

# DIMENZIONIRANJE KAMNITIH NOSILCEV S STRUKTURO MEDSEBOJNIH ANTROPOMETRIČNIH MER EGIPTOVSKEGA KOMOLCA

## *Dimensioning Stone Beams by Structuring with Mutual Anthropometrical Measures of the Egyptian Elbow*

### povzetek

Egipčanska mera za vse meritve je bil komolec, katerega dolžina je bila razdeljena na 7 dlani, vsaka dlan pa je bila razdeljena na 4 prste.

Ugotovili smo, da je v strukturi medsebojnih razmerij merskega sistema egiptovskega komolca vgrajen princip avtomatičnega (samodejnega) konstrukcijsko varnega dimenzioniranja enostavnih kamnitih nosilnih gradbenih elementov.

V strukturo medsebojnih mer 1 komolec = 7 dlani = 28 prstov in 1 dlan = 4 prste, je vključena preprosta formula za določitev varnih dimenzij upogibno obremenjenih kamnitih nosilcev ali plošč, ki upošteva celo razlike v trdnostnih lastnostih kamnitega gradiva.

Ta merski sistem je najbrž nastal na podlagi dolgotrajnega, skrbnega in preiščljivega opazovanja enostavnih konstrukcijskih elementov pod različnimi obremenitvami, verjetno do stopnje porušitve.

### summary

*The Egyptian measure for all measurements was the elbow, whose length was divided into seven palms, which were further divided into four fingers.*

*We established that the structure of mutual relations in the Egyptian measurement system based on the elbow integrates the principle of automatic construction of safe dimensioning of simple stone load-bearing building elements.*

*The structure of mutual measurements: 1 elbow = 7 palms = 28 fingers and 1 palm = 4 fingers, includes the simple formula for determining safe constructions of stone beams or plates burdened by bending, with respect even to differences in resilience properties of stone materials.*

*This measurement system probably emerged after long, careful and deliberate observation of simple construction elements burdened by varying loads, probably until they collapsed.*

### ključne besede:

kamniti nosilci, nosilno dimenzioniranje, egiptovski komolec

### key words:

stone beams, load-bearing dimensioning, Egyptian elbow

Cilj raziskave je oblikovanje metode dimenzioniranja masivnih /les, kamen/ nosilnih gradbenih elementov s strukturo antropometričnih proporcijskih sistemov kot metode "avtomatičnega" hkratnega merskega in nosilnega dimenzioniranja gradbenega elementa.

Naloga razčlenjuje probleme dimenzioniranja nosilnih gradbenih elementov od zgodovinsko znanih začetkov določevanja dimenzij, ko je arhitekt hkrati z mersko določljivo dimenzij določil tudi statično nosilnost gradbenega elementa, do sedanjega stanja, ko posebej dimenzioniramo na nosilnost, izolativnost, trdnost, trajnost.

Z razvojem "inženirske" matematike in uvedbo metrskega merskega sistema, je nekdanje "avtomatično" hkratno mersko in nosilno dimenzioniranje utonilo v pozabo. Danes se na eni strani dimenzije določajo po oblikovnem in estetskem občutku, na drugi strani pa imamo vedno bolj podrobne in zapletene statične postopke, ki izhajajo predvsem iz stališča mejnih stanj nosilnosti, proizvodnje, vgrajevanja in konstrukcijskih možnosti spajanja in povezav.

Rezultati teoretskih preverjanj in usklajevanj metode dimenzioniranja nosilnih gradbenih elementov s strukturo antropometričnih proporcijskih sistemov naj bi postali nova teoretska in priročna osnova "avtomatičnega" merskega in nosilnega dimenzioniranja gradbenih elementov pri idejni zasnovi stavb.

Osnovni vzroki za nastanek in razvoj konstrukcije so vedno trije: arhitekt, stavba in material. Le z njihovo medsebojno povezavo je mogoče vsaj do neke mere zajeti temeljna izhodišča za razumevanje konstrukcije v arhitekturi.

V pričujočem pregledu nam gre predvsem za osvetlitev razvoja merskih in dimenzionalnih izkustvenih spoznanj na področju

določanja dimenzij nosilnim gradbenim elementom.

