

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta  
za gradbeništvo  
in geodezijo



Jamova cesta 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

**DRUGG** – Digitalni repozitorij UL FGG  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosim, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Miovski, B., 2016. Okoljski vpliv zunanjih sten iz naravnih gradiv. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Kunič, R., somentor Pajek, L.): 28 str.

Datum arhiviranja: 27-07-2016

University  
of Ljubljana

Faculty of  
Civil and Geodetic  
Engineering



Jamova cesta 2  
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

**DRUGG** – The Digital Repository  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Miovski, B., 2016. Okoljski vpliv zunanjih sten iz naravnih gradiv. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Kunič, R., co-supervisor Pajek, L.): 28 pp.

Archiving Date: 27-07-2016

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*

Jamova 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:

**BOZHIN MIOVSKI**

**OKOLJSKI VPLIV ZUNANJIH STEN IZ NARAVNIH  
GRADIV**

Diplomska naloga št.: 242/B-GR

**ENVIRONMENTAL IMPACT OF EXTERNAL WALLS  
MADE OF NATURAL MATERIALS**

Graduation thesis No.: 242/B-GR

**Mentor:**

doc. dr. Roman Kunič

**Somentor:**

asist. Luka Pajek

Ljubljana, 30. 06. 2016

## **STRAN ZA POPRAVKE**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

## IZJAVE

Spodaj podpisani/-a študent/-ka Bozhin Miovski, vpisna številka 26110280, avtor/-ica pisnega zaključnega dela študija z naslovom: OKOLJSKI VPLIV ZUNANJIH STEN IZ NARAVNIH GRADIV

## IZJAVLJAM

1. *Obkrožite eno od variant a) ali b)*

- a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;  
 b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;

2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;

3. da sem pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;

4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;

5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;

6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;

7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V/Na: Ljubljana

Datum: 4.6.2016

Podpis študenta/-ke:

\_\_\_\_\_

## **BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>504.7:691.1(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Bozhin Miovski</b>
<b>Mentor:</b>	<b>doc. dr. Roman Kunič</b>
<b>Somentor:</b>	<b>asist. Luka Pajek</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Okoljski vpliv zunanjih sten iz naravnih gradiv</b>
<b>Tip dokumenta:</b>	<b>Diplomska naloga – univerzitetni študij</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>28 str., 13 pril., 16 pregl., 3 graf., 11 sl.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>Ogljični odtis, slama, industrijska konoplja, okoljski vpliv</b>

### **Izvleček**

V današnjem času se soočamo s problemom globalnega segrevanja, h kateremu prispeva tudi gradbena industrija. Eden izmed vplivnih dejavnikov je tudi način proizvodnje materialov, ki se uporabljajo v gradbeništvu. Procesi za proizvodnjo gradbenih materialov, ki se najpogosteje uporabljajo v gradbeništvu, zahtevajo zelo visoke temperature; energijo za doseganje teh temperatur pa večinoma pridobivamo z izgorevanjem fosilnih goriv. Z ozirom na zgoraj omenjeni problem smo poskušali ugotoviti, katera je okolju najbolj prijazna rešitev za gradnjo zunanjih sten v stavbah. V okviru diplomske naloge smo se osredotočili na tri naravne materiale, in sicer konopljo, slamo in les. Te materiale smo uporabili v konstrukcijskih sklopih, za katere smo izračunali ogljični odtis, nato pa smo jih primerjali z ogljičnim odtisom konstrukcijskih sklopov, ki se sicer najpogosteje uporabljajo v gradbeništvu (armirani beton, opeka).

V nalogi smo najprej razložili toplogredne pline, ekvivalent  $\text{CO}_2$  in zakonodajo. Potem smo opisali materiale, ki smo jih uporabili (s poudarkom na slami in betonu iz konoplje), in način gradnje s temi materiali. Na koncu pa smo predstavili še uporabljene konstrukcijske sklope in njihov ogljični odtis. Ugotovili smo, da konstrukcijski sklop z najnižjim oz. negativnim ogljičnim odtisom predstavlja samonosilna konstrukcija iz slamnatih bal (zunanjja stena). Najvišji ogljični odtis ima konstrukcijski sklop z nosilno konstrukcijo iz opeke, ki je bil podan zgolj za primerjavo.

---

**BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTARY INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDC:** 504.7:691.1(043.2)  
**Author:** Bozhin Miovski  
**Supervisor:** Assist. Prof. Roman Kunič, PhD  
**Co-advisor:** Assist. Luka Pajek  
**Title:** Environmental impact of external walls made of natural materials  
**Document type:** Graduation thesis – university studies  
**Notes:** 28 p., 13 ann., 16 tab., 3 graph, 11 fig.  
**Key words:** Carbon footprint, straw, hemp, environmental impact

**Abstract**

One of the largest problems of today's world is global warming. Construction industry contributes greatly to this issue, mainly because of the methods of manufacturing the materials used in construction. The processes of manufacturing said materials that are commonly used in construction require very high temperatures. The energy for achieving the necessary temperature is gained mostly by burning fossil fuels. Because of the above mentioned problem we have tried to find the most environmentally friendly solution for building external walls. Within the framework of this thesis, we have focused on three natural materials – hemp, straw and wood. We used these materials in construction assemblies, calculated their carbon footprints and then compared the results with the carbon footprints of the construction assemblies that are most widely used in construction (reinforced concrete, bricks).

The thesis first describes what greenhouse gases and the CO<sub>2</sub> equivalent are, and describes the legislation. After that, the used materials (with an emphasis on straw and hempcrete) and the method of construction with these materials are described. In the end, the used structural assemblies and their carbon footprints are presented. In the last part of the thesis, we present the conclusion that the load-bearing straw bale structure (external wall) is the structural assembly with the minimum or negative carbon footprint. The structural assembly with a load-bearing structure of brick, which is only included in the thesis for comparison, has the highest carbon footprint.

## KAZALO VSEBINE

<b>IZJAVE .....</b>	<b>II</b>
<b>BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK .....</b>	<b>III</b>
<b>BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTARY INFORMATION AND ABSTRACT .....</b>	<b>IV</b>
<b>1 UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Toplogredni plini .....</b>	<b>1</b>
1.1.1 Kaj so toplogredni plini? .....	1
1.1.2 CO <sub>2</sub> ekvivalent .....	2
<b>1.2 Zakonodaja .....</b>	<b>2</b>
1.2.1 Kjotski protokol.....	2
1.2.2 Direktiva o energetske učinkovitosti stavb .....	2
<b>2 MATERIALI IN METODE .....</b>	<b>4</b>
2.1 Materiali.....	4
2.2 Metode.....	4
<b>3 PREGLED IZBRANIH MATERIALOV IN NJIHOVIH LASTNOSTI.....</b>	<b>5</b>
<b>3.1 Materiali za nosilne konstrukcije.....</b>	<b>5</b>
3.1.1 Les.....	5
3.1.2 Opečni zidaki .....	5
3.1.3 Armirani beton .....	5
<b>3.2 Materiali za zaščitne konstrukcije .....</b>	<b>5</b>
3.2.1 Slama oziroma slamnate bale.....	5
3.2.2 Konopljin pezdir.....	6
<b>3.3 Materiali za zaščito toplotne izolacije (TI).....</b>	<b>7</b>
3.3.1 Apno .....	7
3.3.2 Ilovica .....	7
<b>3.4 Ogljični odtis uporabljenih materialov .....</b>	<b>7</b>
<b>4 GRADNJA S SLAMO IN KONOPLJO.....</b>	<b>9</b>
<b>4.1 Slama in industrijska konoplja v Sloveniji .....</b>	<b>9</b>
4.1.1 Slama .....	9
4.1.2 Industrijska konoplja.....	10
<b>4.2 Sistem gradnje s slamnatimi balami in betonom iz konoplje .....</b>	<b>10</b>
4.2.1 Slamnate bale.....	10
4.2.1.1 Endoskeletni sistem iz lesa.....	10
4.2.1.2 Samonosilna konstrukcija iz slamnatih bal .....	11
<b>4.3 Beton iz konoplje .....</b>	<b>16</b>

---

<b>5</b>	<b>OGLJIČNI ODTIS IZBRANIH KONSTRUKCIJSKIH SKLOPOV .....</b>	<b>17</b>
5.1	Nosilna konstrukcija iz armiranega betona – eksoskelet .....	17
5.2	Nosilna konstrukcija iz opečnih zidakov – eksoskelet .....	17
5.3	Nosilna konstrukcija iz slamnatih bal – eksoskelet .....	18
5.4	Nosilna konstrukcija iz lesa – endoskelet .....	18
5.5	Nosilna konstrukcija iz lesa – endoskelet (toplotna izolacija iz slamnatih bal) .....	19
5.6	Nosilna konstrukcija iz lesa – endoskelet (toplotna izolacija iz konopljinega betona) ..	20
<b>6</b>	<b>DISKUSIJA .....</b>	<b>21</b>
6.1	Analiza okoljskih vplivov konstrukcijskih sklopov .....	21
6.1.1	Analiza pri toplotnih prehodnostih zunanje stene $U = 0,28$ ; $U = 0,20$ ; $U = 0,15$ $W/m^2K$ .....	21
6.1.2	Vpliv toplotne prehodnosti na debelino izolacije in izpuste toplogrednih plinov ..	22
<b>7</b>	<b>ZAKLJUČEK .....</b>	<b>26</b>
<b>VIRI .....</b>	<b>.....</b>	<b>27</b>
<b>PRILOGA A: KONSTRUKCIJSKI DETAJLI SAMONOSILNE KONSTRUKCIJE IZ SLAMNATIH BAL .....</b>	<b>.....</b>	<b>A1</b>



## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Uporabljeni materiali.....	4
Preglednica 2: Dimenzije klasične opeke in modularnega opečnega bloka .....	5
Preglednica 3: Ogljični odtis uporabljenih materialov.....	8
Preglednica 4: Število pridelanih slamnatih bal v Sloveniji po letih.....	9
Preglednica 5: Število novozgrajenih stavb in kvadratura po letih.....	9
Preglednica 6: Debelina stene iz slamnatih bal.....	15
Preglednica 7: Nosilna konstrukcija iz armiranega betona pri treh toplotnih prehodnostih. ....	17
Preglednica 8: Nosilna konstrukcija iz opečnih zidakov pri treh toplotnih prehodnostih. ....	17
Preglednica 9: Samonosilna konstrukcija iz slamnatih bal pri treh toplotnih prehodnostih. ....	18
Preglednica 10: Nosilna konstrukcija iz lesa – endoskelet pri treh toplotnih prehodnostih.....	18
Preglednica 11: Nosilna konstrukcija iz lesa – endoskelet (izolacija – slama) pri treh toplotnih prehodnostih.....	19
Preglednica 12: Nosilna konstrukcija iz lesa – endoskelet (izolacija – konopljin beton) pri treh toplotnih prehodnostih. ....	20
Preglednica 13: Ogljični odtis konstrukcijskih sklopov (KS) in razmerje v odstotkih (Opeka = 100%). .....	22
Preglednica 14: Sprememba debeline toplotne izolacije v odvisnosti od toplotne prehodnosti zunanje stene.....	23
Preglednica 15: Sprememba izpustov TGP pri povečevanju debeline TI.....	23
Preglednica 16: Masa konstrukcijskih sklopov na enoto površine.....	25

---

**KAZALO GRAFIKONOV**

Grafikon 1: Obnašanje neometane bale pod obtežbo .....	12
Grafikon 2: Obnašanje bale z ometom debeline 50,8 mm (2 mm × 25,4 mm) ter tlačno trdnostjo 1,72 MPa .....	12
Grafikon 3: Povprečje obnašanja slamnatih bal pod obtežbo .....	13

## KAZALO SLIK

Slika 1: Rast koncentracije toplogrednih plinov .....	2
Slika 2: Slama .....	6
Slika 3: Konopljin pezdir. ....	6
Slika 4: Uporaba ilovnatega notranjega ometa.....	7
Slika 5: Postopek priprave bale za preizkus. ....	11
Slika 6: Stik med slamnatimi balami in temelji. ....	14
Slika 7: Zunanja stena .....	15
Slika 8: Stena iz konopljinoga betona .....	16
Slika 9: Ogljični odtis materialov celotnih konstrukcijskih sklopov.....	21
Slika 10: Sprememba vrednosti izpustov TGP vseh materialov konstrukcijskih sklopov v odvisnosti od toplotne prehodnosti zunanje stene na enoto površine. ....	24
Slika 11: Ogljični odtis konstrukcijskih sklopov. ....	25

---

## **OKRAJŠAVE IN SIMBOLI**

EPS – Ekspandirani polistiren

KS – Konstrukcijski sklop

NK – Nosilna konstrukcija

TI – Toplotna izolacija

TGP – Toplogredni plini

## 1 UVOD

V današnjem času se soočamo s problemom globalnega segrevanja, h kateremu prispeva tudi gradbena industrija. Težava je v načinu proizvodnje materialov, ki se uporabljajo v gradbeništvu. Procesi za proizvodnjo gradbenih materialov, ki se najpogosteje uporabljajo v gradbeništvu, zahtevajo zelo visoke temperature; energijo za doseganje teh temperatur pa večinoma pridobivamo z izgorevanjem fosilnih goriv (TheShiftProject-DataPortal, 2014). K temu prispevajo materiali nosilnih konstrukcij, kot sta beton in opeka, in materiali zaščitnih konstrukcij, kot sta ekspanzirani polistiren (EPS) in kamena volna. Vsi ti materiali imajo visoko utelešeno (ali vsebovano) energijo (angl. *embodied energy*), ki je bila porabljena za njihovo proizvodnjo.

