12/15, najmanjša debelina pa 7 cm (JUBHome, 2017b). Na pripravljeno podlago položimo prvi sloj toplotnoizolacijskih plošč, katerih debelino in tlačno trdnost določi projektant. Na potresno ogroženih območjih je treba v primeru uporabe XPS-a uporabiti toplotnoizolacijske plošče z deklarirano tlačno trdnostjo vsaj 400 kPa. Plošče lahko položimo v enem ali v več slojih, odvisno od želene debeline toplotnoizolacijske podlage in s tem povezane toplotne zaščite. Skladno z zahtevami PURES-a moramo uporabiti vsaj 12 cm toplotne izolacije, priporočljivo pa je, da debelina znaša med 20 in 36 cm (Finance, 2012). Plošče med seboj tesno povežemo, da preprečimo nastanek toplotnih mostov, kar nam omogočajo tudi robovi plošče v obliki črke »L«. Toplotnim mostovom pa se ne moremo izogniti na mestih vertikalnih vodov, ki jih moramo prav tako zaščititi pred poškodbami v primeru delovanja večjih strižnih sil (Fibran Nord, 2017e).



Slika 2: Polaganje toplotnoizolacijskih plošč iz ekstrudiranega polistirena (Varčujem z energijo, 2014)

Med spodnji in zgornji sloj toplotne izolacije namestimo dvostransko samolepilno hidroizolacijo. Armiranobetonsko ploščo vgradimo v vnaprej pripravljeni opaz neposredno na zgornjo plast toplotne izolacije, saj je bilo dokazano, da je sprijemnost betona in toplotnoizolacijskih plošč boljša, če vmes ni tesnilne folije (Fibran Nord, 2017d).

Preostane še izdelava stika z zunanjo steno in izgradnja talne konstrukcije. Ta je precej enostavnejša kot pri klasični gradnji, saj ni potrebe po dodatni hidroizolaciji ali toplotni izolaciji (Fibran Nord, 2017e). Še vedno je sicer mogoče toplotno izolacijo položiti tudi na zgornjo stran temeljne plošče, vendar to ne izboljša toplotnih razmer v stavbi. Kvečjemu jih poslabša, saj se

»ravnina rosišča premakne v izolacijo nad temeljno ploščo, kar poveča tveganje za kondenzacijo v vogalu tal s stenom« (Kralj Dušević, 2016).

Izvedba toplotne izolacije iz penjenega stekla je še enostavnejša. Začne se z izkopom gradbene jame, ki mora segati minimalno 30 cm nad nivo podtalnice, in razgrnitvijo filtrnega geosintetika. Sledi nasutje in izravnavo agregata iz penjenega stekla. Ta se nanaša v plasteh, ki se morajo z vibracijsko ploščo zgostiti na debelino do 30 cm oz. na skupno debelino največ 60 cm. Potrebno je še prekritje površine agregata s filtrnim geosintetikom in priprava opaža za temeljno ploščo (Glapor, 2017).



Slika 3: Penjeno steklo (PasivnaGradnja.si, 2017)

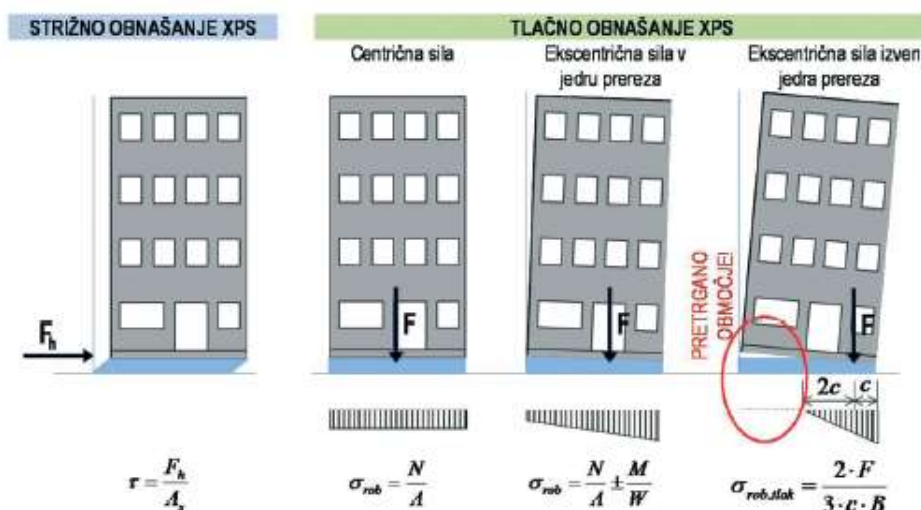
## **4 KONTROLA ZDRSA PLOŠČE IZ EKSTRUDIRANEGA POLISTIRENA NA PEŠČENI PODLAGI**

### **4.1 Opredelitev problema stabilnosti**

Zaradi lege Slovenije na potresno ogroženem območju moramo pri projektiranju upoštevati vpliv potresnih sil na objekt. Za izračun potresnih sil uporabimo projektni pospešek tal  $a_g$ , ki znaša med 0,1 g in 0,25 g, odvisno od lege objekta (ARSO, 2017). Zaradi nevarnosti potresa je potrebno v vseh elementih konstrukcijskega sklopa toplotno izolirane temeljne plošče kontrolirati možnost zdrsa. Nevarnost zdrsa na podložnem betonu je bila že večkrat obravnavana, precej manj podrobnosti pa je znanih o zdrsu na podlagi iz finega peska. Na to je v svoji diplomski nalogi opozoril tudi Mikec (2014), ki je ugotovil, da se večina zdrsov pri manjših nivojih napetosti zgodi na stiku podložnega betona in XPS plošče, pri višjih nivojih napetosti pa pride do prestriga XPS plošče. Na podlagi te predpostavke smo se v naših raziskavah osredotočili predvsem na stik med finim peskom in XPS ploščo, predpostavki primerni pa so bili tudi nižji nivoji vertikalnih obremenitev. Najprej smo določili strižne karakteristike posameznih komponent sklopa, nato pa smo določili koeficient lepenja na stiku med finim peskom in XPS ploščo.

Zaradi sočasnega delovanja vertikalne in horizontalne obtežbe lahko pride do prekoračitve tlačne in strižne nosilnosti toplotne izolacije in povečanja obremenitev na zgornji del stavbe, kar povzroči nagibanje stavbe in posledično stiskanje izolacije (Kilar, V., Azinović, B., Koren D., 2016). XPS predstavlja mehkejši sloj med podložnim betonom in temeljno ploščo, zato lahko vpliva na podaljšanje nihajnega časa stavbe. Posledično se lahko zgodi, da nihajni čas pade v drug plato spektra in se potresne sile povečajo. Z ustreznimi ukrepi je torej potrebno zagotoviti, da napetosti v toplotni izolaciji med potresom ne presežejo dovoljenih mej (Kilar, 2012).

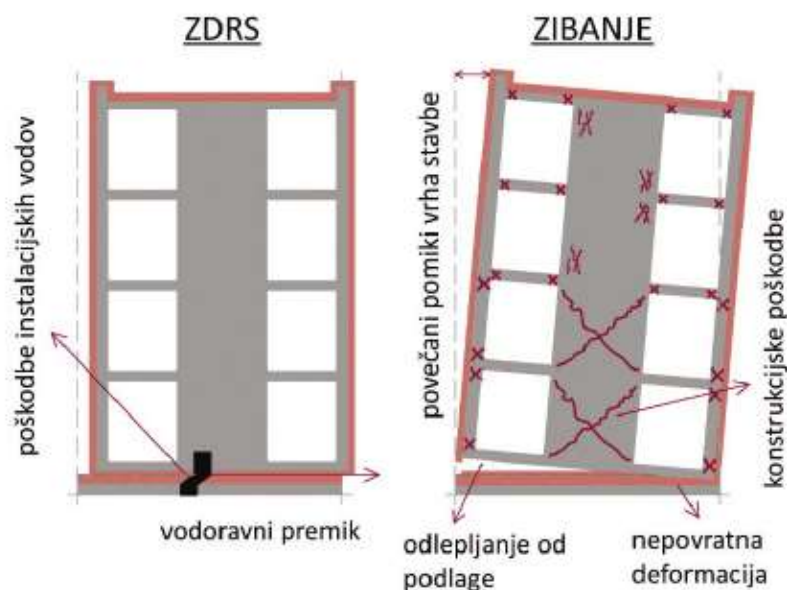
Na zdrs toplotne izolacije moramo biti pozorni predvsem pri višjih, težjih ali ožjih objektih, ki so grajeni na potresnih območjih, manjše (enodružinske) hiše pa so manj dovzetne za zdrs (Kilar, 2012).



Slika 4: Obnašanje (toge) stavbe na podajni podlagi (npr. XPS) (Kilar, 2012)

Zdrs objekta ne pomeni porušitve objekta ali dela objekta, ki bi ogrozila človeška življenja (zahteva po neporušitvi), vendar je kljub temu smiselno, da ga kontroliramo in do neke mere preprečujemo (zahteva po omejitvi poškodb), saj predstavlja posredno tveganje v smislu pretrganja instalacij (plin, elektrika) (Dolšek M., Snoj J., Žižmond J., 2015) in poškodb dostopov, stopnic (Kilar, V., Azinović, B., Koren D., 2016) in s tem povzročitve ekonomske škode. V določenih primerih bi lahko odpoved instalacij ogrozila človeška življenja, zato je instalacije potrebno izvesti tako, da velikost zdrsa ne preseže mejnega zdrsa (»mejni zdrs je tista velikost zdrsa, kateri ustreza sprejemljiva zanesljivost za dosego kriterija po neporušitvi in neogrozitvi življenj« (JUBHome, 2016)) med konstrukcijo in instalacijo, ki mora biti zagotovljen v vseh horizontalnih smereh (Dolšek M., Snoj J., Žižmond J., 2015). Zagotovimo ga s pomočjo gibljivih delov instalacijskih priključkov, običajno v sloju fasadne toplotne izolacije ali v povečani odprtini v talni plošči, napolnjeni z mehko mineralno volno (Tekavec, 2016b).