Najstarejše mersko dimenzioniranje, to je določanje mer gradbenim elementom, je verjetno izhajalo iz po naravi danih dimenzij delov-udov človeškega telesa. Tako so se vsesplošno uporabljali palec, čevelj, komolec, seženj ter korak kot dogovorjen, oziroma predvsem mersko razviden merski sistem.

Zgodovinski pregled razvoja dimenzioniranja nosilnih gradbenih elementov potrjuje misel, da je vsako novo spoznanje na področju obdelave, izdelave, vgrajevanja, uporabe, trajnosti, nosilnosti, trdnosti itd. pomenilo tudi novo dimenzioniranje teh elementov po novih spoznanjih in pravilih.

Upoštevaajoč Vitruvijeva pravila /ordines/ za načrtovanje, poizkušamo dokazati verjetnost nekdanjega usklajenega merskega in statičnega dimenzioniranja gradbenih elementov s strukturo medsebojnih razmerij merskih enot antropometričnih merskih sistemov.

### DIMENZIONIRANJE KAMNITIH NOSILNIH GRADBENIH ELEMENTOV

Hkratno mersko in nosilno dimenzioniranje v standardiziranih merah strukture medsebojnih razmerij mer egiptovskega komolca poizkusimo preveriti tudi za dimenzioniranje kamnitih konstrukcijskih gradbenih elementov. Gradbeni elementi iz kama se lomijo v obliki plošč ali klešejo v obliki blokov-nosilcev.

Kamen, iz katerega se delajo ti elementi, je lahko boljše ali slabše kakovosti ter večje ali manjše trdnosti. Med kvalitetnejše in bolj nosilne prištevamo granit, bazalt, sienit, med slabše in manj nosilne pa školjkaste in kristalnične apnence ter razne peščenjake. Podatkov o številčnih vrednostih natezne ali upogibne trdnosti kamenega gradiva tudi v sedanjih tehničnih predpisih ni, ker se predpostavlja, da kamen ne prevzema nikakršnih nateznih ali

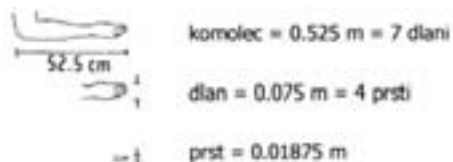
upogibnih obremenitev.

Previdnost je razumljiva glede na sedanji način pridobivanja kamna v kamnolomih z miniranjem, pri katerem se pokvari struktura monolita in nastanejo drobne, večinoma nevidne razpoke. Ker v starem Egiptu niso poznali miniranja, poizkusno uporabimo analogni sistem statičnega dimenzioniranja za kamen z upoštevanjem tlačnih in upogibnih trdnosti<sup>1</sup>.



Slika 1: Prikazana zasnova konstrukcije, ki jo sestavljajo obdelani granitni nosilci in stebri vestibula Kefrenovega svetišča v Gizeh, kaže na nujnost obvladovanja znanja o dimenzioniranju gradbenih elementov.

Za staroegipčansko matematiko je bilo značilno, da je dajala "recepte" z aproksimativnimi formulami in metodami računanja<sup>2</sup>. Kljub temu, da so bile te metode samo približne, so dobro ustrezale v vseh primerih, kjer so jih uporabili. Ker pa imata kamen in les različne trdnostne lastnosti tako v primerjavi med obema gradivoma kakor tudi v okviru primerjav istega gradiva, je rešitev problema samodejnega dimenzioniranja z enim samim merskim sistemom toliko bolj občudovanja vredna.

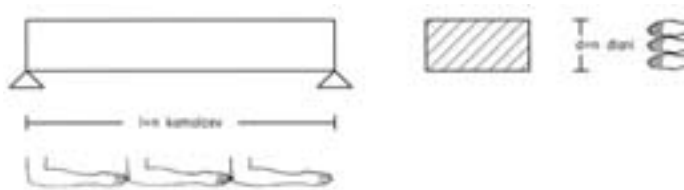


Slika 2: Struktura egiptovskega antropometričnega sistema mer.

V strukturo medsebojnih razmerij mer 1 komolec = 7 dlani = 28 prstov in 1 dlan = 4 prste, je verjetno avtomatično /samodejno/ vključena preprosta formula za določitev smotrnih in varnih dimenzij upogibno obremenjenega nosilca in tlačno obremenjenega stebra.