Namen diplomske naloge je analiza oziroma primerjava ogljičnega odtisa različnih materialov za nosilno in zaščitno konstrukcijo ter kombinacij teh materialov v konstrukcijskih sklopih pri uporabi endoskeletnega sistema gradnje. S tem želimo ugotoviti, ali lahko gradimo enakovredne ali bolj energetske učinkovite bivalne enote z manjšim vplivom na okolje. Pri analizi bomo upoštevali materiale, ki se najpogosteje uporabljajo pri gradnji, in naravne materiale, ki se uporabljajo redkeje.

V diplomski nalogi se bomo osredotočili na beton iz konoplje in na slamnate bale, ki bosta materiala zaščitne konstrukcije. Slamnate bale bomo v enem konstrukcijskem sklopu uporabili kot nosilno konstrukcijo ter toplotno in zvočno izolacijo. Drugi namen diplomske naloge je izpostaviti beton iz konoplje in slamnate bale kot potencialna gradbena materiala prihodnosti ter predstaviti sistem gradnje s tema materialoma.

Cilj diplomske naloge je ugotoviti, katera kombinacija materialov pri uporabi endoskeletnega sistema ima najnižji ogljični odtis. Izjema pri analizi bo samonosilna konstrukcija iz slamnatih bal, ki je tehnično gledano eksoskeletna gradnja.

Diplomska naloga je sestavljena iz 7 poglavij. Prvo poglavje predstavlja uvod, kjer je na kratko opisano, kaj naloga obravnava. V uvodu so predstavljeni toplogredni plini in enota, v kateri izražamo količino toplogrednih izpustov; nekaj besed je posvečenih tudi zakonodaji. V drugem poglavju smo našli izbrane materiale in predstavili metodo dela. V tretjem poglavju smo predstavili izbrane materiale in njihove lastnosti. Na slamo in konopljin beton ter način gradnje s tema materialoma smo se osredotočili v četrtem poglavju. V petem poglavju smo predstavili rezultate izračunov ogljičnega odtisa konstrukcijskih sklopov pri treh različnih toplotnih prehodnostih. Šesto poglavje smo posvetili analizi rezultatov. Sedmo in tudi zadnje poglavje je zaključek diplomske naloge, v katerem smo komentirali dobljene rezultate in predstavili zaključke.

### 1.1 Toplogredni plini

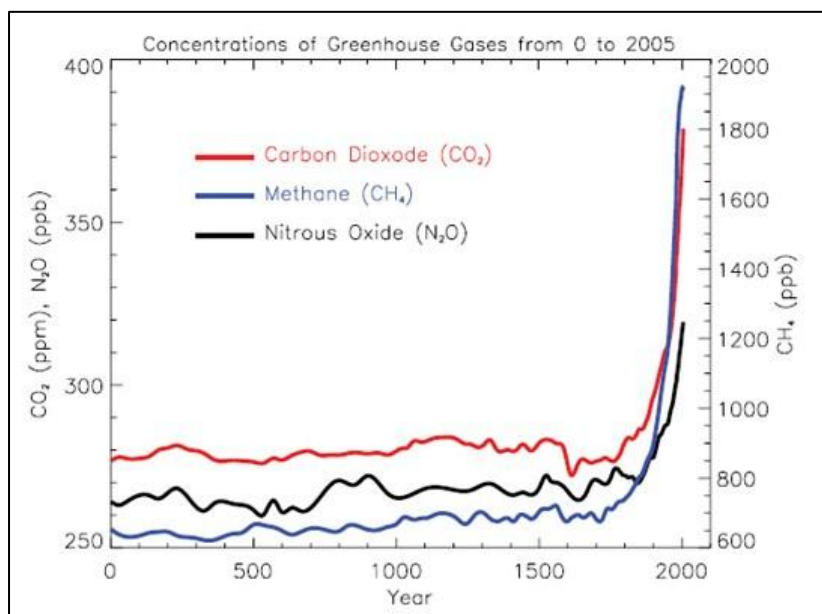
#### 1.1.1 Kaj so toplogredni plini?

Toplogredni plini (TGP) so plini, ki prepuščajo kratkovalovno sevanje Sonca in absorbirajo dolgovalovno oziroma infrardeče sevanje Zemlje. Z absorpcijem infrardečega sevanja toplogredni plini vplivajo na sevalno bilanco Zemlje, kar prispeva h konstantnemu višanju globalne temperature. Najpomembnejši toplogredni plin je ogljikov dioksid ( $\text{CO}_2$ ), katerega koncentracija se je od leta 1750 povečala za približno 40 %. Ogljikovemu dioksidu sledijo metan ( $\text{CH}_4$ ), didušikov oksid ( $\text{N}_2\text{O}$ ) in tako

imenovani F-plini, ki vključujejo fluorirane ogljikovodike (HFC), perfluorirane ogljikovodike (PFC) in žveplov heksafluorid ( $\text{SF}_6$ ) (Agencija RS za okolje, 2012).

Ogljikov dioksid  $\text{CO}_2$  je v Sloveniji leta 2012 k izpustom toplogrednih plinov (TGP) prispeval 82,9 % (Agencija RS za okolje, 2012).

Na Sliki 1 je prikazana rast koncentracije TGP od leta 0 do 2005.



Slika 1: Rast koncentracije toplogrednih plinov (Global greenhouse warming, 2016).

### 1.1.2 CO<sub>2</sub> ekvivalent

Da bi lahko primerjali in seštevali toplogredne pline med seboj, jih moramo najprej pomnožiti z njihovim toplogrednim potencialom, ki se izraža glede na toplogredni učinek  $\text{CO}_2$ . Ko TGP pomnožimo z njihovim toplogrednim potencialom in jih seštejemo, dobimo enoto, ki jo imenujemo ekvivalent  $\text{CO}_2$ . Za prikaz ogljičnega odtisa materialov izražamo enoto ekvivalent  $\text{CO}_2$  v  $\text{kg CO}_2\text{-e/m}^3$  ali  $\text{kg CO}_2\text{-e/kg}$  (Agencija RS za okolje, 2012).

## 1.2 Zakonodaja

### 1.2.1 Kjotski protokol

Kjotski protokol je dopolnitev Okvirne konvencije Združenih narodov o spremembi podnebja in predstavlja zelo pomemben pravni instrument za spopadanje s podnebnimi spremembami. S ciljem, da bi zmanjšali emisije TGP, ki povzročajo globalno segrevanje ozračja, so se industrijske države zavezale, da bi v letih 2008–2012 zmanjšale izpuste TGP za najmanj 5 % v primerjavi z letom 1990. Kjotski protokol je podpisalo 141 držav članic. Za države članice Evropske unije, ki so bile članice že pred letom 2004, obvezno znižanje izpustov TGP znaša 8 % (Anon., 2011).

### 1.2.2 Direktiva o energetske učinkovitosti stavb

Kot že samo ime pove, je cilj te zakonodaje učinkovito izkoriščanje energije v stavbah. Nanaša se na energijo, ki se jo uporablja za ogrevanje, pripravo tople vode, hlajenje, prezračevanje in razsvetljava. Direktiva predpisuje, da morajo nacionalni organi določiti minimalne zahteve glede energetske

učinkovitosti, ki bodo tudi stroškovno učinkovite in jih je treba pregledati najmanj vsakih pet let. Nacionalni organi so zadolženi za vodenje sistema izdaje energetskih izkaznic (Evropski parlament, Svet Evropske unije, 2015).

## 2 MATERIALI IN METODE

### 2.1 Materiali

V Preglednici 1 so prikazani materiali, ki smo jih izbrali za analizo v okviru diplomske naloge. Del teh materialov predstavljajo materiali, ki se najpogosteje uporabljajo pri sodobni gradnji, drugi del pa naravni materiali, ki se uporabljajo malo manj. Drugi del materialov, kot so slama, konopljin beton in ilovica, smo izbrali, ker smo hoteli preveriti njihov vpliv na okolje v primerjavi z najpogosteje uporabljenimi materiali.

Preglednica 1: Uporabljeni materiali. (Petrovič, 2015)

Št.	Material	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]
1	Opečni zidaki	800	0,33
2	Armirani beton	2500	2,33
3	Rezan mehki les (smreka)	470	0,14
4	Cementna malta	2100	1,4
5	OSB plošča	660	0,14
6	Fasadna malta	1850	0,7
7	Mavčno-kartonska plošča	1400	0,7
8	PE folija	1000	0,19
9	Kamena volna	80	0,034
10	Konopljin beton*	330	0,07
11	Slamnata bala**	85	0,06 <sup>⊥</sup> ; 0,049 <sup>⊥</sup>
12	Ilovnati omet**	1600	0,8
13	Celulozna vlakna	50	0,04

⊥ – vzporedno z vlakni \*vir = (Busbridge, 2010)

⊥ – pravokotno na vlakna \*\*vir = (Brojan, 2013)

### 2.2 Metode

Pri izdelavi diplomske naloge smo uporabili primerjalno analizo, kjer smo primerjali več materialov in konstrukcijskih sklopov. Ogljični odtis smo računali za 1 m<sup>2</sup> zunanje stene. Pri analizi smo upoštevali tri različne toplotne prehodnosti zunanje stene (U):  $U_1 = 0,28$  W/m<sup>2</sup>K,  $U_2 = 0,20$  W/m<sup>2</sup>K, in  $U_3 = 0,15$  W/m<sup>2</sup>K.

Z upoštevanjem različnih koeficientov toplotne prehodnosti smo poskusili ugotoviti, kako se sorazmerno spreminja debelina toplotne izolacije in kako to vpliva na ogljični odtis celotnega konstrukcijskega sklopa.

Pri računanju ogljičnega odtisa in toplotne prehodnosti zunanje stene nismo upoštevali nosilne konstrukcije pri endoskeletnih sistemih.

Za račun toplotne prehodnosti stene smo uporabili brezplačnega programskega orodja URSA 4.0. Za račun ogljičnega odtisa smo pomnožili debelino sloja v konstrukcijskem sklopu s pripadajočim ogljičnim odtisom na kubični meter, da smo dobili ogljični odtis na kvadratni meter obravnavanega sloja: [m] x [kg CO<sub>2</sub>-e/m<sup>3</sup>] = [kg CO<sub>2</sub>-e/m<sup>2</sup>]. Potem smo sešteli ogljični odtis posameznih slojev in dobili ogljični odtis celotnega konstrukcijskega sklopa na kvadratni meter.

Vsi izračuni so narejeni za idealni prerez zunanje stene.



### 3 PREGLED IZBRANIH MATERIALOV IN NJIHOVIH LASTNOSTI

#### 3.1 Materiali za nosilne konstrukcije

##### 3.1.1 Les

Les kot material nosilne konstrukcije sodi med bolj zahtevne gradbene materiale predvsem zato, ker je naravni material in ne moremo vplivati na njegove lastnosti, ker so odvisne od načina rasti in vrste lesa. V nosilni konstrukciji lahko uporabljamo masiven ali lepljen lameliran les. Pri uporabi masivnega lesa moramo les zaščititi pred biološkimi škodljivci in vremenskimi vplivi (Srpčič, 2009).

Ogljični odtis lesa, ki je pripravljen za gradnjo, je prikazan v Preglednici 3.

##### 3.1.2 Opečni zidaki

Opeka ima v gradbeništvu večtisočletno tradicijo. Prve opeke so bile izdelane ročno in sušene na soncu, pozneje so bile pečene na ognju in v pečeh. Danes se opečni zidaki izdelujejo s pomočjo mehanizacije, kar pomeni, da se za njihovo izdelavo porabi še več energije. Velikost opečnih zidakov se je z leti spreminjala – vse do dimenzije modularnih opečnih blokov, ki jih poznamo v gradbeništvu danes. Modularni opečni blok je večji od klasične opeke, kar omogoča hitrejšo gradnjo in manj orabljenega veznega materiala na enoto površine (Brojan, 2009).