Kilar, Azinović in Koren (2016) so v svojem članku predstavili koncept temeljenja, pri katerem se zdrsi/nagibi kontrolirajo s pomočjo vgrajenih vertikalnih in horizontalnih zadrževalnikov. Po njihovih ugotovitvah opravlja toplotno izolirana armiranobetonska plošča tudi funkcijo »potresne varovalke«, ki ima bistven vpliv na povečanje potresne odpornosti stavbe. Sistem omogoča, da »se deformacija izvrši v omejenem obsegu in na predvidenem mestu« (Wallner, 2009) in na ta način omili vpliv potresnih sil na zgornji del konstrukcije pri močnejših potresnih vzburjanjih. Na voljo so trije konstrukcijski sklopi z izbranim koeficientom trenja: osnovna zaščita (kot po predpisih), izboljšana zaščita (kontroliran zdrs z malo poškodbami ali brez njih) ali visoka zaščita (potresna izolacija). Avtorji članka ugotavljajo, da je za gradnjo energijsko učinkovitih stavb na potresno ogroženih območjih trenutno najracionalnejša izbira izboljšane zaščite, saj jo je mogoče izvesti z običajnimi materiali iz prakse sodobne energijsko učinkovite gradnje in ne predstavlja večjega dodatnega stroška (Kilar, V., Azinović, B., Koren D., 2016).



Slika 5: Možno obnašanje energijsko učinkovite stavbe med potresom (Kilar, V., Azinović, B., Koren D., 2016)

Tudi Wallner (2009) ugotavlja, da je zasnova konstrukcije potresno izoliranih hiš sorodna zasnovi konstrukcije pasivnih hiš, zato lahko z manjšimi prilagoditvami zagotovimo »sinergijski učinek«. Pri obeh zasnovah je namreč zgornji (konstrukcijski) del ločen od spodnjega (zemeljskega) dela. Pri toplotno izolirani temeljni plošči običajno pride do zdrsa med posameznimi sloji konstrukcijskega sklopa, poleg tega se izolacija ob močnejših vzburjanjih obnaša povratno elastično (Fibran Nord, 2017e), zato tak sistem že sam po sebi deluje kot potresna varovalka. Treba pa je poskrbeti za pravilno izvedbo robnih detajlov, ki zamike ohranjajo v dopustnih mejah (Wallner, 2009).

Skladno s standardi Evrokod je potrebna tudi kontrola prevrnitve pri potresnem stanju, ki jo izvedemo s primerjavo momenta zaradi potresne sile po metodi z vodoravnimi silami  $F_b$  in momenta zaradi teže objekta  $W$  (Tekavec, 2016b). Prevrnitev je sicer pri običajnih družinskih hišah zaradi majhne višine praktično nemogoča (Dolšek M., Snoj J., Žižmond J., 2015).

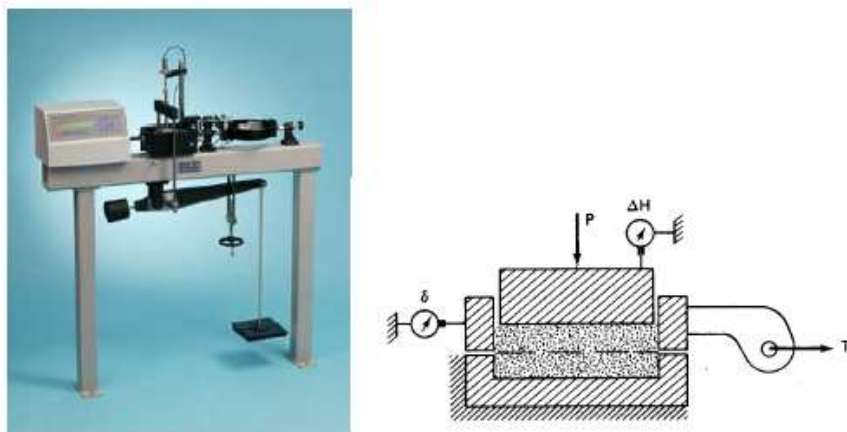
Potrebna je še kontrola lezenja materiala (krčenja pod stalno obtežbo), katerega vrednost v 50 letih ne sme preseči 2 % višine toplotnoizolacijske plošče (SIST EN 826:2013). Zaradi majhne teže običajnih družinskih hiš in zadostne togosti toplotne izolacije, ki jo mora z ustrezno izbiro vrste toplotnoizolacijskih plošč zagotoviti projektant, so te vrednosti minimalne glede na posedenje terena pod objektom (Tekavec, 2015a).

## 4.2 Materiali in metode

Strižne karakteristike materialov in kontaktov med materiali smo določili s pomočjo direktne strižne preiskave. Preiskava je bila izvedena aprila 2017 v laboratoriju Katedre za mehaniko tal z laboratorijem, na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo.

Opis opreme in postopka izvedbe direktne strižne preiskave najdemo v standardu SIST-TS CEN ISO/TS 17892-10:2004 – Geotehnično preiskovanje in preskušanje – Laboratorijsko preskušanje zemljin – 10. del: Neposredni strižni preskus (ISO/TS 17892-10:2004).

Metoda je namenjena določanju efektivne strižne trdnosti zemljine. Izvaja se v »strižni celici«, ki je razdeljena na zgornji del, ki je premičen v horizontalni smeri, in spodnji fiksni del. Postopek obsega postavitev preizkušanca v »strižno celico«, nanos vnaprej določene vertikalne obremenitve (normalne obtežbe  $\sigma_n$ ), po končani konsolidaciji zadnje bremenske stopnje pa sledi sproščanje okvirja, v katerem je preizkušanec. Nato se sproži vlečenje ali potiskanje premičnega dela celice, ki se izvaja pri konstantni hitrosti do prestriga preizkušanca. Sproti se izvaja merjenje horizontalnega premika (zdrska), vertikalnega premika in strižne sile. Striženje se mora izvajati dovolj počasi, da ne pride do nastanka presežnih pornih tlakov (efektivne napetosti morajo biti enake totalnim napetostim – drenirani pogoji) (SIST-TS CEN ISO/TS 17892-10:2004).



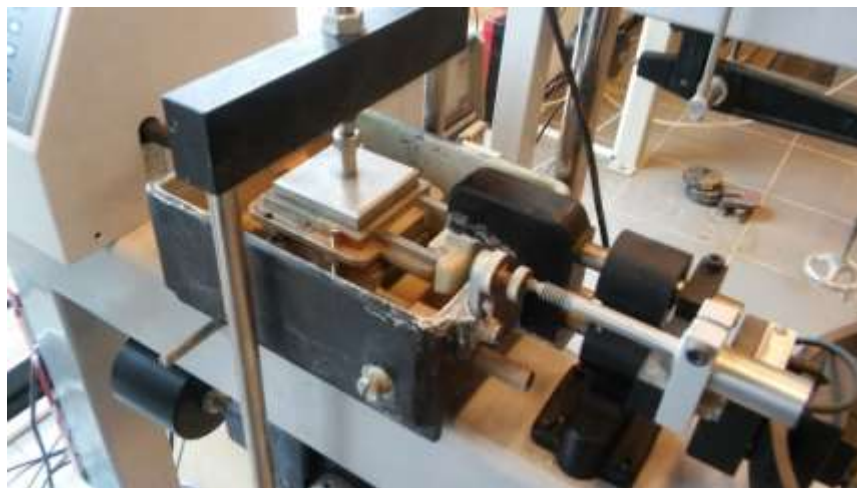
Slika 6: Direktni strižni aparat in strižna celica (KMTal, 2017)

Pri preiskavi smo uporabili plošče iz ekstrudiranega polistirena, proizvajalca Fibran, z oznako FIBRANxps 700. Plošče imajo nazivno tlačno trdnost 700 kPa, modul elastičnosti je 40.000 kPa. Površina plošč je gladka. Plošče smo na Katedri za preizkušanje materialov in konstrukcij razrezali na manjše ploščice dimenzij 6×6×2 cm.

Za sloj peska smo uporabili fini kremenov, naravno vlažen pesek, zrnivosti 0,063/0,355 mm.

Pri preiskavi smo obravnavali 4 različne preizkušance:

- preizkušanec 1: homogen preizkušanec XPS 700,
- preizkušanec 2: kremenov, naravno vlažen pesek, zrnivosti 0,063/0,355 mm,
- preizkušanec 3: 2 ploščici XPS 700, položeni ena na drugo – meritev strižne trdnosti stika med dvema tovarniško izdelanima ploskvama XPS 700,
- preizkušanec 4: spodaj XPS 700, nad strižno ravnino kremenov pesek.



Slika 7: Strižna celica s preizkušancem v direktnem strižnem aparatu

Vsako vrsto preizkušanca smo predhodno obremenili s 3 različnimi vertikalnimi napetostmi: 50, 100 in 150 kPa. Striženje smo pri vseh preizkušancih izvajali s konstantno hitrostjo 0,25 mm/min do prestriga preizkušanca ali do horizontalnega premika 10 mm, saj bi ob večjem premiku lahko prišlo do poškodb merilnih naprav. Podatke, ki so se merili med striženjem (horizontalni premik, vertikalni premik in strižna sila), predstavljamo v preglednicah v nadaljevanju. Normalno in strižno napetost na vsiljeni (predefinirani) horizontalni strižni ploskvi smo izračunali z deljenjem vertikalne in strižne sile s prerezom.