Dimenzije klasične opeke in modularnega opečnega bloka so prikazane v Preglednici 2.

Preglednica 2: Dimenzije klasične opeke in modularnega opečnega bloka  
(Brojan, 2009).

Opeka	Dimenzije opeke	Število opek/m <sup>2</sup>
Klasična opeka	6,5/12/25	54
Modularni opečni blok	19/19/29	17

Uteležena energija oziroma ogljični odtis opečnih zidakov je prikazan v Preglednici 3.

##### 3.1.3 Armirani beton

Betonsko mešanico v osnovi sestavljajo agregat, cement, zrak, voda in dodatki za reguliranje lastnosti betona. Betonska mešanica postane beton, ko se vsa zrnca cementa hidratizirajo. Hitrost in uspešnost hidratizacije betona je odvisna od temperature in vlažnosti zraka (> 80 %). Betoni, ki se običajno uporabljajo v gradbeništvu, imajo gostoto od 2200 do 2400 kg/m<sup>3</sup> in tlačno trdnost nad 15 MPa (Žarnič, 2005).

Betonu kot gradbenemu materialu pripišemo samo tlačno nosilnost; natezne nosilnosti ne upoštevamo zaradi zanemarljivo majhnih vrednosti. Zaradi te lastnosti betona je treba beton armirati za prenos nateznih napetosti, ki so prisotne v gradbenih konstrukcijah (Žarnič, 2005).

Uteležena energija oziroma ogljični odtis armiranega betona je prikazan v Preglednici 3.

#### 3.2 Materiali za zaščitne konstrukcije

##### 3.2.1 Slama oziroma slamnate bale

Slama so posušena stebila žit brez žitnega klasa, kot so pšenica, ajda, rž itn. Slama ne vsebuje hranilnih snovi. V Sloveniji se večinoma uporablja za nastiljanje živini, medtem ko je v Evropi in Ameriki velikokrat stranski in neuporaben produkt proizvodnje hrane. Slama je zlato rumenkaste barve in ima nekaj milimetrov debelo steblo (Lampret, 2011).

Slika 2 prikazuje slamo, ki ni zvezana v slamnate bale.



Slika 2: Slama (slama.hr, 2008).

Slamnate bale predstavljajo stisnjeno in zvezano slamo v obliki kvadrov v dimenzijah:  $d/\acute{s}/v=93/46/36$ . Dimenzije lahko nihajo v odvisnosti od balirnega stroja.

Utelesena energija oziroma ogljični odtis slame je prikazan v Preglednici 3.

### 3.2.2 Konopljin pezdir

Konopljin pezdir predstavlja jedro stebela konopljne rastline. Dobimo ga tako, da stebela odrasle industrijske konoplje požemo, zmeljemo in posušimo (Zver, 2013). Za vgradnjo v steno je optimalna dolžina koščka konopljinega pezdirja do 5 cm; za omet in strojno brizganje se uporabljajo finejša vlakna. Konopljin pezdir je večinoma sestavljen iz celuloze, in sicer iz 37 % celuloze, 16,5 % hemiceluloze, 21,8 % lignina, 5 % pektina, 8,9 % ekstraktov in 10,8 % pepela, kremenca in tanina (Sani Okretič Resulbegović, 2016).

Na Sliki 3 je prikazan konopljin pezdir.



Slika 3: Konopljin pezdir (Sani Okretič Resulbegović, 2016).

Utelesena energija oziroma ogljični odtis konopljinega pezdirja je prikazan v Preglednici 3.

### 3.3 Materiali za zaščito toplotne izolacije (TI)

#### 3.3.1 Apno

Apno se pridobiva z žarjenjem apnenca v pečeh na temperaturi okoli 950 °C, kjer pride do kemične reakcije, pri kateri nastane živo apno. Živo apno, ki je v kosih, nato zmeljejo v fini prah. Živo apno gasimo z dodajanjem vode. V tem procesu je potrebna velika količina vode. Ko je proces gašenja končan, dobimo apneno kašo, imenovano gašeno apno. Glede na sestavo gašenega apna in količino vode, ki jo vsebuje, ločimo hidratizirano in hidravlično apno (Žarnič, 2005).

Apno se uporablja kot vezivo pri izdelavi malte ter tudi za notranje in zunanje omete (Žarnič, 2005). Apno bo v okviru diplomske naloge uporabljeno kot material za notranje in zunanje omete ter kot vezivo pri betonu iz konoplje.

#### 3.3.2 Ilovica

Ilovica predstavlja težko, manj rodovito prst iz gline, pomešane s peskom (Inštitut za slovenski jezik Frana Ramovša ZRC SAZU, brez datuma). Ilovica je eden najstarejših materialov, ki se je uporabljal povsod po svetu. Uporabljali so jo za izdelavo ilovnatih opek, ki so jih sušili na soncu in nato vgradili v steno z vezivom iz apnene malte. Danes se ilovica ponovno uporablja kot material za notranje omete (Zver, 2013).

V diplomski nalogi bo ilovica uporabljena kot material za notranji omet.

Slika 4 prikazuje uporabo ilovnatega notranjega ometa in kot material za oblikovanje.



Slika 4: Uporaba ilovnatega notranjega ometa (Zver, 2013).

### 3.4 Ogljični odtis uporabljenih materialov

V Preglednici 3 so prikazane lastnosti uporabljenih materialov. V prvem stolpcu je zabeležena gostota materiala, v drugem stolpcu pa toplotna prevodnost materiala. Tretji in četrti stolpec prikazujeta

ogljčni odtis vsakega od materialov, in sicer je v tretjem stolpcu ogljčni odtis na kg materiala, v četrtem pa ogljčni odtis na m<sup>3</sup> materiala.

Preglednica 3: Ogljčni odtis uporabljenih materialov. (Petrovič, 2015)

Št.	Material	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	Vred. oglj. odtisa [kg CO <sub>2</sub> -e/kg]	Vred. oglj. odtisa [kg CO <sub>2</sub> -e/m <sup>3</sup> ]
1	Opečni zidaki	800	0,33	0,271	216,8
2	Armirani beton	2500	2,33	0,179	447,5
3	Rezan mehki les	470	0,14	0,181	85
4	Cementna malta	2100	1,4	0,243	510,3
5	OSB plošča	660	0,14	0,470	310
6	Fasadna malta	1850	0,7	0,216	399,6
7	Mavčno-kartonska plošča	1400	0,7	0,162	226,8
8	PE folija	1000	0,19	1,85	1850
9	Kamena volna	80	0,034	1,080	86,40
10	Konopljin beton*	330	0,07	-0,012	-4,0
11	Slamnata bala**	85	0,06 <sup>l</sup> ; 0,049 <sup>l</sup>	-1,25	-106,25
12	Ilovnati omet**	1600	0,8	-0,003	-4,8
13	Celulozna vlakna	50	0,04	0,365	18,25

\*vir: (Busbridge, 2010)

\*\*vir: (Brojan, 2013)

l – vzporedno z vlakni

l – pravokotno na vlakna

## 4 GRADNJA S SLAMO IN KONOPLJO

### 4.1 Slama in industrijska konoplja v Sloveniji

#### 4.1.1 Slama

V tretjem poglavju smo že omenili in na kratko predstavili slamo. V tem delu pa si bomo pogledali, kolikšne količine slame oziroma slamnatih bal proizvedemo v Sloveniji.

Količino slame, ki je proizvedena v Sloveniji, lahko izračunamo z uporabo žetvenega indeksa, ki znaša 0,5 (Malešević, 2008). Žetveni indeks 0,5 pomeni, da je količina zrnja enaka količini pridelane slame. Podatki, ki smo jih pridobili od Statističnega Urada Republike Slovenije, so prikazani v Preglednici 4. Z njihovo pomočjo smo izračunali naslednje vrednosti količine pridelane slame:

Preglednica 4: Število pridelanih slamnatih bal v Sloveniji po letih (Statistični urad RS, 2016).

Leto	Posejane površine [ha]*	Pridelek pšenice [t]*	Pridelek na površino [t/ha]*	Žetveni indeks	Količina slame [t]	Število slamnatih bal (15 kg/balo)
2005	29.845	140.919	4,7	0,5	140.919	$9,395 \times 10^6$
2006	31.938	134.168	4,2	0,5	134.168	$8,945 \times 10^6$
2007	31.861	133.019	4,2	0,5	133.019	$8,868 \times 10^6$
2008	35.264	160.036	4,5	0,5	160.036	$10,669 \times 10^6$
2009	34.313	136.498	4,0	0,5	136.498	$9,0999 \times 10^6$
2010	31.714	152.894	4,8	0,5	152.894	$10,193 \times 10^6$
2011	29.440	153.005	5,2	0,5	153.005	$10,2003 \times 10^6$
2012	34.299	187.382	5,5	0,5	187.382	$12,4921 \times 10^6$
2013	31.379	137.414	4,4	0,5	137.414	$9,1609 \times 10^6$
2014	32.707	172.233	5,3	0,5	172.233	$11,4822 \times 10^6$
Povprečje:						9.111.040

\* Podatki so pridobljeni od Statističnega urada Republike Slovenije.

Na osnovi računa, ki smo ga pridobili na spletni strani [www.harvesthomes.ca](http://www.harvesthomes.ca), upoštevamo, da je za gradnjo pritlične hiše s površino 150 m<sup>2</sup> (bruto) potrebnih 350 bal (Evolve Builders Group Inc., 2016).

Na osnovi tega podatka in podatkov v Preglednici 5 bomo naredili enostaven izračun.

Preglednica 5: Število novozgrajenih stavb in kvadratura po letih (Statistični urad RS, 2016).

Leto	Število novozgrajenih stavb v Sloveniji*	Kvadratura* [m <sup>2</sup> ]	Povprečna kvadratura [m <sup>2</sup> ]
2013	3.443	1.205.869	350,24
2014	3.166	1.007.637	318,27
2015	5.090	1.185.800	232,97
Povprečje:	3.899,66	1.133.102	300,49

\* Podatki so pridobljeni od Statističnega urada Republike Slovenije.

Hipotetični izračun:

Če upoštevamo, da se s povečevanjem kvadrature linearno povečuje tudi število bal, dobimo do 701,1 slamnate bale za en objekt s povprečno kvadratur 300,49 m<sup>2</sup>. Povprečje v zadnjih treh letih je 3.899,66 objektov na leto, kar je enako 2.734.051,626 bal. Iz tega sledi, da bi potrebovali 30 % pridelane slame za gradnjo vseh objektov na letni ravni, kar nam omogoča veliko izbiro pri iskanju ustreznih bal.

#### 4.1.2 Industrijska konoplja

Industrijska konoplja (*Cannabis sativa* L. var. *sativa*) oziroma navadna konoplja, kot jo imenuje doc. dr. Barbara Čeh, je enoletna rastlina, ki spada v družino konopljevok (*Cannabaceae*) in rod *Cannabis*. Zraste lahko od 0,5 m do 5 m visoko, kar je predvsem odvisno od ekotipa. Glavna razlika med industrijsko konopljo in indijsko konopljo (*Cannabis sativa* L. var. *indica*) je v vsebnosti psihoaktivne snovi delta-9-tetrahidrokanabinol (THC) (Čeh, 2009).

Industrijska konoplja se uporablja večinoma za pridelavo vlaken in semen. Odrasla rastlina vsebuje 0–12 % semen, 5–20 % listja, 10–20 % vlaken in 60–70 % olesenelega dela stebela – pezdirja. Pridelek konopljinega pezdirja znaša od 10 do 12 m<sup>3</sup>/ha; uporaben je za veliko stvari, vendar nas zanima njegova uporaba v gradbeništvu kot izolacijski material (Čeh, 2009).

### 4.2 Sistem gradnje s slamnatimi balami in betonom iz konoplje

#### 4.2.1 Slamnate bale

Kot smo že omenili, bomo slamnate bale v okviru te naloge uporabili kot polnilo v steni z lesenim endoskeletnim sistemom ter kot material, ki je istočasno nosilna konstrukcija in toplotna ter zvočna izolacija.

##### 4.2.1.1 Endoskeletni sistem iz lesa

Pri taki gradnji imamo manj težav kot pri samonosilni konstrukciji iz slamnatih bal, predvsem zaradi uporabe lesa kot standardiziranega nosilnega materiala. Slamnate bale v endoskeletni konstrukciji iz lesa imajo vlogo polnila oziroma toplotne in zvočne izolacije.

Podatke za takšno gradnjo nam je posredoval mag. Igor Povhe, univ. dipl. inž. grad., lastnik podjetja InPro22 d.o.o., ki se ukvarja z gradnjo s slamnatimi balami.