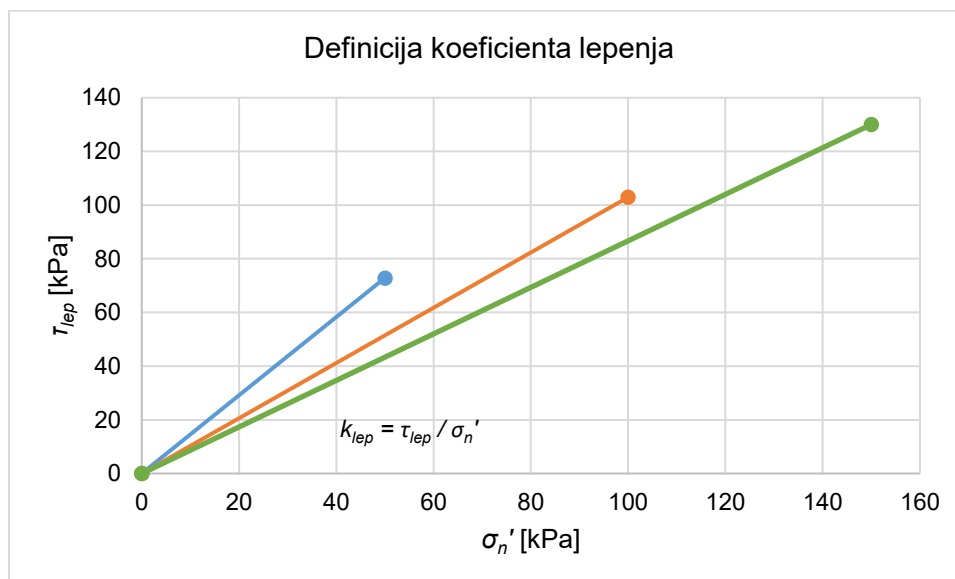
Možnost zdrsa smo ovrednotili s pomočjo strižne trdnosti  $\tau_f$  in koeficienta lepenja  $k_{lep}$ . Strižno trdnost  $\tau_f$  pri znani efektivni normalni napetosti  $\sigma_n$  smo določili s pomočjo grafa strižne napetosti v odvisnosti od horizontalnega premika. Strižno odpornost  $\tau_f$  za vsak posamezni preizkušanec smo odčitali pri maksimalni vrednosti tega grafa. Zvezo med normalno napetostjo in strižno trdnostjo smo izrazili z Mohr-Coulombovo enačbo, ki se glasi (KMTal, 2017):

$$\tau_f = c' + \sigma_n' \tan \varphi' \quad (1)$$

V enačbi je  $\sigma_n'$  efektivna napetost [kPa],  $c'$  [kPa] in  $\varphi'$  [°] pa sta kohezija in strižni kot, izražena v efektivnih napetostih. Strižno trdnost smo vrednotili za vse 4 preizkušance.

Koeficient lepenja  $k_{lep}$  smo izračunali na enak način kot drugi avtorji, ki so obravnavali zdrs toplotne izolacije (Mikec (2014) in Fibran Nord (Vide Lutman, 2017)). Pri računu koeficienta lepenja velja predpostavka, da normalni napetosti 0 kPa pripada strižna napetost 0 kPa, zato so koeficienti lepenja odvisni od vertikalnega tlaka. Koeficient lepenja smo zato izračunali za vsako bremensko stopnjo posebej. Definirali smo ga kot razmerje med strižno napetostjo ob prvi prevojni točki (glej Grafikona 8 in 12) in normalno napetostjo (enačba (2)) oz. kot tangens kota med napetostma, kar je razvidno iz Grafikona 1. Koeficiente lepenja smo vrednotili za preizkušanca 3 in 4, kjer nas je zanimalo strižno obnašanje stika dveh materialov.

$$k_{lep} = \frac{\tau_{lep}}{\sigma_n'} \quad (2)$$



Grafikon 1: Definicija koeficienta lepenja

### 4.3 Rezultati preiskave

S pomočjo izmerjenih vrednosti horizontalnega premika, vertikalnega premika in strižne sile smo določili odvisnost med spremembo strižne napetosti in horizontalnim premikom ter odvisnost med vertikalnim in horizontalnim premikom. Pri preizkušancih 3 (2× XPS 700) in 4 (XPS 700 + pesek) smo izračunali še koeficiente lepenja  $k_{lep}$ .

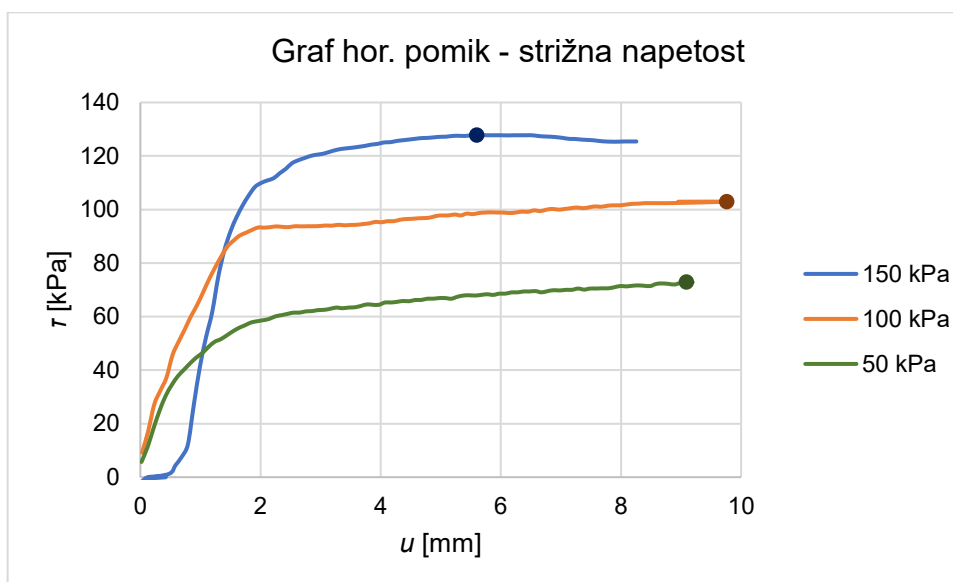
V grafih spremembe strižne napetosti v odvisnosti od horizontalnega premika so pri preizkušancih 1 in 2 (Grafikon 2 in Grafikon 5) s polno piko označene strižne trdnosti, pri preizkušancih 3 in 4 (Grafikon 8 in Grafikon 12) pa s prazno piko strižne napetosti ob prvem prevoju in s polno piko strižne trdnosti.

#### 4.3.1 Preizkušane 1 (XPS 700)

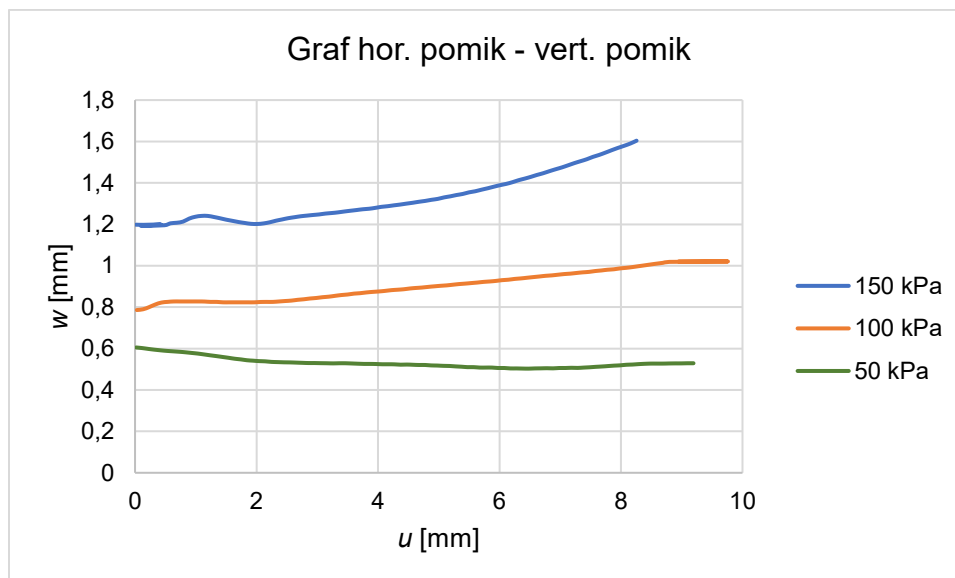
V strižno celico smo dali ploščico iz ekstrudiranega polistirena (XPS 700), dimenzij 6×6×2 cm.

Preglednica 5: Strižne karakteristike preizkušance 1 pri treh različnih normalnih napetostih

|                                                           |      |     |     |
|-----------------------------------------------------------|------|-----|-----|
| <b>Normalna napetost <math>\sigma_n'</math> [kPa]</b>     | 50   | 100 | 50  |
| <b>Strižna trdnost <math>\tau_f</math> [kPa]</b>          | 73   | 103 | 128 |
| <b>Pripadajoč horizontalni premik <math>u</math> [mm]</b> | 9,1  | 9,8 | 5,6 |
| <b>Pripadajoč vertikalni premik <math>w</math> [mm]</b>   | 0,5  | 1,0 | 1,4 |
| <b>Strižni kot <math>\phi'</math> [°]</b>                 | 28,8 |     |     |
| <b>Kohezija <math>c'</math> [kPa]</b>                     | 46   |     |     |

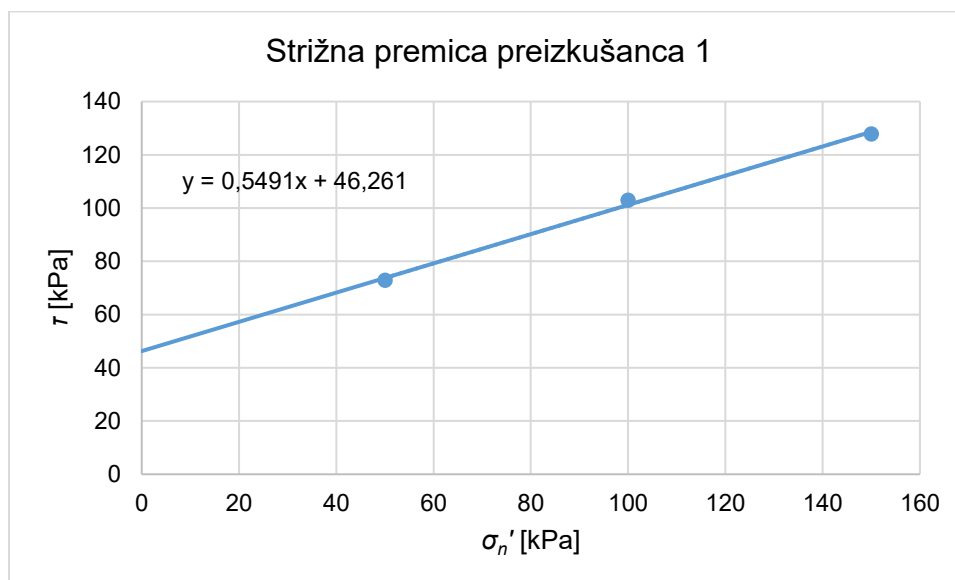


Grafikon 2: Sprememba strižne napetosti v odvisnosti od horizontalnega premika pri preizkušancu 1



Grafikon 3: Sprememba vertikalnega premika v odvisnosti od horizontalnega premika pri preizkušancu

1



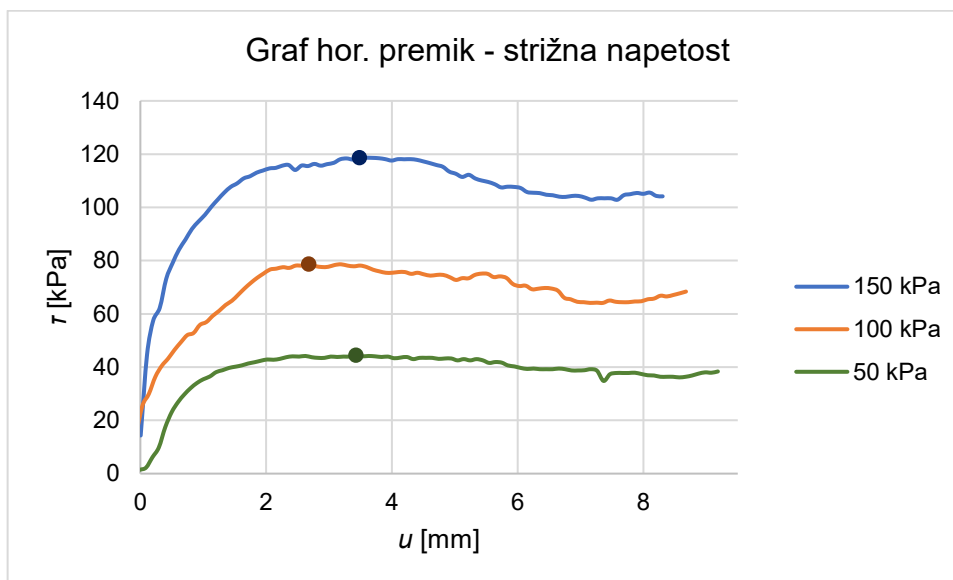
Grafikon 4: Strižna premica preizkušanca 1

#### 4.3.2 Preizkušanelec 2 (pesek)

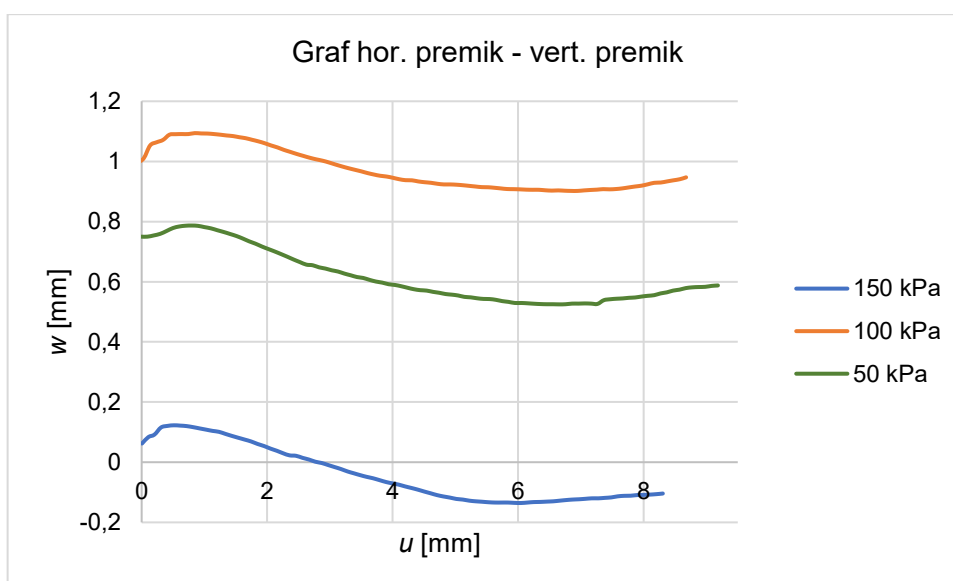
Uporabili smo fini kremenov pesek, zrnivosti 0,063/0,355 mm. V vsako strižno celico smo vgradili 115 g peska.

Preglednica 6: Strižne karakteristike preizkušanca 2 pri treh različnih normalnih napetostih

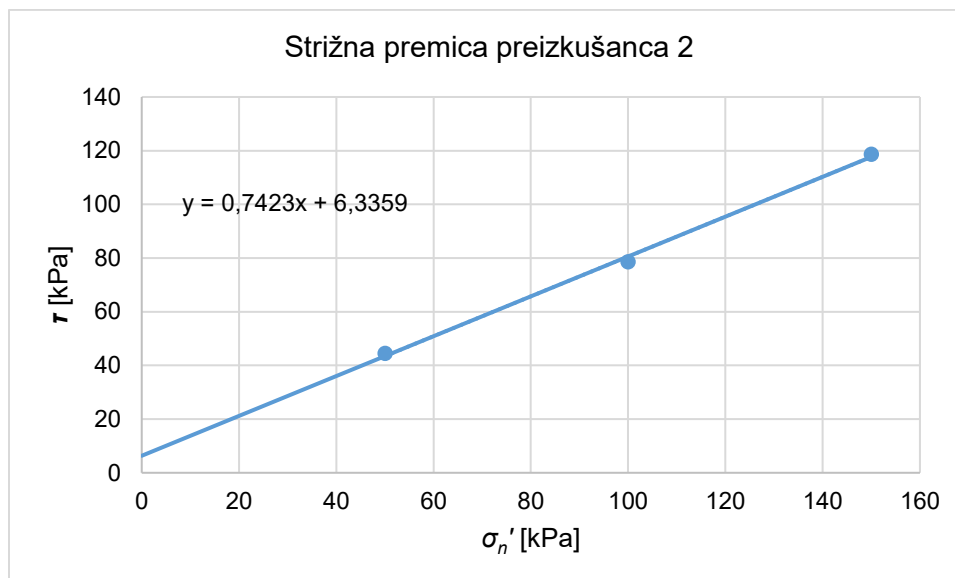
|                                                           |      |     |     |
|-----------------------------------------------------------|------|-----|-----|
| <b>Normalna napetost <math>\sigma_n'</math> [kPa]</b>     | 50   | 100 | 150 |
| <b>Strižna trdnost <math>\tau_f</math> [kPa]</b>          | 44   | 79  | 119 |
| <b>Pripadajoč horizontalni premik <math>u</math> [mm]</b> | 3,4  | 2,7 | 3,5 |
| <b>Pripadajoč vertikalni premik <math>w</math> [mm]</b>   | 0,6  | 1,0 | 0,0 |
| <b>Strižni kot <math>\phi'</math> [°]</b>                 | 36,6 |     |     |
| <b>Kohezija <math>c'</math> [kPa]</b>                     | 6    |     |     |



Grafikon 5: Sprememba strižne napetosti v odvisnosti od horizontalnega premika pri preizkušancu 2



Grafikon 6: Sprememba vertikalnega premika v odvisnosti od horizontalnega premika pri preizkušancu



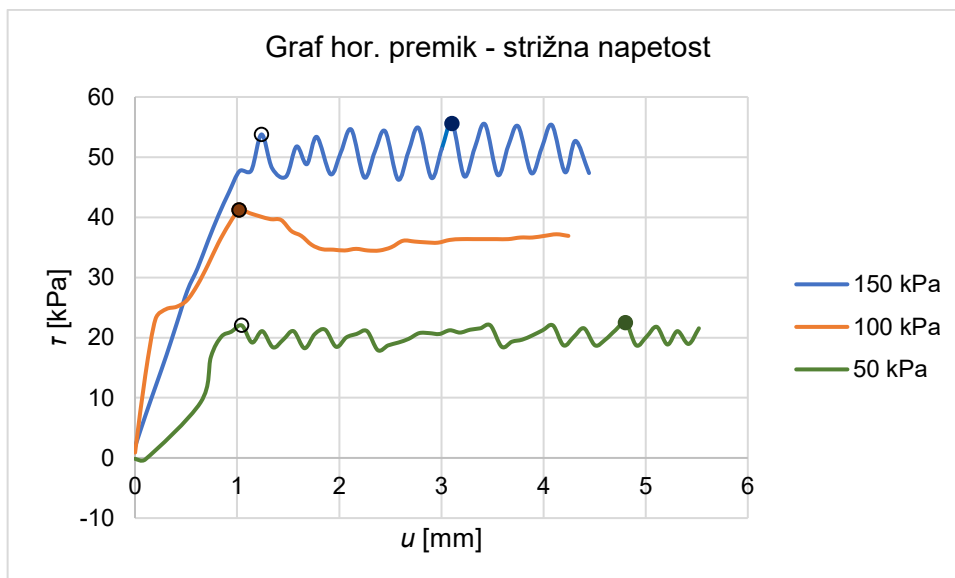
Grafikon 7: Strižna premica preizkušanca 2