#### Opis gradnje

Pri tem načinu gradnje se bomo omejili samo na opis sestave in izvedbe zunanje stene, ker je diplomska naloga usmerjena v analizo zunanjih sten. Tako smo se odločili tudi zaradi zadostnega poznavanja endoskeletnega sistema iz lesa.

Debelina zunanje stene znaša 46 cm. Stena je sestavljena iz zunanjšega in notranjšega ometa (vsak 4 cm) ter iz osrednjega dela iz slamnatih bal (38 cm), kjer je tudi nosilna konstrukcija. Slamnate bale so pri tej gradnji postavljene vodoravno na ožjo stranico (angl. *bale on edge*).

Nosilna konstrukcija zunanje stene je sestavljena iz lesenih plohov prereza 5 cm × 20 cm ki potekajo po višini stene. Po dolžini stene so razporejene v rastru 100 cm (približno dolžine bale). Po višini so stabilizirane z uklonskimi podporami (deske 3 cm × 20 cm × 100 cm), razporejenimi v rastru 50 cm (približno višine bale, postavljene na ožjem robu).

Ko je nosilna konstrukcija končana, slamnate bale vgradimo v »predale«, ki jih tvorijo plohi in deske, nato prerežemo vrvi, ki držijo slamo skupaj, da se slama sprostí in zapolni celoten prostor okoli sebe, in se znebimo toplotnih mostov, ustvarjenih z nosilno konstrukcijo.

Na koncu se zunanost stene obdela z motorno žago, da se vse poravná. Notranji del stene se ometa z ilovico, zunanji del pa z apnenim ometom (oba ometa debeline 4 cm) (Povhe, 2016).

#### 4.2.1.2 Samonosilna konstrukcija iz slamatih bal

Lastnosti slamnate bale pri gradnji samonosilne konstrukcije se razlikujejo od graditelja do graditelja. Vzrok je v tem, da takšna gradnja še ni uveljavljena in standardizirana ter da se lastnosti bal pri različnih dobaviteljev razlikujejo.

V okviru diplomske naloge se bomo omejili na gradnjo z balami, ki so postavljene vodoravno na širšo stranico (angl. *flat bale*).

Za zgoraj omenjeno orientacijo slamnate bale smo se odločili na osnovi raziskave, ki sta jo izvedla Stephen Vardy in Colin MacDougall (Vardy, 2006). Ugotovila sta, da bale, ki so položene vodoravno na širšo stranico, prenesejo večje obremenitve zaradi mehanizma porušitve in večje površine ploskve, na katero deluje obtežba. (Vardy, 2006) .

#### Opis raziskave

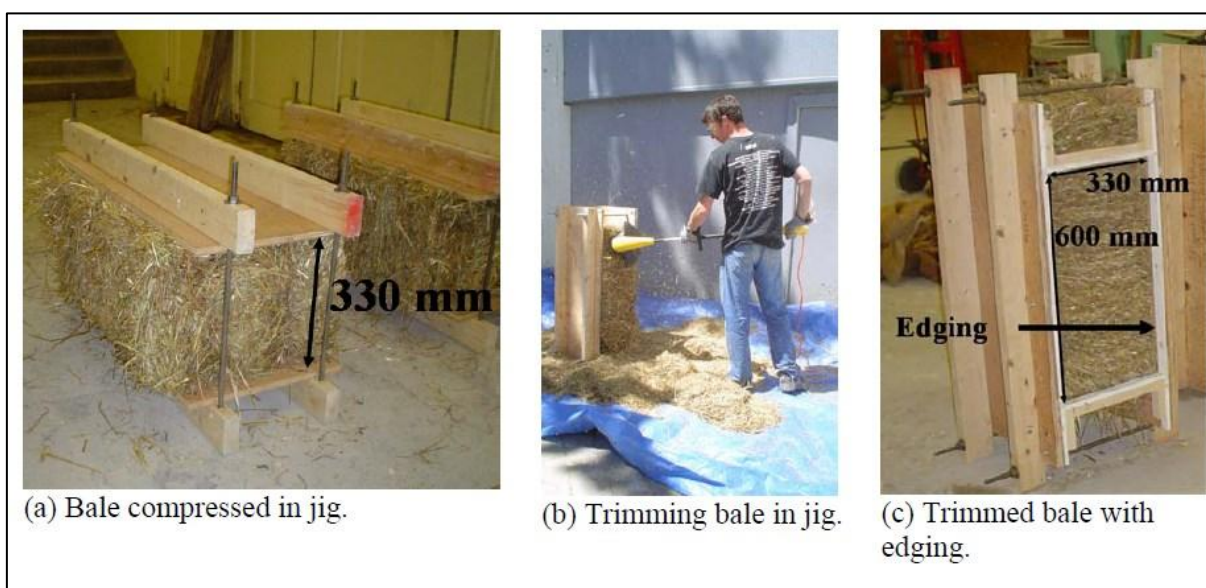
Na kratko bomo predstavili metodo raziskave (Vardy, 2006) in zaključke, da si bomo lažje predstavljali, kako se slamnate bale obnašajo v kombinaciji z ometom.

Slamnate bale, ki sta jih avtorja uporabila v raziskavi, so imele naslednje lastnosti:

- Dimenzije: višina/širina/dolžina = 35/50/80 cm
- Gostota:  $\rho = 85 \text{ kg/m}^3$

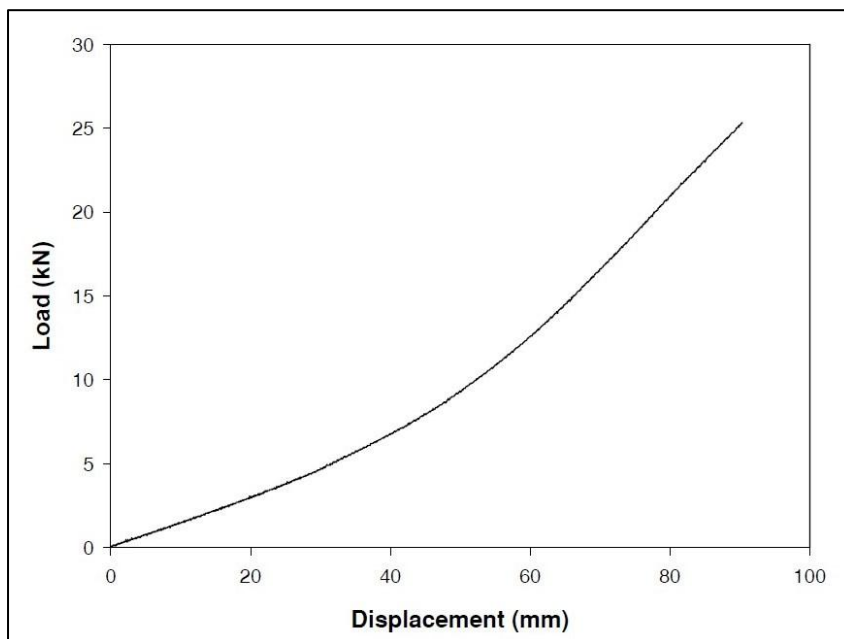
Uporabljeni so bili ometi s tlačno trdnostjo 0,69 MPa, 1,20 MPa in 1,72 MPa ter debeline 12,7 mm, 25,4 mm in 38,1 mm, z dolžino 60 cm in širino 33 cm. Mešanica ometa je bila sestavljena v razmerju 4,5 : 1,25 : 0,25 = pesek : apno : cement. Različne trdnosti so bile dosežene z različnimi količinami vode.

V raziskavi so bile bale najprej stisnjene do višine 33 cm, saj se bale pri dejanski gradnji stisnejo, ko je stena končana, nato pa se stena ometa. Širina bale je bila zmanjšana na 40,5 cm zaradi lažjega kontroliranja širine in priprave ravne površine za nanašanje ometa. Postopek priprave bale za preizkus je prikazan na Sliki 5.



Slika 5: Postopek priprave bale za preizkus (Vardy, 2006).

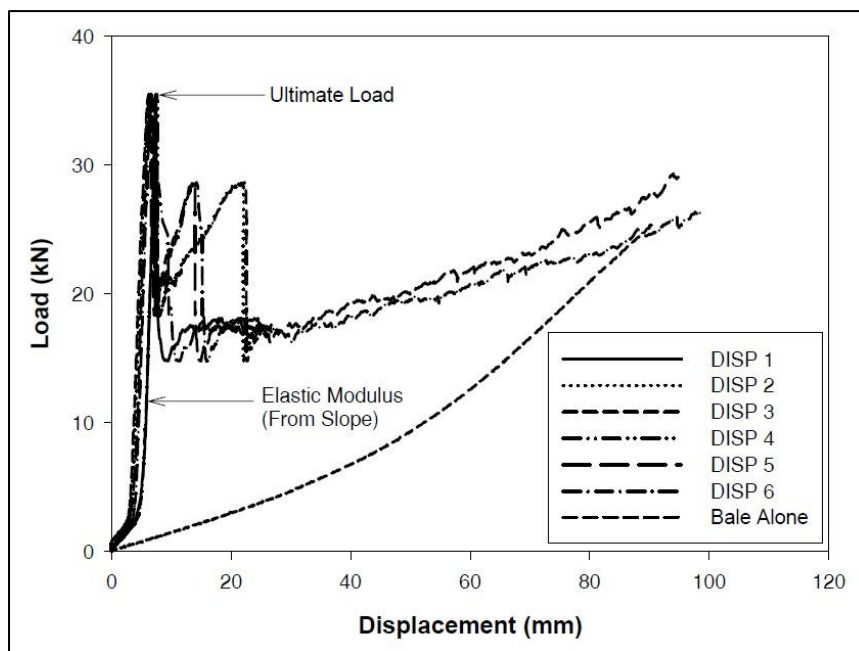
Najprej sta preizkusila bale brez ometa in določila graf v odvisnosti od velikosti sile in posedanja bale, ki je prikazan na Grafikonu 1.



Grafikon 1: Obnašanje neometane bale pod obtežbo (Vardy, 2006).

Iz zgornjega grafikona je razvidno, da slamnata bala lahko prenese precej veliko obtežbo, vendar z zelo velikimi posedki.

Spodnji Grafikon 2 prikazuje obnašanje ometane slamnate bale z debelino ometa 25,4 mm na vsaki strani in tlačno trdnostjo 1,72 MPa.



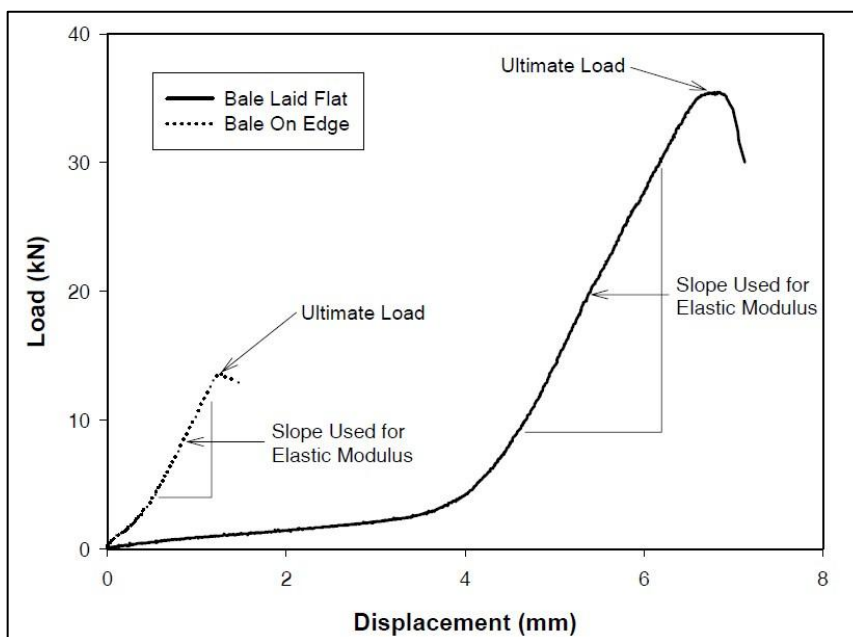
Grafikon 2: Obnašanje bale z ometom debeline 50,8 mm (2 mm × 25,4 mm) ter tlačno trdnostjo 1,72 MPa (Vardy, 2006).



Iz zgornjega grafikona je razvidno, da lahko slamnata bala s skupnim premerom ometa 50,8 mm in 405 mm slame prenese obtežbo do 35 kN s posedanjem 5–10 mm (krivulje DISP 1–DISP 6 predstavljajo odčitane vrednosti iz šest različnih točk obtežbe na površju).

Posedanje za 10 mm predstavlja pomik za 3 % (višina preizkušanca je 330 mm).