#### 4.3.3 Preizkušanelec 3 (2× XPS 700)

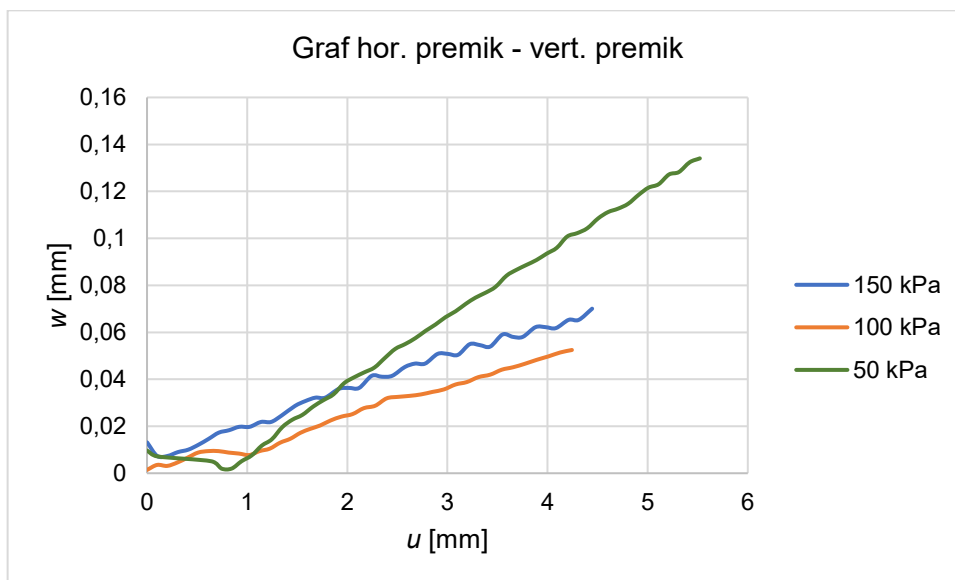
V strižno celico smo dali 2 ploščici ekstrudiranega polistirena (XPS 700), brez vmesnega veznega sredstva. Ploščici sta bili obrnjeni tako, da sta se stikali na tovarniško obdelani ploskvi.

Preglednica 7: Strižne karakteristike preizkušanca 3 pri treh različnih normalnih napetostih

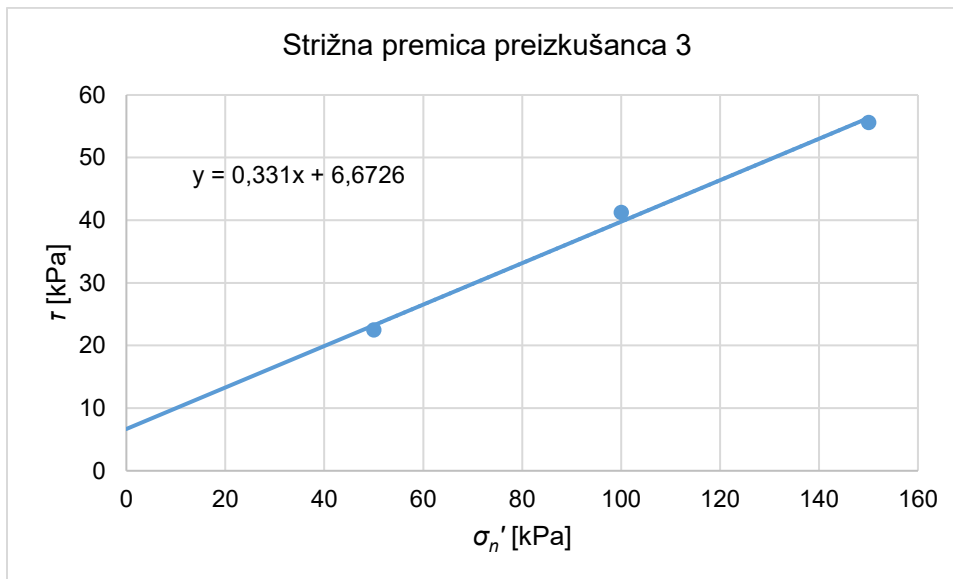
| Normalna napetost $\sigma'_n$ [kPa]            | 50   | 100  | 150  |
|------------------------------------------------|------|------|------|
| Strižna trdnost $\tau_f$ [kPa]                 | 22   | 41   | 56   |
| Pripadajoč horizontalni premik $u$ [mm]        | 4,8  | 1,0  | 1,0  |
| Pripadajoč vertikalni premik $w$ [mm]          | 0,1  | 0,0  | 0,0  |
| Strižni kot $\phi'$ [°]                        | 18,3 |      |      |
| Kohezija $c'$ [kPa]                            | 7    |      |      |
| Strižna napetost ob prevoju $\tau_{lep}$ [kPa] | 22   | 41   | 54   |
| Koeficient lepenja $k_{lep}$                   | 0,44 | 0,41 | 0,36 |



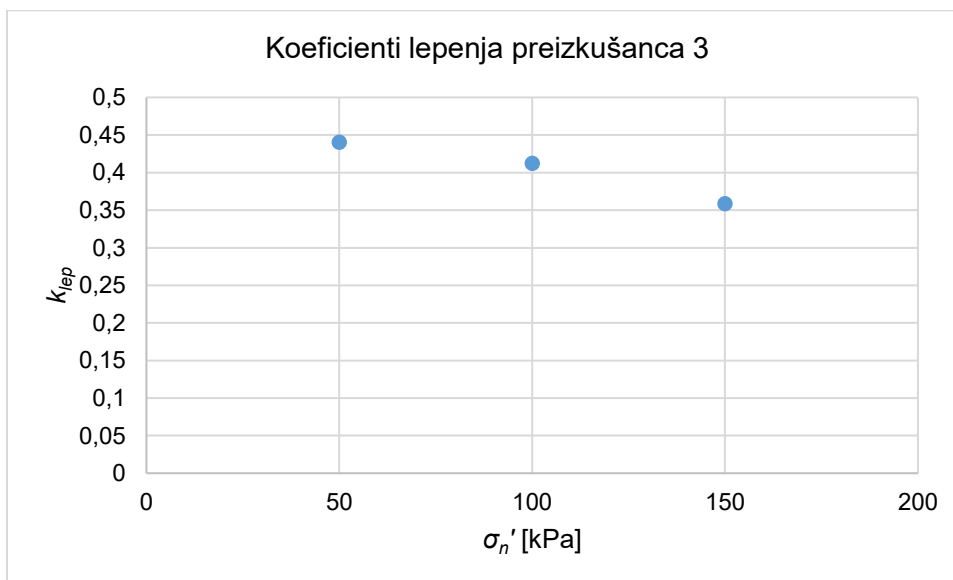
Grafikon 8: Sprememba strižne napetosti v odvisnosti od horizontalnega premika pri preizkušancu 3



Grafikon 9: Sprememba vertikalnega premika v odvisnosti od horizontalnega premika pri preizkušancu



Grafikon 10: Strižna premica preizkušanca 3



Grafikon 11: Koeficienti lepenja preizkušanca 3

#### 4.3.4 Preizkušanelec 4 (XPS 700 + pesek)

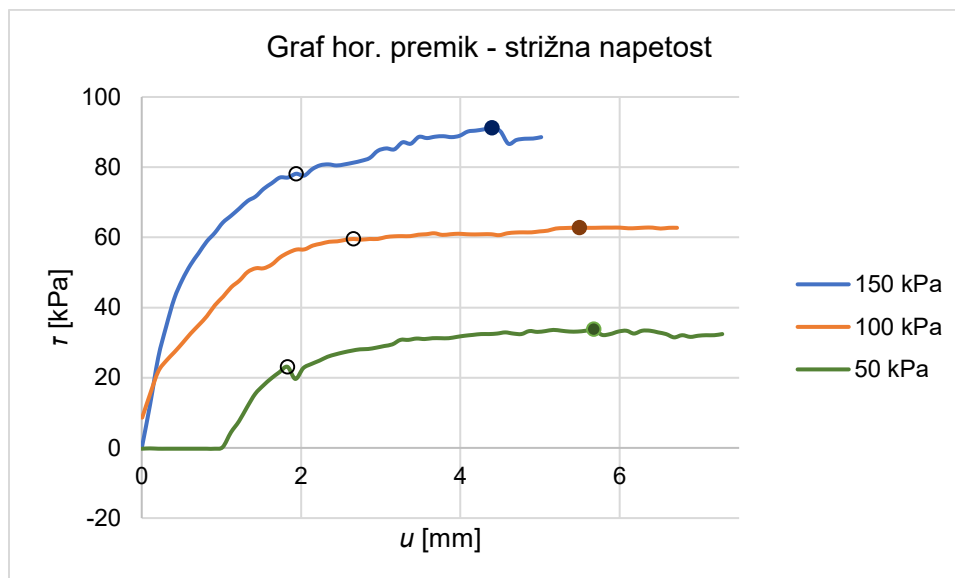
V strižno celico smo vgradili ploščico iz ekstrudiranega polistirena (XPS 700), dimenzij 6×6×2 cm, in fini kremenov pesek, zrnivosti 0,063/0,355 mm. Pesek smo nasuli na tovarniško obdelano ploskev ploščice.