Iz vseh preizkusov sta Stephen Vardy in Colin MacDougall dobila povprečni odziv slamnatih bal, ki je predstavljen na spodnjem Grafikonu 3.



Grafikon 3: Povprečne obnašanja slamnatih bal pod obtežbo (Vardy, 2006).

Velikega dela raziskave nismo vključili v nalogo, saj je bil cilj omembe te raziskave, da dobimo zgolj občutek, kakšne obremenitve lahko prenašajo slamnate bale in kako se obnašajo pri teh obremenitvah.

### Opis gradnje

Gradnjo s slamnatimi balami bomo opisali tako, kot poteka dejanska gradnja od temeljev do strehe.

### Temelji

Temelji so lahko izvedeni kot pasovni temelji ali temeljna plošča. Pod potekom vsake nosilne stene se izvede stik med slamnatimi balami in temelji oziroma obroč na talni plošči, kot je prikazano na Sliki 6.



Slika 6: Stik med slamnatimi balami in temelji (Huff 'n' Puff Constructions, 2016).

Prerez letev, ki jih je uporabil Peter Walker (Walker, 2004) v svoji študiji o tlačni trdnosti slamnatih bal, je bil 150 mm/50 mm. Stik med temelji se je malo bolj razlikoval od prikazanega na sliki. Walker je namreč uporabil že omenjene letve in jih prekril z 18-milimetrskimi OSB-ploščami, namesto da bi odprtine zapolnil z gramozom (Walker, 2004).

Pri vsaki gradnji so najpomembnejši detajli izvedbe. Zato smo poiskali detajle izvedbe in jih našli na spletni strani StrawWorks (StrawWorks Ltd, 2016).

Detajl izvedbe obroča na talni plošči je prikazan na Skici 1 v Prilogi A (StrawWorks Ltd, 2016).

Detajl z dimenzijami elementov obroča na talni plošči je prikazan na Skici 2 v Prilogi A (StrawWorks Ltd, 2016).

### **Talna plošča**

Način izvedbe talne plošče je prikazan na Skici 3 v Prilogi A (StrawWorks Ltd, 2016).

### **Zunanja stena**



Slika 7: Zunanja stena (Gruber, 2016).

Zunanja stena iz slamnatih bal je zelo enostaven konstrukcijski sklop, ki ga sestavljajo slamnate bale, ilovnati in apneni omet (Slika 7). Debelina zunanje stene je predvsem odvisna od tega, kako je obrnjena slamnata bala in kakšnih dimenzij je, medtem ko se debeline ometa načeloma ne spreminjajo. V Preglednici 6 je prikazana debelina stene za balo z dimenzijami 30 cm × 40 cm × 90 cm (Brojan, 2013).

Preglednica 6: Debelina stene iz slamnatih bal (Brojan, 2013).

<b>MATERIAL</b>	<b>DEBELINA[m]</b>
Ilovnati omet	0,035
Slamnata bala	0,4
Ilovnati omet	0,02
Apneni omet	0,015
Skupaj	0,47

Detajl ležišča slamnatih bal je prikazan na Skici 4 v Prilogi A. (StrawWorks Ltd, 2016).

Detajl izvedbe lesenega okvirja za okno je prikazan na Skici 5 v Prilogi A. (StrawWorks Ltd, 2016).

Detajl povezovanja okna z lesenim okvirjem je prikazan na Skici 6 v Prilogi A. (StrawWorks Ltd, 2016).

Detajl izvedbe vrat je prikazan na Skici 7 v Prilogi A (StrawWorks Ltd, 2016).

### **Medetažna konstrukcija**

Medetažna konstrukcija je navadno izvedena kot rebrasti strop (glej Sliko 7) kjer se med rebra vgradi toplotno izolacijo. Ker ni smiselno uporabljati slamnatih bal za izolacijo medetažne konstrukcije (saj ni potrebe po tako močni toplotni izolaciji), lahko uporabimo drugo izolacijo oziroma slamo, ki ni zvezana v slamnate bale, da dosežemo manjše plasti izolacije (Povhe, 2016).

Kako izvedemo horizontalno vez, je prikazano na Skici 8 v Prilogi A (StrawWorks Ltd, 2016).

### **Nadstropje**

Način povezovanja stene v pritličju s steno v nadstropju oziroma mansardi in medetažno konstrukcijo smo pokazali že v Prilogi 8. Ko je že izveden detajl povezovanja, se z gradnjo nadaljuje enako kot v pritličju.

Izvedba ležišča slamnatih bal v nadstropju oziroma mansardi je prikazana na Skici 9 v Prilogi A (StrawWorks Ltd, 2016).

### **Zaključek stene in povezava stene s streho**

Detajl izvedbe zaključka stene je prikazan na Skici 10 v Prilogi A (StrawWorks Ltd, 2016).

Detajl izvedbe povezave med zunanjo steno in poševno streho je prikazan na Skici 11 v Prilogi A (StrawWorks Ltd, 2016).

Detajl izvedbe povezave med zunanjo steno in ravno streho je prikazan na Skici 12 v Prilogi A (StrawWorks Ltd, 2016).

### 4.3 Beton iz konoplje

Najprej je treba omeniti, da lastnosti (gostota, toplotna prevodnost, nosilnost itn.) betona iz konoplje nihajo v odvisnosti od sestave mešanice (razmerje med apnom, konopljinim pezdirjem in vodo).

Pri betonu iz konoplje se bomo pri opisu gradnje in konstrukcije tako kot pri endoskeletnem sistemu s slamnatimi balami omejili na zunanjo steno.

Beton iz konoplje (angl. *hempcrete*) predstavlja zmes vode, gašenega apna in konopljinega pezdirja. Čeprav ta material imenujemo »beton« iz konoplje, njegove nosilne lastnosti niso najboljše, zato je potrebna nosilna konstrukcija, konopljin beton pa ima vlogo materiala zaščitne konstrukcije.

Za različne konstrukcijske sklope (streho, medetažo, zunanjo steno, tla proti terenu itn.) se lahko uporabljajo različni recepti za pripravo zmesi.

Kot je razvidno iz spodnje slike, se nosilna konstrukcija nahaja v sredini stene (lahko tudi na notranji strani) in je zalita s konopljinim betonom. Gradnja poteka tako, da se najprej zgradi nosilno konstrukcijo, nato se postavi opaž in se vanj vlije beton (Busbridge, 2010).

V okviru diplomske naloge bomo za nosilno konstrukcijo uporabili lesene stebre s prerezom 5 cm × 10 cm in za polnilo konopljin beton, tako imenovani »Tradical Hempcrete«, za katerega smo lahko dobili vse potrebne podatke.



Slika 8: Stena iz konopljinega betona (Designblendz LLC, 2015).

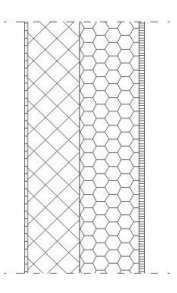
## 5 OGLJIČNI ODTIS IZBRANIH KONSTRUKCIJSKIH SKLOPOV

Toplotne prehodnosti in ogljični odtis konstrukcijskih sklopov so izračunani za idealni prerez (pri endoskeletnih konstrukcijah leseni stebri niso upoštevani).

### 5.1 Nosilna konstrukcija iz armiranega betona – eksoskelet

V Preglednici 7 je prikazan ogljični odtis vsakega materiala, uporabljenega v konstrukcijskem sklopu, in ogljični odtis celotnega konstrukcijskega sklopa pri treh različnih toplotnih prehodnostih.

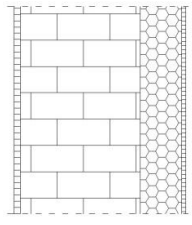
Preglednica 7: Nosilna konstrukcija iz armiranega betona pri treh toplotnih prehodnostih.

	<b>U = 0,28 W/m<sup>2</sup>K</b> (U <sub>dej</sub> = 0,277 W/m <sup>2</sup> K)	<b>U = 0,20 W/m<sup>2</sup>K</b> (U <sub>dej</sub> = 0,203 W/m <sup>2</sup> K)	<b>U = 0,15 W/m<sup>2</sup>K</b> (U <sub>dej</sub> = 0,149 W/m <sup>2</sup> K)	
<i>Material</i>	<i>Debelina [cm]</i>	<i>Debelina [cm]</i>	<i>Debelina [cm]</i>	
Cementna malta	0,5	0,5	0,5	
Armirani beton	10	10	10	
Kamena volna	11,5	16	22	
Fasadna malta	1	1	1	
<i>Skupaj</i>	<b>23</b>	<b>27,5</b>	<b>33,5</b>	
<b>Ogljični odtis [kg CO<sub>2</sub>-e/m<sup>2</sup>]</b>				
Cementna malta	2,55	2,55	2,55	
Armirani beton	44,75	44,75	44,75	
Kamena volna	9,94	13,82	19,01	
Fasadna malta	4,00	4,00	4,00	
<i>Skupaj</i>	<b>61,23</b>	<b>65,12</b>	<b>70,31</b>	

### 5.2 Nosilna konstrukcija iz opečnih zidakov – eksoskelet

V Preglednici 8 je prikazan ogljični odtis vsakega materiala, uporabljenega v konstrukcijskem sklopu, in ogljični odtis celotnega konstrukcijskega sklopa pri treh različnih toplotnih prehodnostih.

Preglednica 8: Nosilna konstrukcija iz opečnih zidakov pri treh toplotnih prehodnostih.

	<b>U = 0,28 W/m<sup>2</sup>K</b> (U <sub>dej</sub> = 0,277 W/m <sup>2</sup> K)	<b>U = 0,20 W/m<sup>2</sup>K</b> (U <sub>dej</sub> = 0,197 W/m <sup>2</sup> K)	<b>U = 0,15 W/m<sup>2</sup>K</b> (U <sub>dej</sub> = 0,153 W/m <sup>2</sup> K)	
<i>Material</i>	<i>Debelina [cm]</i>	<i>Debelina [cm]</i>	<i>Debelina [cm]</i>	
Cementna malta	1,5	1,5	1,5	
Opeka	29	29	29	
PE folija	0,02	0,02	0,02	
Kamena volna	10	15	20	
Fasadna malta	1	1	1	
<i>Skupaj</i>	<b>41,52</b>	<b>46,52</b>	<b>51,52</b>	
<b>Ogljični odtis [kg CO<sub>2</sub>-e/m<sup>2</sup>]</b>				
Cementna malta	7,65	7,65	7,65	
Opeka	62,87	62,87	62,87	
PE folija	0,37	0,37	0,37	
Kamena volna	8,64	12,96	17,28	
Fasadna malta	4,00	4,00	4,00	
<i>Skupaj</i>	<b>83,53</b>	<b>87,85</b>	<b>92,17</b>	

### 5.3 Nosilna konstrukcija iz slamnatih bal – eksoskelet

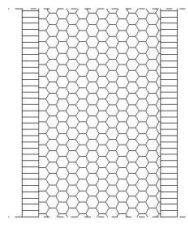
Pri takšni gradnji so slamnate bale položene vodoravno na širši rob, zato upoštevamo toplotno prevodnost vzporedno z vlakni.

Pri tem konstrukcijskem sklopu smo uporabili teoretične debeline slamnatih bal, ki v praksi niso izvedljive, zato smo potrebovali PE-folijo. Ker PE-folije pri dejanski gradnji ne potrebujemo, je pri nadaljnji analizi ogljičnega odtisa ne bomo upoštevali.

Pri tretjem konstrukcijskem sklopu PE-folije zaradi zadostne debeline stene ne potrebujemo več.

Rezultati izračuna ogljičnega odtisa so prikazani v Preglednici 9.

Preglednica 9: Samonosilna konstrukcija iz slamnatih bal pri treh toplotnih prehodnostih.

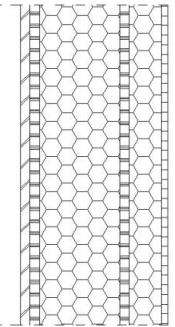
	<b>U = 0,28 W/m<sup>2</sup>K</b> (U <sub>dej</sub> = 0,279 W/m <sup>2</sup> K)	<b>U = 0,20 W/m<sup>2</sup>K</b> (U <sub>dej</sub> = 0,197 W/m <sup>2</sup> K)	<b>U = 0,15 W/m<sup>2</sup>K</b> (U <sub>dej</sub> = 0,148 W/m <sup>2</sup> K)	
<i>Material</i>	<i>Debelina [cm]</i>	<i>Debelina [cm]</i>	<i>Debelina [cm]</i>	
Ilovnati omet	4	4	4	
PE folija	0,02	0,02	0	
Slama	20	29	39	
Fasadna malta	4	4	4	
<i>Skupaj</i>	<b>28,02</b>	<b>37,02</b>	<b>47</b>	
<b>Ogljični odtis [kg CO<sub>2</sub>-e/m<sup>2</sup>]</b>				
Ilovnati omet	-0,19	-0,19	-0,19	
PE folija	0,00	0,00	0,00	
Slama	-21,25	-30,81	-41,44	
Fasadna malta	15,98	15,98	15,98	
<i>Skupaj</i>	<b>-5,46</b>	<b>-15,02</b>	<b>-25,65</b>	

### 5.4 Nosilna konstrukcija iz lesa – endoskelet

Pri tem konstrukcijskem sklopu za nosilno konstrukcijo smo uporabili lesene stebre dimenzije 6 cm × 12,5 cm. Polnilo med stebri predstavljajo celulozna vlakna.

V Preglednici 10 je prikazan ogljični odtis vsakega materiala, uporabljenega v konstrukcijskem sklopu, in ogljični odtis celotnega konstrukcijskega sklopa pri treh različnih toplotnih prehodnostih.

Preglednica 10: Nosilna konstrukcija iz lesa – endoskelet pri treh toplotnih prehodnostih.

	<b>U = 0,28 W/m<sup>2</sup>K</b> (U <sub>dej</sub> = 0,277 W/m <sup>2</sup> K)	<b>U = 0,20 W/m<sup>2</sup>K</b> (U <sub>dej</sub> = 0,197 W/m <sup>2</sup> K)	<b>U = 0,15 W/m<sup>2</sup>K</b> (U <sub>dej</sub> = 0,153 W/m <sup>2</sup> K)	
<i>Material</i>	<i>Debelina [cm]</i>	<i>Debelina [cm]</i>	<i>Debelina [cm]</i>	
Mavčno-kartonska pl.	1,25	1,25	1,25	
PE folija	0,02	0,02	0,02	
OSB plošča	1,5	1,5	1,5	
Celul. vlakna + leseni steber	12,5	12,5	12,5	
OSB plošča	1,5	1,5	1,5	

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 10

Fasadna malta	1	1	1
<i>Skupaj</i>	<b>17,77</b>	<b>22,77</b>	<b>27,77</b>
<b>Ogljični odtis [kg CO<sub>2</sub>-e/m<sup>2</sup>]</b>			
Mavčno-kartonska pl.	2,84	2,84	2,84
PE folija	0,37	0,37	0,37
OSB plošča	4,65	4,65	4,65
Celul. vlakna + leseni steber	2,28	2,28	2,28
OSB plošča	4,65	4,65	4,65
Kamena volna	0,00	4,32	8,64
Fasadna malta	4,00	4,00	4,00
<i>Skupaj</i>	<b>18,78</b>	<b>23,10</b>	<b>27,42</b>

### 5.5 Nosilna konstrukcija iz lesa – endoskelet (toplotna izolacija iz slamnatih bal)

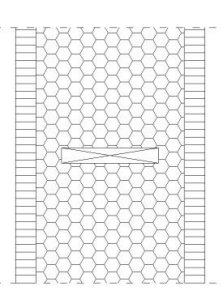
Kot smo že povedali v podpoglavju 4.2.1.1, se pri tem načinu gradnje uporabljajo leseni stebri 5 cm × 20 cm z vmesnim polnilom iz slamnatih bal debeline 38 cm, ki so postavljeni vodoravno na ožji rob (upoštevamo toplotno prevodnost pravokotno na vlakna).

Pri tem konstrukcijskem sklopu so uporabljene teoretične debeline slamnatih bal, ki v praksi niso izvedljive. Tako smo izbrali ustrezno nosilno konstrukcijo iz lesenih stebrov 5 cm × 10 cm za vse tri konstrukcijske sklope, opisane v spodnji preglednici (stebri dimenzije 5 cm × 20 cm pri izolaciji 16,5 cm nimajo smisla).

Pri sestavljanju konstrukcijskih sklopov smo potrebovali PE-folijo zaradi kondenzacije vodne pare. Ker do tega pri dejanski gradnji s slamnatimi balami debeline 38 cm ne pride, ogljičnega odtisa PE-folije pri nadaljnji analizi ne bomo upoštevali.

Rezultati izračuna ogljičnega odtisa so prikazani v Preglednici 11.

Preglednica 11: Nosilna konstrukcija iz lesa – endoskelet (izolacija – slama) pri treh toplotnih prehodnostih.

	<b>U = 0,28 W/m<sup>2</sup>K</b> (U <sub>dej</sub> = 0,276 W/m <sup>2</sup> K)	<b>U = 0,20 W/m<sup>2</sup>K</b> (U <sub>dej</sub> = 0,202 W/m <sup>2</sup> K)	<b>U = 0,15 W/m<sup>2</sup>K</b> (U <sub>dej</sub> = 0,147 W/m <sup>2</sup> K)	
<i>Material</i>	<i>Debelina [cm]</i>	<i>Debelina [cm]</i>	<i>Debelina [cm]</i>	
Ilovnati omet	4	4	4	
PE folija	0,02	0,02	0,02	
Slama + leseni steber 5 cm × 10 cm	16,5	23	32	
Fasadna malta	4	4	4	
<i>Skupaj</i>	<b>24,52</b>	<b>31,02</b>	<b>40,02</b>	
<b>Ogljični odtis [kg CO<sub>2</sub>-e/m<sup>2</sup>]</b>				
Ilovnati omet	-0,19	-0,19	-0,19	
PE folija	0,00	0,00	0,00	

se nadaljuje ...

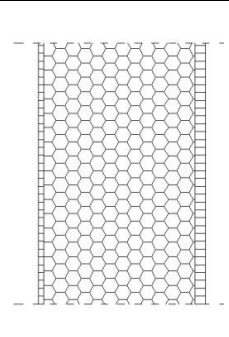
... nadaljevanje Preglednice 11

Slama + leseni steber 5 cm × 10 cm	-17,53	-24,44	-34,00
Fasadna malta	15,98	15,98	15,98
<i>Skupaj</i>	<b>-1,74</b>	<b>-8,65</b>	<b>-18,21</b>

### 5.6 Nosilna konstrukcija iz lesa – endoskelet (toplotna izolacija iz konopljinega betona)

V Preglednici 12 je prikazan ogljični odtis vsakega materiala, uporabljenega v konstrukcijskem sklopu, in ogljični odtis celotnega konstrukcijskega sklopa pri treh različnih toplotnih prehodnostih.

Preglednica 12: Nosilna konstrukcija iz lesa – endoskelet (izolacija – konopljin beton) pri treh toplotnih prehodnostih.

	<b>U = 0,28 W/m<sup>2</sup>K</b> (U <sub>dej</sub> = 0,275 W/m <sup>2</sup> K)	<b>U = 0,20 W/m<sup>2</sup>K</b> (U <sub>dej</sub> = 0,203 W/m <sup>2</sup> K)	<b>U = 0,15 W/m<sup>2</sup>K</b> (U <sub>dej</sub> = 0,151 W/m <sup>2</sup> K)	
<i>Material</i>	<i>Debelina [cm]</i>	<i>Debelina [cm]</i>	<i>Debelina [cm]</i>	
Cementna malta	1	1	1	
Konopljin beton + steber 5 cm × 10 cm	24	33	45	
Fasadna malta	2	2	2	
<i>Skupaj</i>	<b>27</b>	<b>36</b>	<b>48</b>	
	<b>Ogljični odtis [kg CO<sub>2</sub>-e/m<sup>2</sup>]</b>			
Cementna malta	5,10	5,10	5,10	
Konopljin beton + steber 5 cm × 10 cm	-0,96	-1,32	-1,80	
Fasadna malta	7,99	7,99	7,99	
<i>Skupaj</i>	<b>12,14</b>	<b>11,78</b>	<b>11,30</b>	

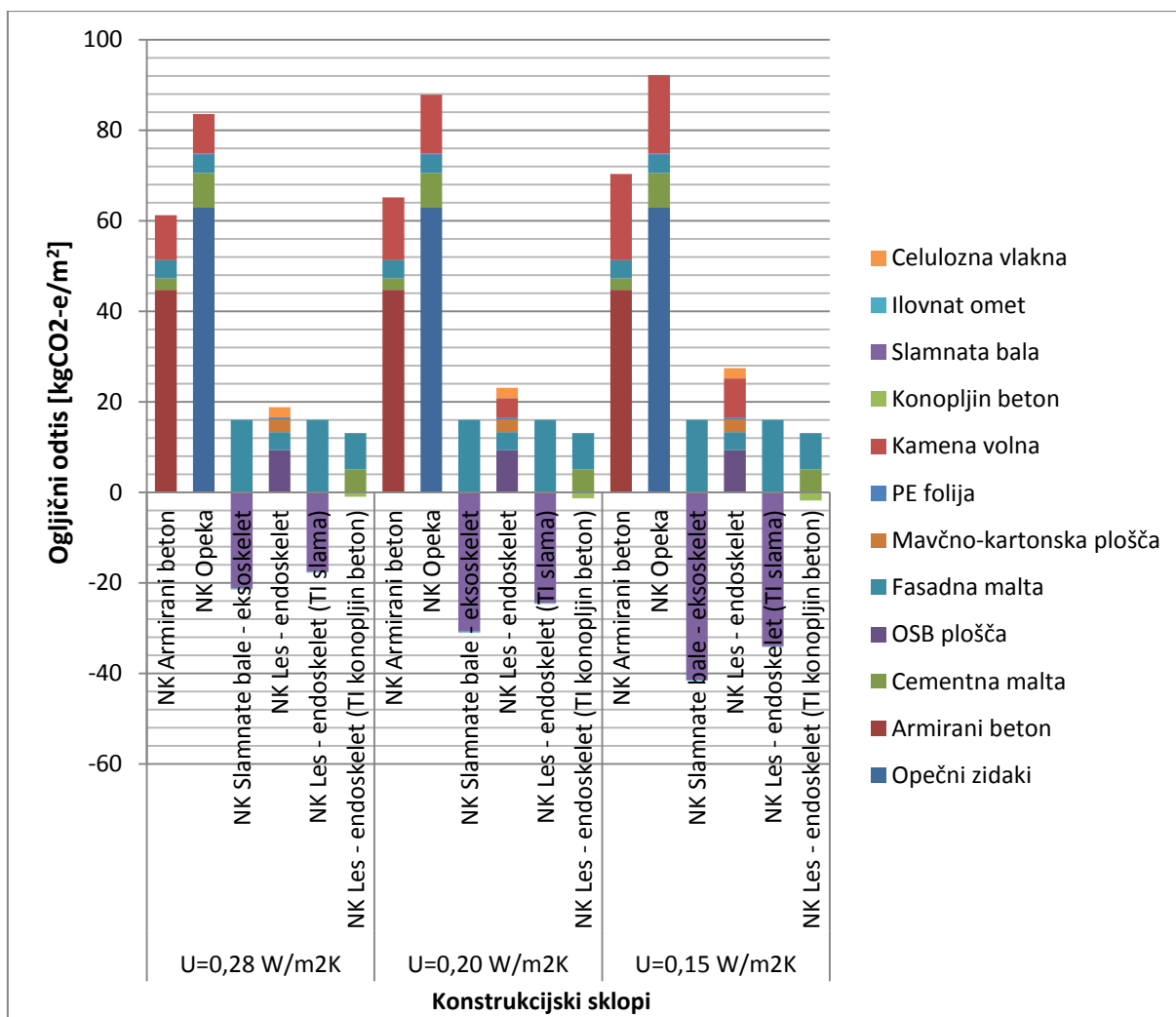


## 6 DISKUSIJA

### 6.1 Analiza okoljskih vplivov konstrukcijskih sklopov

V tem poglavju si bomo pogledali, kateri konstrukcijski sklopi so okolju najbolj prijazni in kako se spreminja debelina izolacije v odvisnosti od toplotne prehodnosti zunanje stene.

#### 6.1.1 Analiza pri toplotnih prehodnostih zunanje stene $U = 0,28$ ; $U = 0,20$ ; $U = 0,15$ W/m<sup>2</sup>K



Slika 9: Ogljični odtis materialov celotnih konstrukcijskih sklopov.

Kot je razvidno iz zgornjega histograma (Slika 9), imata največji ogljični odtis konstrukcijska sklopa z nosilno konstrukcijo (NK) iz armiranega betona in opeke. K tako velikemu ogljičnemu odtisu prispevata nosilni konstrukciji pri masivni gradnji, in sicer armirani beton s 73,08 % pri  $U = 0,28$  W/m<sup>2</sup>K do 63,65 % pri  $U = 0,15$  W/m<sup>2</sup>K in opeka s 75,27 % pri  $U = 0,28$  W/m<sup>2</sup>K do 68,21 % pri  $U = 0,15$  W/m<sup>2</sup>K. Pri endoskeletnih konstrukcijskih sklopih nismo upoštevali nosilne konstrukcije, ker smo računali na idealni prerez; četudi bi izračunali ogljični odtis za nosilno konstrukcijo iz lesa, bi bil njegov vpliv na končni rezultat zanemarljivo majhen.