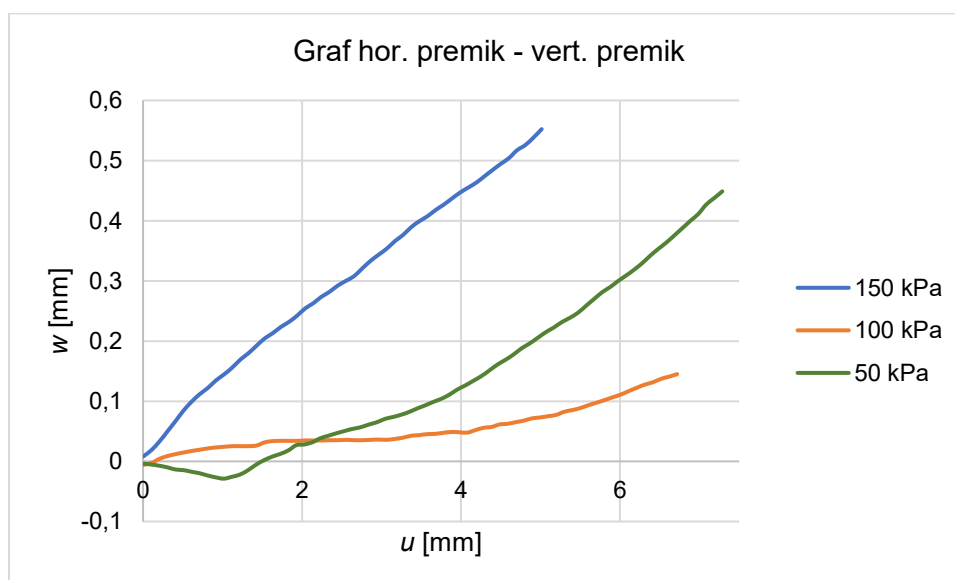
Slika 8: Preizkušaneec 4

Preglednica 8: Strižne karakteristike preizkušaneca 4 pri treh različnih normalnih napetostih

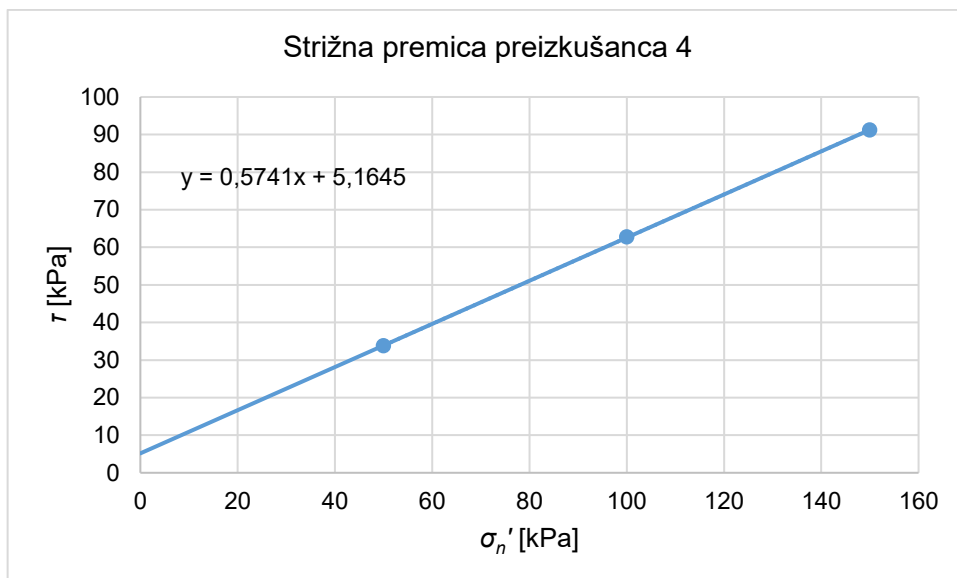
|                                                                  |      |      |      |
|------------------------------------------------------------------|------|------|------|
| <b>Normalna napetost <math>\sigma_n'</math> [kPa]</b>            | 50   | 100  | 150  |
| <b>Strižna trdnost <math>\tau_f</math> [kPa]</b>                 | 34   | 63   | 91   |
| <b>Pripadajoč horizontalni premik <math>u</math> [mm]</b>        | 5,7  | 5,5  | 4,4  |
| <b>Pripadajoč vertikalni premik <math>w</math> [mm]</b>          | 0,3  | 0,1  | 0,5  |
| <b>Strižni kot <math>\phi'</math> [°]</b>                        | 29,9 |      |      |
| <b>Kohezija <math>c'</math> [kPa]</b>                            | 5    |      |      |
| <b>Strižna napetost ob prevoju <math>\tau_{lep}</math> [kPa]</b> | 23   | 51   | 78   |
| <b>Koeficient lepenja <math>k_{lep}</math></b>                   | 0,46 | 0,51 | 0,52 |



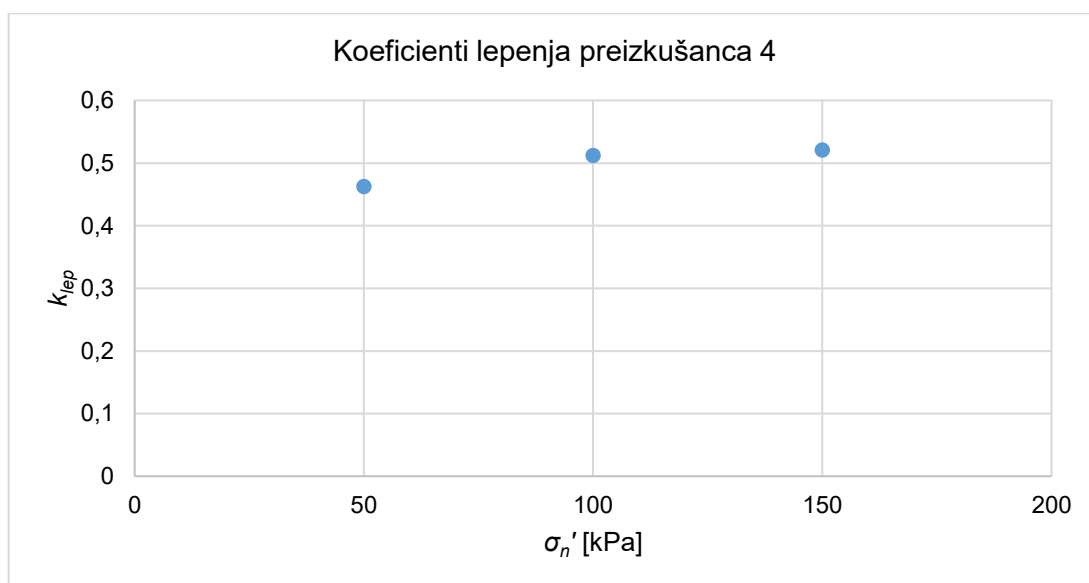
Grafikon 12: Sprememba strižne napetosti v odvisnosti od horizontalnega premika pri preizkušancu 4



Grafikon 13: Sprememba vertikalnega premika v odvisnosti od horizontalnega premika pri preizkušancu 4



Grafikon 14: Strižna premica preizkušanca 4



Grafikon 15: Koeficienti lepenja preizkušanca 4

#### 4.4 Primerjava rezultatov direktne strižne preiskave

V naslednjih preglednicah so v namen primerjave rezultatov za vsako bremensko stopnjo podane strižne karakteristike posameznih preizkušancev.

Preglednica 9: Primerjava strižnih trdnosti (bremenska stopnja 50 kPa)

| Preizkušanec                            | 1   | 2   | 3   | 4   |
|-----------------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| Strižna trdnost $\tau_f$ [kPa]          | 73  | 44  | 22  | 34  |
| Pripadajoč horizontalni premik $u$ [mm] | 9,1 | 3,4 | 4,8 | 5,7 |
| Pripadajoč vertikalni premik $w$ [mm]   | 0,5 | 0,6 | 0,1 | 0,3 |

Preglednica 10: Primerjava koeficientov lepenja (bremenska stopnja 50 kPa)

| Preizkušanec                                   | 3    | 4    |
|------------------------------------------------|------|------|
| Strižna napetost ob prevoju $\tau_{lep}$ [kPa] | 22   | 23   |
| Koeficient lepenja $k_{lep}$                   | 0,44 | 0,46 |

Preglednica 11: Primerjava strižnih trdnosti (bremenska stopnja 100 kPa)

| Preizkušanec                            | 1   | 2   | 3   | 4   |
|-----------------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| Strižna trdnost $\tau_f$ [kPa]          | 103 | 79  | 41  | 63  |
| Pripadajoč horizontalni premik $u$ [mm] | 9,8 | 2,7 | 1,0 | 5,5 |
| Pripadajoč vertikalni premik $w$ [mm]   | 1,0 | 1,0 | 0,0 | 0,1 |

Preglednica 12: Primerjava koeficientov lepenja (bremenska stopnja 100 kPa)

| Preizkušanec                                   | 3    | 4    |
|------------------------------------------------|------|------|
| Strižna napetost ob prevoju $\tau_{lep}$ [kPa] | 41   | 51   |
| Koeficient lepenja $k_{lep}$                   | 0,41 | 0,51 |

Preglednica 13: Primerjava strižnih trdnosti (bremenska stopnja 150 kPa)

| Preizkušanec                            | 1   | 2   | 3   | 4   |
|-----------------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| Strižna trdnost $\tau_f$ [kPa]          | 128 | 119 | 56  | 91  |
| Pripadajoč horizontalni premik $u$ [mm] | 5,6 | 3,5 | 1,0 | 4,4 |
| Pripadajoč vertikalni premik $w$ [mm]   | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 0,5 |

Preglednica 14: Primerjava koeficientov lepenja (bremenska stopnja 150 kPa)

| Preizkušanec                                   | 3    | 4    |
|------------------------------------------------|------|------|
| Strižna napetost ob prevoju $\tau_{lep}$ [kPa] | 54   | 78   |
| Koeficient lepenja $k_{lep}$                   | 0,36 | 0,52 |

Preglednica 15: Primerjava vrednosti strižnih kotov in kohezije

| Preizkušanec            | 1    | 2    | 3    | 4    |
|-------------------------|------|------|------|------|
| Strižni kot $\phi'$ [°] | 28,8 | 36,6 | 18,3 | 29,9 |
| Kohezija $c'$ [kPa]     | 46   | 6    | 7    | 5    |

Iz Preglednic 9, 11 in 13 je razvidno, da ima pri vseh bremenskih stopnjah največjo strižno trdnost preizkušanec 1, najmanjšo pa preizkušanec 3.

Koeficient lepenja je pri vseh bremenskih stopnjah večji pri preizkušancu 4 kot pri preizkušancu 3 (Preglednice 10, 12 in 14). Pri normalni napetosti 50 kPa je razlika med koeficientoma minimalna, nato se z vsako bremensko stopnjo povečuje.

Kohezija je največja pri preizkušancu 1 (Preglednica 15). Pri ostalih preizkušancih so vrednosti kohezije precej manjše in med seboj praktično enake. Strižni kot je največji pri preizkušancu 2, kar pomeni, da pri slednjem strižna trdnost narašča najhitreje.

#### 4.5 Primerjava rezultatov preiskav s peščeno podlago in podložnim betonom

V Preglednicah 16–18 je podana primerjava preizkušancev, pri katerih je prišlo do zdrsa med podlago (iz peska ali podložnega betona) in XPS-om. Preizkušanec 4 je predmet opravljene preiskave v okviru te diplomske naloge, preizkušanci a, b, c in d pa so bili obravnavani v raziskavi Bokan Bosiljkove in Mikca (2014). Sestava preizkušancev je sledeča:

- preizkušanec 4: pesek, XPS 700,
- preizkušanec a: temeljna plošča, XPS 400 (gladka), podložni beton,
- preizkušanec b: temeljna plošča, XPS 400 (z utori), podložni beton,
- preizkušanec c: temeljna plošča, XPS 400 (z utori), hidroizolacija, XPS 400 (z utori), podložni beton,
- preizkušanec d: temeljna plošča, XPS 400 (z utori), hidroizolacija, 2× XPS 400 (z utori), podložni beton.

Preglednica 16: Primerjava strižnih trdnosti in koeficientov lepenja iz preiskav s peščeno podlago in podložnim betonom (bremenska stopnja 50 kPa)

| Preizkušanec                                   | 4    | a    | b    | c    | d    |
|------------------------------------------------|------|------|------|------|------|
| Strižna trdnost $\tau_f$ [kPa]                 | 34   | /    | 29   | 27   | 30   |
| Strižna napetost ob prevoju $\tau_{lep}$ [kPa] | 23   | /    | 28   | 26   | 28   |
| Koeficient lepenja $k_{lep}$                   | 0,46 | 0,49 | 0,57 | 0,52 | 0,58 |

Preglednica 17: Primerjava strižnih trdnosti in koeficientov lepenja iz preiskav s peščeno podlago in podložnim betonom (bremenska stopnja 150 kPa)

| <b>Preizkušane</b>                                               | <b>4</b> | <b>a</b> | <b>b</b> | <b>c</b> | <b>d</b> |
|------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Strižna trdnost <math>\tau_f</math> [kPa]</b>                 | 91       | /        | 85       | 82       | 90       |
| <b>Strižna napetost ob prevoju <math>\tau_{lep}</math> [kPa]</b> | 78       | /        | 84       | 82       | 90       |
| <b>Koeficient lepenja <math>k_{lep}</math></b>                   | 0,52     | /        | 0,56     | 0,55     | 0,58     |

Preglednica 18: Primerjava vrednosti strižnih kotov in kohezije preiskav s peščeno podlago in podložnim betonom

| <b>Preizkušane</b>                        | <b>4</b> | <b>a</b> | <b>b</b> | <b>c</b> | <b>d</b> |
|-------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Strižni kot <math>\phi'</math> [°]</b> | 29,9     | /        | 29,2     | 28,8     | 31,0     |
| <b>Kohezija <math>c'</math> [kPa]</b>     | 5        | /        | 1,0      | 0,0      | 0,0      |

Konstruktivski sklop, ki vsebuje peščeno podlago, ima pri obeh prikazanih bremenskih stopnjah nižji koeficient lepenja kot konstruktivski sklop s podložnim betonom (Preglednici 16 in 17). To pomeni, da pride na peščeni podlagi do zdrsa pri nižji napetosti kot na podložnem betonu. Sklepamo lahko, da je peščena podlaga nekoliko manj varna kot podložni beton, vendar so razlike v predstavljeni primerjavi minimalne.

Tudi strižni koti so med seboj skoraj enaki, podobne pa so si tudi vrednosti kohezije, ki so v primeru podložnega betona pri vseh preizkušancih blizu 0 (Preglednica 18).

## 5 ZAKLJUČEK

Učinkovito zmanjšanje porabe energije in preprečevanje toplotnih izgub je možno doseči le z izvedbo neprekinjenega stavbnega ovoja. Tehnične zahteve za učinkovito rabo energije v stavbah podaja PURES, ukrepi za preprečevanje prodiranja zmrzali v stavbo pa so opisani v standardu SIST EN ISO 13793:2002. Kot najbolj ekonomična rešitev je predstavljeno toplotno izoliranje temeljev. Zveznost toplotne izolacije najenostavneje in najučinkoviteje zagotovimo z uporabo temeljne plošče. Zaradi vodoodbojnosti in velike tlačne trdnosti temeljno ploščo pogosto izoliramo z ekstrudiranim polistirenom. Možna je tudi vgradnja ekspandiranega polistirena, katerega prednost je predvsem nizka cena, ali penjenega stekla, ki se običajno vgrajuje v obliki agregata in je uporabno na slabše izravnanih površinah. Toplotno izolacijo položimo na sloj izravnane peska ali na podložni beton.

V diplomski nalogi smo se posvetili predvsem zdrsu toplotne izolacije, saj je vpliv toplotne izolacije na prevrnitev in posedanje majhen. Preverili smo možnost zdrsa toplotne izolacije, položene na peščeno podlago. S pomočjo direktne strižne preiskave smo določili strižne karakteristike posameznih elementov konstrukcijskega sklopa in izračunali koeficiente lepenja na stiku peska in ekstrudirane polistirena. Ugotovili smo, da je pri vseh nivojih obremenitve kritičen kontakt dveh ploščic XPS-a. To v praksi rešujemo z namestitvijo dvostranske samolepilne hidroizolacije. Nižjo strižno trdnost kot sam XPS in pesek ima tudi kontakt med peskom in XPS-om. Primerjava rezultatov preiskav s peščeno podlago in podložnim betonom kaže, da je koeficient lepenja pri vseh bremenskih stopnjah manjši na peščeni podlagi, vendar so razlike minimalne. Sklepamo lahko, da je peščena podlaga nekoliko manj varna kot podložni beton. Do podobnih ugotovitev so prišli tudi v podjetju Fibrin Nord. Na Zavodu za gradbeništvo Slovenije so opravljali statične in dinamične preizkuse obnašanja toplotne izolacije na peščeni podlagi. Dodatno so preverjali zdrs na podlagi, prekrito s filtrnim geosintetikom, ki se je izkazal za še bolj kritičnega (Vide Lutman, 2017).

## VIRI

ARSO. 2017. Karta potresne nevarnosti: Projektni pospeški tal.

[http://www.arso.gov.si/potresi/potresna%20nevarnost/projektni\\_pospesek\\_tal.html](http://www.arso.gov.si/potresi/potresna%20nevarnost/projektni_pospesek_tal.html)

(Pridobljeno 24. 6. 2017.)

AURE. 2003. Toplotna zaščita zgradb: Toplotnoizolacijski materiali. Zbirka informativnih listov »Za učinkovito rabo energije« 2/03: 1–4.

[http://www.energetika-portal.si/fileadmin/dokumenti/publikacije/arhiv\\_aure/il\\_2-03.pdf](http://www.energetika-portal.si/fileadmin/dokumenti/publikacije/arhiv_aure/il_2-03.pdf)

(Pridobljeno 28. 3. 2017.)

Dolšek M., Snoj J., Žižmond J. 2015. Eksperimentalne raziskave temeljnega sklopa konstrukcijskega sistema JUBHome BASE in priporočila za potresnoodporno projektiranje. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo (FGG IKPIR): 50. str.

Energetska izkaznica. 2017. Povzetek direktive 2010/31/UE.

<http://www.energetska-izkaznica.si/energetska-ucinkovitost/povzetek-direktive-201031ue/>

(Pridobljeno 17. 6. 2017.)

Energetska učinkovitost. 2017. Ukrepi za zmanjšanje odvisnosti.

<http://www.energetska-ucinkovitost.si/energetska-odvisnost/ukrepi-za-zmanjsanje-odvisnosti/>

(Pridobljeno 17. 6. 2017.)

Evropski svet. 2015. Okvir podnebne in energetske politike do leta 2030.

<http://www.consilium.europa.eu/sl/policies/climate-change/2030-climate-and-energy-framework/> (Pridobljeno 17. 6. 2017.)

Fibran Nord. 2009. Energijski ščit za zahtevne konstrukcije. Energetik 78: 38–39.

Fibran Nord. 2017a. FIBRANxps – proizvodnja.

<http://www.fibran.si/frontend/articles.php?cid=141&view=1&t=FIBRANxps-proizvodnja>

(Pridobljeno 17. 6. 2017.)

Fibran Nord. 2017b. Konstrukcije v stiku z zemljo: Napotki za gradnjo ob uporabi toplotne izolacije FIBRANxps.

[http://www.fibran.si/files4users/files/brochures/Konstrukcije\\_v\\_stiku\\_z\\_zemljo\\_FIBRANxps\\_SLO.pdf](http://www.fibran.si/files4users/files/brochures/Konstrukcije_v_stiku_z_zemljo_FIBRANxps_SLO.pdf) (Pridobljeno 1. 5. 2017.)

Fibran Nord. 2017c. Seismic temeljna blazina, nepodkleten objekt.

[http://www.fibran.si/files4users/files/DownloadFiles/technical\\_drawings/PDF/SLO/4a/SI47211\\_18\\_6\\_14\\_seismic\\_temeljna\\_blazina\\_nepodkleten\\_objekt.pdf](http://www.fibran.si/files4users/files/DownloadFiles/technical_drawings/PDF/SLO/4a/SI47211_18_6_14_seismic_temeljna_blazina_nepodkleten_objekt.pdf) (Pridobljeno 27. 6. 2017.)

Fibran Nord. 2017d. SEISMIC temeljna blazina v praksi.

<http://www.fibran.si/frontend/article.php?aid=591&cid=152&t=SEISMIC-temeljna-blazina-v-praksi#> (Pridobljeno 17. 6. 2017.)

Fibran Nord. 2017e. Toplotna izolacija temeljne plošče v praksi.

<http://www.fibran.si/frontend/article.php?aid=137&cid=36&t=Toplotna-izolacija-temeljne-plosce-v-praksi> (Pridobljeno 17. 6. 2017.)