V Preglednici 13 smo zapisali ogljičnih odtisov vseh konstrukcijskih sklopov, ki smo jih uporabili pri analizi.

Preglednica 13: Ogljični odtis konstrukcijskih sklopov (KS) in razmerje v odstotkih (Opeka = 100%).

Toplotna prehodnost	U = 0,28 W/m <sup>2</sup> K	U = 0,20 W/m <sup>2</sup> K	U = 0,15 W/m <sup>2</sup> K
<b>KS</b>	<b>Ogljični odtis [kg CO<sub>2</sub>-e/m<sup>2</sup>]</b>		
Armirani beton	61,23	65,12	70,31
Opeka	83,53	87,85	92,17
Slamnate bale – eksoskelet	-5,46	-15,02	-25,65
Les – endoskelet (TI – kam.volna)	18,78	23,10	27,42
Les – endoskelet (TI – slama)	-1,74	-8,65	-18,21
Les – endoskelet (TI – konopljin beton)	12,14	11,78	11,30
	<b>Razmerja v odstotkih</b>		
Armirani beton	73,3 %	74,1 %	76,3 %
Opeka	100,0 %	100,0 %	100,0 %
Slamnate bale – eksoskelet	-105,9 %	-116,3 %	-127,8 %
Les – endoskelet (TI – kam.volna)	22,5 %	26,3 %	29,8 %
Les – endoskelet (TI – slama)	-102,1 %	-110,3 %	-121,8 %
Les – endoskelet (TI – konopljin beton)	14,5 %	13,4 %	12,3 %

Konstrukcijski sklop z nosilno konstrukcijo iz opeke smo vzeli kot referenčnega, ker ima največji ogljični odtis.

Pri  $U = 0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$  vidimo, da izpusti toplogrednih plinov pri konstrukcijskih sklopih iz armiranega betona, lesa, lesa s slamo, lesa s konopljinim betonom in iz slamnatih bal predstavljajo 73,31 %, 22,48 %, -102,08 %, 14,53 % in -105,92 % izpustov toplogrednih plinov pri konstrukcijskem sklopu iz opeke (Preglednica 13).

Pri  $U = 0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$  že opazimo rahlo zmanjšanje razmerja izpustov toplogrednih plinov med konstrukcijskimi sklopi iz armiranega betona, lesa in opeke. Pri konstrukcijskih sklopih iz lesa s konopljinim betonom, lesa s slamo in iz slamnatih bal smo opazili rahlo povečanje razmerja. Do povečanja omenjenega razmerja je prišlo, ker sta slama in konopljin betona materiala, ki imata negativno vrednost izpustov toplogrednih plinov, pri drugih konstrukcijskih sklopih pa je uporabljena kamena volna, ki ima pozitivno vrednost izpustov toplogrednih plinov.

Pri  $U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$  smo že dobili dva konstrukcijska sklopa, katerih vrednost izpustov toplogrednih plinov je za več kot 120 % manjša od izpustov konstrukcijskega sklopa iz opeke.

### 6.1.2 Vpliv toplotne prehodnosti na debelino izolacije in izpuste toplogrednih plinov

Kot že napoveduje sam naslov, bomo v tem podpoglavju obravnavali vpliv debeline in izbire materiala za izolacijo na izpuste toplogrednih plinov konstrukcijskih sklopov v odvisnosti od toplotne prehodnosti zunanje stene.

V Preglednici 14 si bomo pogledali, kako se spreminja debelina toplotne izolacije (TI) glede na toplotne prehodnosti zunanje stene.

Preglednica 14: Sprememba debeline toplotne izolacije v odvisnosti od toplotne prehodnosti zunanje stene.

<b>Toplotna prehodnost</b>	<b>U = 0,28 W/m<sup>2</sup>K</b>	<b>U = 0,20 W/m<sup>2</sup>K</b>	<b>U = 0,15 W/m<sup>2</sup>K</b>
<b>KS</b>	<b>Debelina toplotne izolacije [cm]</b>		
Armirani beton	11,5	16	22
Opeka	10	15	20
Les – endoskelet (kam. volna)	12,5	17,5	22,5
Les – endoskelet (slama)	16,5	23	32
Les – endoskelet (konopljin beton)	24	33	45
Slamnate bale – eksoskelet	20	29	39
	<b>Povečanje toplotne izolacije v odstotkih</b>		
Armirani beton	/	39,1 %	91,3 %
Opeka	/	50,0 %	100,0 %
Les – endoskelet (kam. volna)	/	40,0 %	80,0 %
Les – endoskelet (slama)	/	39,4 %	93,9 %
Les – endoskelet (konopljin beton)	/	37,5 %	87,5 %
Slamnate bale – eksoskelet	/	45,0 %	95,0 %

Kot je razvidno iz preglednice 14, moramo za spremembo toplotne prehodnosti zunanje stene z 0,28 W/m<sup>2</sup>K na 0,20 W/m<sup>2</sup>K povečati toplotno izolacijo (TI) za 37,5 % (konopljin beton) oziroma 50 % (opeka). Za spremembo toplotne prehodnosti z 0,28 W/m<sup>2</sup>K na 0,15 W/m<sup>2</sup>K pa bi morali TI povečati za 87,5 % (konopljin beton) oziroma 100 % (opeka).

V Preglednici 15 smo prikazali spremembo izpustov toplogrednih plinov (TGP) pri spremembi toplotne prehodnosti stene oziroma spremembi debeline izolacije.

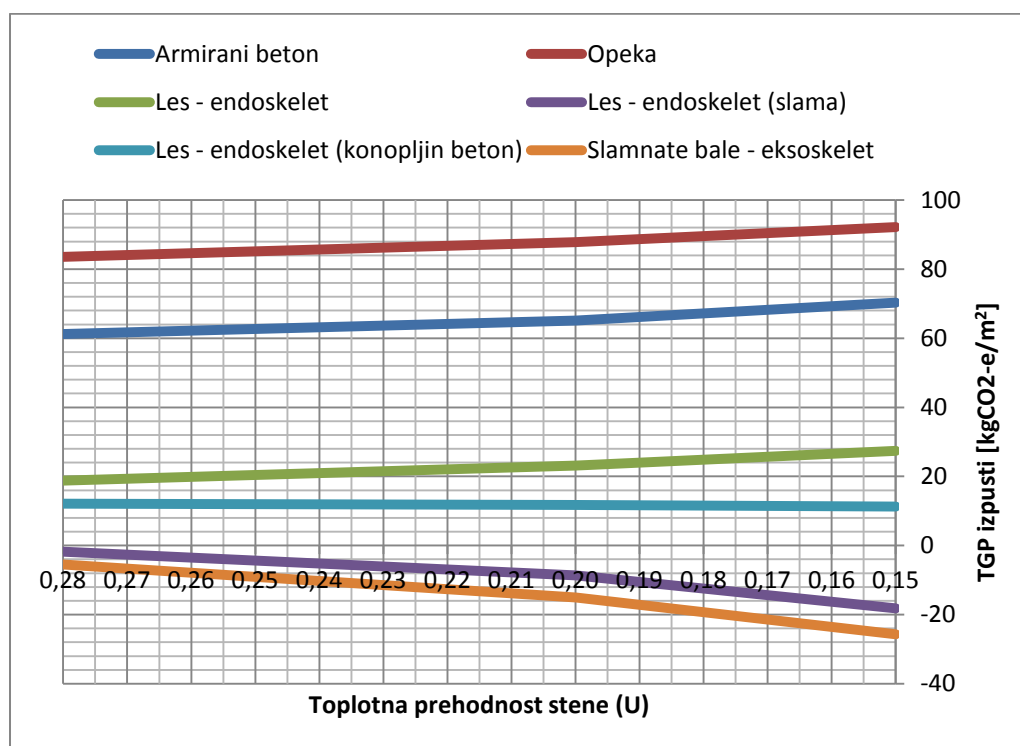
Preglednica 15: Sprememba izpustov TGP pri povečevanju debeline TI.

<b>Toplotna prehodnost</b>	<b>U = 0,28 W/m<sup>2</sup>K</b>	<b>U = 0,20 W/m<sup>2</sup>K</b>	<b>U = 0,15 W/m<sup>2</sup>K</b>
<b>KS</b>	<b>Ogljični odtis [kg CO<sub>2</sub>-e/m<sup>2</sup>]</b>		
Armirani beton	61,23	65,12	70,31
Opeka	83,53	87,85	92,17
Les – endoskelet	18,78	23,10	27,42
Les – endoskelet (slama)	-1,74	-8,65	-18,21
Les – endoskelet (konopljin beton)	12,14	11,78	11,30
Slamnate bale – eksoskelet	-5,46	-15,02	-25,65
	<b>Sprememba ogljičnega odtisa v odstotkih (relativno na začetnega)</b>		
Armirani beton	/	6,4 %	14,8 %
Opeka	/	5,2 %	10,3 %
Les – endoskelet	/	23,0 %	46,0 %
Les – endoskelet (slama)	/	-397,1 %	-946,9 %
Les – endoskelet (konopljin beton)	/	-3,0 %	-6,9 %
Slamnate bale – eksoskelet	/	-175,2 %	-369,9 %

Iz zgornje preglednice razvidno večanje debeline toplotne izolacije zelo malo vpliva na že tako visoke izpuste TGP pri konstrukcijskih sklopih iz opeke in armiranega betona. Pri drugih konstrukcijskih sklopih je opazna večja razlika kot pri KS iz lesa s toplotno izolacijo iz celuloznih vlaken in kamene volne, kjer se je vrednost izpustov TGP pri toplotni prehodnosti  $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$  povečala za 46 % glede na nizke začetne vrednosti izpustov TGP pri  $0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

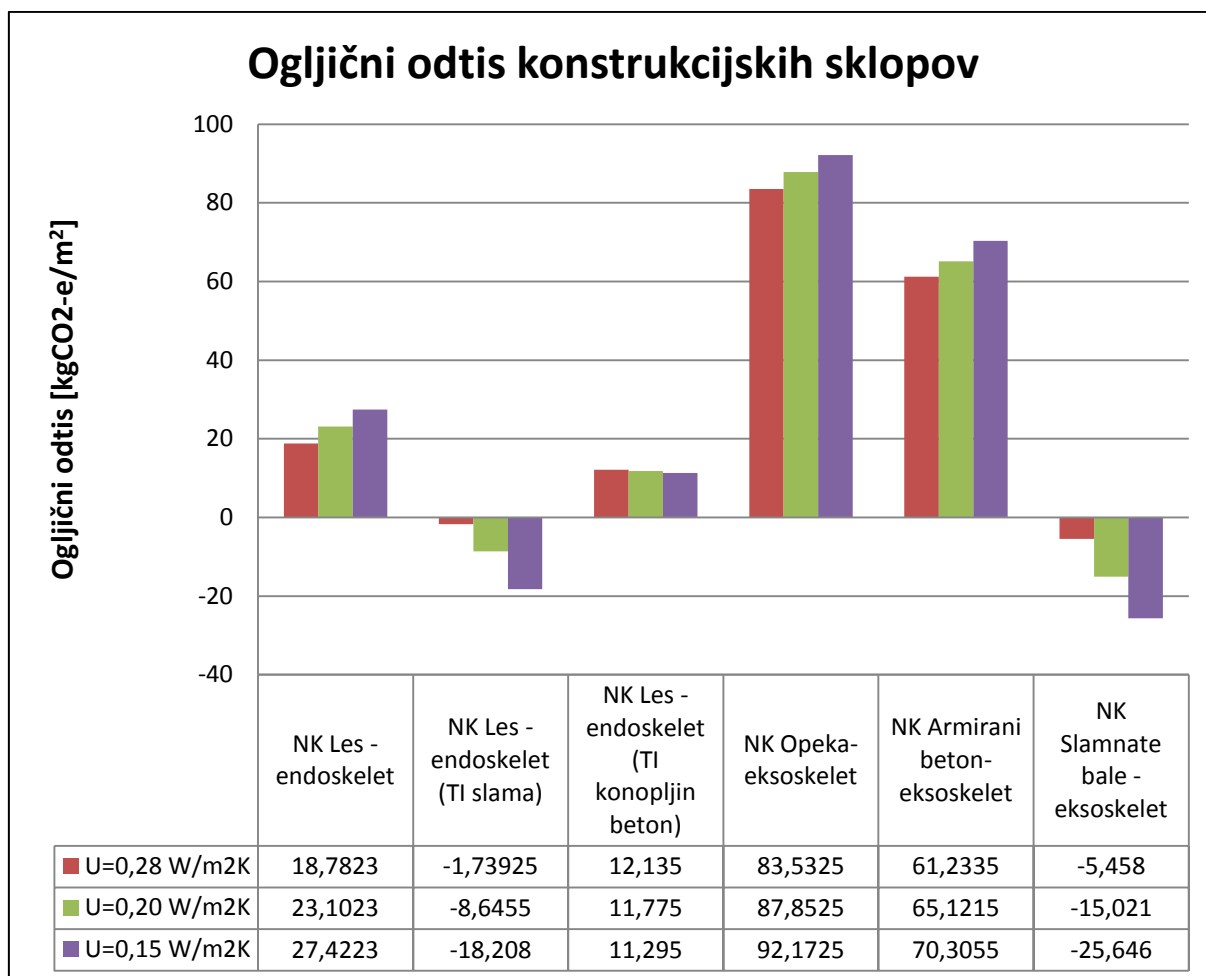
Pri konstrukcijskih sklopih iz naravnih materialov (konopljin beton in slama) se vrednost izpustov TGP še dodatno zmanjša. Najbolj zanimivi rezultati (Preglednica 15 in Slika 10) so pri konstrukcijskih sklopih (KS), kjer imamo nosilno konstrukcijo (NK) iz lesa in toplotno izolacijo (TI) iz slame ter slamo za NK in TI; pri prvem se vrednost izpustov TGP zmanjša za kar 946,89 % pri spremembi toplotne prehodnosti z  $0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$  na  $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ , pri drugem pa za 369,88 %.