Fibran Nord. 2017f. Turkizna toplotna izolacija.

<http://www.fibran.si/files4users/files/brochures/SI01.pdf> (Pridobljeno 30. 3. 2017.)

Finance. 2012. Toplotna izolacija pod temeljno ploščo.

<https://gradbenistvo.finance.si/358697/Toplotna-izolacija-pod-temeljno-plosco?cctest&>  
(Pridobljeno 2. 4. 2017.)

Geocell Schaumglas. 2017. Geocell penjeno steklo - Multitalent s številnimi prednostmi in zagotovljenim Anti-Aging-Faktorjem.

<http://www.geocell-schaumglas.eu/sl/> (Pridobljeno 24. 6. 2017.)

Glapor. 2017. Gramoz iz penjenega stekla.

<http://www.penjenosteklo.com/wp-content/uploads/2013/01/GLAPOR-gramoz-iz-penjenega-stekla.pdf> (Pridobljeno 28. 3. 2017.)

JUBHome. 2016. Navodila za projektiranje JUBHome BASE.

[http://jubhome.eu/wp-content/uploads/2016/06/navodila\\_za\\_projektiranje\\_jubhome\\_base\\_0.pdf](http://jubhome.eu/wp-content/uploads/2016/06/navodila_za_projektiranje_jubhome_base_0.pdf) (Pridobljeno 28. 3. 2017.)

JUBHome. 2017a. Sistem toplotne izolacije temeljne plošče JUBHome BASE.

[http://www.jub.si/sites/www.jub.si/files/documents/JUBHome/jub\\_jubhome\\_prirocnik\\_final\\_web.pdf](http://www.jub.si/sites/www.jub.si/files/documents/JUBHome/jub_jubhome_prirocnik_final_web.pdf) (Pridobljeno 29. 3. 2017.)

JUBHome. 2017b. JUBHome BASE – Sistem toplotne izolacije temeljne plošče (tehnični list 00.02.01-SVN).

[http://www.jub.si/sites/www.jub.si/files/documents/JUBHome/000201-jubhome\\_base-tl-svn-2015-12-01.pdf](http://www.jub.si/sites/www.jub.si/files/documents/JUBHome/000201-jubhome_base-tl-svn-2015-12-01.pdf) (Pridobljeno 29. 3. 2017.)

Karlovšek, J. 2007. Stress- and strain-controlled testing of EPS geofom. Diplomski naloga. Sydney, University of Western Sydney, School of Engineering (samozaložba J. Karlovšek): 74 str.

Kilar, V. 2012. Varnost pasivnih hiš pri potresu 1, 2011. Ljubljana, AR, arhitektura, raziskave 2012/1: 52–55.

Kilar, V. 2013a. Obnašanje XPS pri tlačni in strižni obremenitvi. Ljubljana, AR, arhitektura, raziskave 2013/2: 40–41.

Kilar, V., Azinović, B., Koren D. 2016. Koncept temeljenja pasivnih hiš na potresnih območjih. Gradbeni vestnik 65: 69–80.

KMTal. 2017. Strižna trdnost zemljin (4. vaja). Študijsko gradivo pri predmetu Mehanika tal in inženirska geologija-GR-UNI. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tal z laboratorijem: 12 str.

Kralj Dušević, T. 2016. Toplotna izolacija pod temeljno ploščo in vpliv zmrzali. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba T. Kralj Dušević): 83 str.

Kunič, R. 2010. Temeljenje in nasipi iz ekspandiranega polistirena. V: 10. slovenski kongres o cestah in prometu, Portorož, Slovenija, 20.–22. september 2010. Ljubljana, DRC – Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije: str. 1394–1402.

Majes, B. 2017. Plitvo temeljenje. Študijsko gradivo pri predmetu Fundiranje I-GR-UNI. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tal z laboratorijem: 60 str.

<http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/kmtal-gradiva/gr-uni/f1/plitvo%20temeljenje.pdf> (Pridobljeno 4. 4. 2017.)

Mikec, J. 2014. Zdrs toplotne izolacije pod temeljno ploščo v primeru potresne obtežbe. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba J. Mikec): 95 str.

Mojmojster. 2017. Temeljna plošča, prednosti, detajli, cena.

[http://www.mojmojster.net/clanek/103/temeljna\\_plosca\\_prednosti\\_detajli\\_cena](http://www.mojmojster.net/clanek/103/temeljna_plosca_prednosti_detajli_cena) (Pridobljeno 17. 6. 2017.)

Norik. 2017. Styrodur.

<http://www.norik.si/files/styrodur-katalog.pdf> (Pridobljeno 24. 6. 2017.)

PasivnaGradnja.si. 2012. Penjeno steklo kot vrhunski izolativni material.

<http://www.pasivnagradnja.com/materiali-in-komponente/penjeno-steklo/> (Pridobljeno 24. 6. 2017.)

PasivnaGradnja.si. 2017. Penjeno steklo.

<http://www.penjenosteklo.com/wp-content/uploads/2013/01/207-750x380.jpg> (Pridobljeno 24. 6. 2017.)

Portal Energetika. 2017. Akcijski načrt za skoraj nič-energijske stavbe.

<http://www.energetika-portal.si/dokumenti/strateski-razvojni-dokumenti/akcijski-nacrt-za-skoraj-nic-energijske-stavbe/> (Pridobljeno 17. 6. 2017.)

Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah. Uradni list RS, št. 52/2010: str. 7840–7841.

[https://www.uradni-list.si/\\_pdf/2010/Ur/u2010052.pdf](https://www.uradni-list.si/_pdf/2010/Ur/u2010052.pdf) (Pridobljeno 17. 6. 2017.)

Pulko, B. 2012. Primerjava metod za statično analizo temeljnih plošč. Gradbeni vestnik 61: 198–205.

SIST EN 826:2013. Toplotno izolacijski proizvodi za uporabo v gradbeništvu - Ugotavljanje obnašanja pri tlačni obremenitvi.

SIST EN 1990:2004. Evrokod 0: Osnove projektiranja konstrukcij.

SIST EN 1997-1:2005. Evrokod 7: Geotehnično projektiranje – 1. del: Splošna pravila.

SIST EN ISO 13793:2002. Toplotne značilnosti stavb – Dimenzioniranje toplotnih lastnosti temeljev proti dviganju zaradi zmrzovanja (ISO 13793:2001).

SIST-TS CEN ISO/TS 17892-10:2004. Geotehnično preiskovanje in preskušanje – Laboratorijsko preskušanje zemljin – 10. del: Neposredni strižni preskus (ISO/TS 17892-10:2004).

Tehnična smernica za graditev TSG-1-004:2010 Učinkovita raba energije. Ljubljana, 2010. Ministrstvo za okolje in prostor. Št: 0071-101/2009: str. 7 in 16.

[http://www.mop.gov.si/fileadmin/mop.gov.si/pageuploads/zakonodaja/graditev\\_objektov/TSG\\_01\\_004\\_2010\\_ure.pdf](http://www.mop.gov.si/fileadmin/mop.gov.si/pageuploads/zakonodaja/graditev_objektov/TSG_01_004_2010_ure.pdf) (Pridobljeno 17. 6. 2017.)

Tekavec, M. 2015a. Temeljenje sodobnih hiš s toplotno izoliranimi temeljnimi ploščami. Gradbenik 7-8: 80–82.

Tekavec, M. 2015b. Toplotno izoliranje zemljine po obodu nizko energijskih hiš (NEH) in pasivnih hiš (PH). Gradbenik 5: 20–22.

Tekavec, M. 2016a. Sistem za toplotno izoliranje temeljnih plošč JUBHome BASE: 2. del – Konstrukcijski izračun talne plošče JUBHome BASE. Gradbenik 3: 68–71.

Tekavec, M. 2016b. Sistem za toplotno izoliranje temeljnih plošč JUBHome BASE: 3. del – Ekspandiran polistiren (EPS) kot konstrukcijski material. Gradbenik 1-2: 48–51.

Varčujem z energijo. 2014. Inovativna temeljna blazina za novograditelje.

[http://varcevanje-energije.si/images/stories/2014/MAREC/fibran\\_izolacija\\_2.jpg](http://varcevanje-energije.si/images/stories/2014/MAREC/fibran_izolacija_2.jpg) (Pridobljeno 27. 6. 2017.)

Vide Lutman, M. 2009. Toplotna izolacija pod temeljno ploščo lesenih objektov.

[http://www.lesena-gradnja.si/html/img/pool/Toplotna\\_izolacija\\_pod\\_temeljno\\_plo\\_o\\_lesenih\\_objektov.pdf](http://www.lesena-gradnja.si/html/img/pool/Toplotna_izolacija_pod_temeljno_plo_o_lesenih_objektov.pdf)  
(Pridobljeno 28. 3. 2017.)

Vide Lutman, M. 2017. Peščena podlaga pod temeljno ploščo. Sporočilo za: Fibran Nord. 13. 6. 2017. Osebna komunikacija.

Wallner, E. 2009. Sinergijski koncept konstrukcije pasivne hiše. Ljubljana, AR, arhitektura, raziskave 2009/1: 50–55.

Zbašnik Senegačnik, M. 2010. Kako odpraviti toplotne mostove v pasivni hiši? Ljubljana, Gradbenik.

[http://www.fa.uni-lj.si/filelib/8\\_konzorcijph/2010\\_toplotni\\_mostovi.pdf](http://www.fa.uni-lj.si/filelib/8_konzorcijph/2010_toplotni_mostovi.pdf) (Pridobljeno 28. 3. 2017.)

Zegowitz, A. 2010. Cellular Glass Aggregate Serving as Thermal Insulation and a Drainage Layer.

<https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/de/documents/Publikationen/Konferenzbeitraege/Englisch/Cellular%20Glass%20Aggregate%20Serving%20as%20Thermal%20Insulation%20and%20a%20Drainage%20Layer.pdf> (Pridobljeno 25. 8. 2017.)