Spodnja Slika 10 prikazuje spremembe vrednosti izpustov TGP v grafu.



Slika 10: Sprememba vrednosti izpustov TGP vseh materialov konstrukcijskih sklopov v odvisnosti od toplotne prehodnosti zunanje stene na enoto površine.

Na Sliki 11 so predstavljeni endoskeletni (levo) in eksoskeletni (desno) konstrukcijski sklopi s pripadajočimi ogljičnimi odtisi. Cilj slike je primerjati ogljični odtis endoskeletnega in eksoskeletnega konstrukcijskega sklopa, pri čemer vidimo, da eksoskeletne konstrukcije ne veljajo več za konstrukcije z največjim ogljičnim odtisom.



Slika 11: Ogljični odtis konstrukcijskih sklopov.

Preglednica 16 prikazuje teže konstrukcijskih sklopov na 1 m<sup>2</sup>, da si lahko predstavljamo, kako »lahke« ali »težke« so te konstrukcije. Iz preglednice vidimo, da sta konstrukcijska sklopa z NK iz opeke in armiranega betona najtežja, medtem ko je konstrukcijski sklop z NK iz lesa najlažji. Konstrukcijski sklopi iz slame in konopljinega betona so nekje v sredini.

Preglednica 16: Masa konstrukcijskih sklopov na enoto površine.

	KS	Les – endoskelet	Les – endoskelet (TI – slama)	Les – endoskelet (TI – konopljin beton)	Armirani beton – eksoskelet	Opečni zidaki – eksoskelet	Slamnate bale – eksoskelet
Toplotna prehodnost	U = 0,28 W/m <sup>2</sup> K	62,25	152,025	137,2	288,2	290,2	155
	U = 0,20 W/m <sup>2</sup> K	66,25	157,55	166,9	291,8	294,2	162,65
	U = 0,15 W/m <sup>2</sup> K	70,25	165,2	206,5	296,6	298,2	171,15

## 7 ZAKLJUČEK

Za najslabšo izbiro v bazi obravnavanih konstrukcijskih sklopov se je izkazal konstrukcijski sklop z nosilno konstrukcijo iz opečnih zidakov, ki ima ogljični odtis  $92,17 \text{ kg CO}_2\text{-e/m}^2$  pri  $U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ . S 23,7 % manjšim ogljičnim odtisom mu sledi konstrukcijski sklop z nosilno konstrukcijo iz armiranega betona.

Iz primerjav v šestem poglavju smo ugotovili, da se je samonosilna konstrukcija iz slamnatih bal izkazala kot konstrukcijski sklop z najnižjim oziroma negativnim ogljičnim odtisom, in sicer  $-25,65 \text{ kg CO}_2\text{-e/m}^2$  (127,8 % manjši ogljični odtis glede na nosilno konstrukcijo iz opečnih zidakov). Potem sledita konstrukcijska sklopa z nosilno konstrukcijo iz lesa in toplotno izolacijo iz slamnatih bal (121,8 % manjši ogljični odtis glede na nosilno konstrukcijo iz opečnih zidakov) ter s toplotno izolacijo iz konopljinega betona (87,7 % manjši ogljični odtis glede na nosilno konstrukcijo iz opečnih zidakov). Četrty najboljši je konstrukcijski sklop z nosilno konstrukcijo iz lesa in toplotno izolacijo iz celuloznih vlaken in kamene volne (70,2 % manjši ogljični odtis glede na nosilno konstrukcijo iz opečnih zidakov).

Ker smo ugotovili, da pri masivnih gradnjah k visokemu ogljičnemu odtisu največ prispeva nosilna konstrukcija, je treba začeti razmišljati o alternativnih materialih za nosilne konstrukcije, kot so slamnate bale, ali za začetek preusmeriti gradnje v čim večjo uporabo lesa.

Visok potencial kažejo slamnate bale kot gradbeni material za nosilne in zaščitne konstrukcije zaradi negativnega ogljičnega odtisa in hitrosti gradnje. Gradnja s slamnatimi balami je v velikem porastu v Združenem kraljestvu, kjer imajo tudi urejeno zakonodajo glede gradnje s slamnatimi balami.

Zanimiva je ugotovitev, da ne velja več, da imajo eksoskeletni sistemi a priori veliko večji ogljični odtis kot endoskeletni.

Na osnovi zgornjih ugotovitev menim, da je že skrajni čas za začetek uporabe naravnih materialov, ki so nam na razpolago. Zanje bomo plačali manj denarja, hkrati pa z njihovo uporabo onesnažili manj čistega zraka ter s tem manj vplivali na okolje.

## VIRI

Agencija RS za okolje, 2012. *Ministrstvo za okolje in prostor RS*.

Dostopno na: [http://okolje.arso.gov.si/onesnazevanje\\_zraka/vsebine/toplogredni-plini](http://okolje.arso.gov.si/onesnazevanje_zraka/vsebine/toplogredni-plini)  
[Pridobljeno 13 Februar 2016].

Anon., 2011. *EUR-Lex Access to European Union law*.

Dostopno na: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/SL/TXT/HTML/?uri=URISERV:l28060&from=SL>  
[Pridobljeno 13 Februar 2016].

Brojan, L., 2009. Opeka in njena problematika. p. 93.

Brojan, L. P. A. C. P., 2013. *A comparative study of brick and straw bale wall systems from environmental, economical and energy perspectives*.

Dostopno na: [http://www.arpnjournals.com/jeas/research\\_papers/rp\\_2013/jeas\\_1113\\_971.pdf](http://www.arpnjournals.com/jeas/research_papers/rp_2013/jeas_1113_971.pdf)

Busbridge, R. a. R. R., 2010. Hemp-Clay: an initial investigation into the thermal, structural and environmental credentials of monolithic clay and hemp walls.. pp. 163-170.

Čeh, B., 2009. Oljnice: pridelava, kakovost olja ter možnost uporabe za biomaziva in biodizel. p. 152.

Designblendz LLC, 2015. *DesignBlendz*.

Dostopno na: <http://designblendz.com/architecture/legalize-my-walls/>  
[Pridobljeno 10. April 2016].

Evolve Builders Group Inc., 2016. *Harvest Homes*.

Dostopno na: <http://harvesthomes.ca/resources/calculator/>  
[Pridobljeno 27 Februar 2016].

Evropski parlament, Svet Evropske unije, 2015. *EUR-Lex Access to European Union law*.

Dostopno na: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/SL/TXT/?uri=URISERV%3Aen0021>  
[Pridobljeno 13 Februar 2016].

Global greenhouse warming, 2016. *Global greenhouse warming*.

Dostopno na: <http://www.global-greenhouse-warming.com/greenhouse-gas.html>  
[Pridobljeno 13 Februar 2016].

Gruber, H., 2016. *BauBiologie*.

Dostopno na: <http://www.baubiologie.at>  
[Pridobljeno 24 Marec 2016].

Huff 'n' Puff Constructions, 2016.

Dostopno na: <http://glassford.com.au/main/building-menu/walls/load-bearing-walls/>  
[Pridobljeno 12 Marec 2016].

Inštitut za slovenski jezik Frana Ramovša ZRC SAZU, brez datuma

Dostopno na: [http://bos.zrc-sazu.si/cgi/a03.exe?name=sskj\\_testa&expression=ilovica](http://bos.zrc-sazu.si/cgi/a03.exe?name=sskj_testa&expression=ilovica)  
[Pridobljeno 27 Februar 2016].

Lampret, L., 2011. Uporaba slamnatih bal kot gradbenega materiala pri ekološki gradnji. V: Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba L. Lampret), p. 49.

---

Malešević, M. e. a., 2008. Povratak ka višim i stabilnijim prinosima strnih žita. V: 14 ured. Beograd: Institut PKB Agroekonomik, Zbornik naučnih radova, pp. 12-29.

Petrovič, K., 2015. Ogljični odtis produktov in sestavljenih konstrukcijskih sklopov. V: Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba K. Petrovič), p. 24.

Povhe, I., 2016. *Gradnja s slamnatimi balami* [Intervju] (25 Februar 2016).

Sani Okretič Resulbegović, u., 2016. *Konopko*.  
Dostopno na: <http://www.konopko.si/gradbenistvo>  
[Pridobljeno 27 Februar 2016].

slama.hr, 2008. *Slama*.  
[Pridobljeno 14 Februar 2016].

Srpčič, J., 2009. *Lesena gradnja v Sloveniji*.  
Dostopno na: [http://www.lesena-gradnja.si/html/img/pool/Les\\_za\\_gradbene\\_konstrukcije.pdf](http://www.lesena-gradnja.si/html/img/pool/Les_za_gradbene_konstrukcije.pdf)  
[Pridobljeno 14 Februar 2016].

Statistični urad RS, 2016. *Statistični urad RS*.  
Dostopno na: <http://pxweb.stat.si/pxweb/Dialog/Saveshow.asp>  
[Pridobljeno 27 Februar 2016].

StrawWorks Ltd, 2016. *StrawWorks*.  
Dostopno na: <http://www.strawworks.co.uk/technical/>  
[Pridobljeno 24 Marec 2016].

TheShiftProject-DataPortal, 2014. *Svetovna proizvodnja električne energije*.  
Dostopno na: <http://www.tsp-data-portal.org/Breakdown-of-Electricity-Generation-by-Energy-Source#tspQvChart>  
[Pridobljeno 13 Februar 2016].

Vardy, S. i. M. C., 2006. Compressive testing and analysis of plastered straw bales. *Journal of Green Building: Winter 2006*, I(1), pp. 63-79.

Walker, P., 2004. *Compression load testing straw bale walls*, Bath: Dept. Architecture & Civil Engineering, University of Bath.

Zver, K., 2013. *Naravna gradnja*.  
Dostopno na: <http://naravnagradnja.pismenost.net/tag/konopljin-pezdir/#.VtGkKn3hCUl>  
[Pridobljeno 27 Februar 2016].

Zver, K., 2013. *Naravna gradnja-ilovica*.  
Dostopno na: <http://www.naravnagradnja.com/materiali/ilovica/>  
[Pridobljeno 27 Februar 2016].

Žarnič, R., 2005. Lastnosti gradiv. V: Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preskušanje materialov in konstrukcij, p. 343.



## **PRILOGA A: KONSTRUKCIJSKI DETAJLI SAMONOSILNE KONSTRUKCIJE IZ SLAMNATIH BAL**

### **SOGLASJE**

Soglasje 1: Soglasje za uporabo skice detajlov – StrawWorks Ltd

### **NAČRTI**

Skica 1: Lesen obroč na talni plošči

Skica 2: Dimenzije sestavnih elementov obroča na talni plošči

Skica 3: Izvedba talne plošče

Skica 4: Ležišče slamnatih bal

Skica 5: Izvedba okenskega lesenega okvirja

Skica 6: Povezovanje okna z lesenim okvirjem

Skica 7: Izvedba vrat

Skica 8: Izvedba horizontalne vezi

Skica 9: Ležišče slamnatih bal v nadstropju oziroma mansardi

Skica 10: Zaključek stene

Skica 11: Povezovanje stene s poševno streho

Skica 12: Povezovanje stene z ravno streho