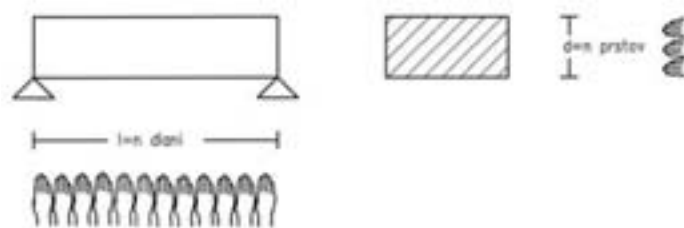
Prikazana predstavitev strukture medsebojnih razmerij egiptovskega antropometričnega sistema mer kaže na enostavnost in modularno usklajenost<sup>3</sup>. Mere tega sistema so egiptovskim arhitektom služile, da so hkrati mersko in statično dimenzionirali gradbene elemente. Izgleda, da jim je zaradi majhne izbire materiala /kamen, les, opeka/ ter zaradi preprostosti konstrukcijske zasnove ta sistem dimenzioniranja izredno dobro služil.

Pravilo za dimenzioniranje upogibno obremenjenih kamnitih gradbenih elementov razumemo v strukturi merskih odnosov egiptovskega komolca glede na različno kvaliteto kamna takole: Pri ploščah, izdelanih iz boljšega kamna /granit, bazalt/, naj znaša višina /h/ nosilca oziroma debelina /d/ plošče toliko dlani, kolikor komolcev znaša razpon. Egipčanska mera za vse meritve je bil komolec, katerega dolžina je bila razdeljena na 7 dlani, vsaka dlan pa je bila razdeljena na 4 prste.



Slika 3: Določitev dimenzij plošče iz kvalitetnejšega kamna

Za stropne plošče, izdelane iz slabšega kamna /apnec, peščenec/, pa naj znaša debelina /d/ toliko prstov, kolikor dlani znaša razpon /l/ plošče. V primeru slabšega kamna je upogibna trdnost plošče določena v sorazmernem odnosu razpona proti debelini 1:4 v skladu z mersko delitvijo 1 dlan = 4 prste.



Slika 4: Določitev dimenzij plošče iz slabšega kamna

V prikazano konstrukcijsko dimenzioniranje kamnitih gradbenih elementov je vgrajen tudi hierarhični merski odnos: boljši kamen se dimenzionira z višjim-prvim merskim odnosom /komolec, dlan/, slabši kamen se dimenzionira z nižjim merskim odnosom /dlan, prst/.

Po analogiji teorije in statičnih postopkov za dimenzioniranje nearmiranega betona določimo granitu in apnencu ustrezne porušne natezne napetosti. Upoštevajoč priporočljivi varnostni faktor za kamnito gradivo / $\gamma = 10/$ , dobimo dopustne upogibne napetosti, s katerimi preverimo dejansko dopustno nosilnost upogibno obremenjene plošče ali nosilca<sup>4</sup>.

Pri kamnitih gradbenih elementih vrednosti nosilne trdnosti zelo variirajo, tako v okviru iste vrste kamna kakor tudi med posameznimi nahajališči.

Tako se za kvalitetne kamnine navajajo porušne tlačne trdnosti od 13.55 KN/cm<sup>2</sup> do 50.71 KN/cm<sup>2</sup>, za manj kvalitetne kamnine pa se gibljejo te vrednosti od 2.29 KN/cm<sup>2</sup> do 33.26 KN/cm<sup>2</sup>. Te vrednosti veljajo za razna sedaj znana nahajališča po svetu, vendar je razpon med spodnjo in zgornjo vrednostjo tako širok, da lahko te vrednosti upoštevamo tudi za tedaj uporabljeno gradivo. Iz podanih števil je tudi razvidno, da pri kamnitem gradivu nastopa velika disperzija trdnosti ter da je zato pri takem gradivu nujno potrebno določiti spodnjo mejo zanesljivosti kvalitete. Tako se za pohorski tonalit, ki je najkvalitetnejši slovenski kamen navaja upogibna porušna trdnost 2.27 KN/cm<sup>2</sup> - 2.40 KN/cm<sup>2</sup> in tlačna porušna trdnost 16.0 KN/cm<sup>2</sup> - 20.2 KN/cm<sup>2</sup><sup>5</sup>.

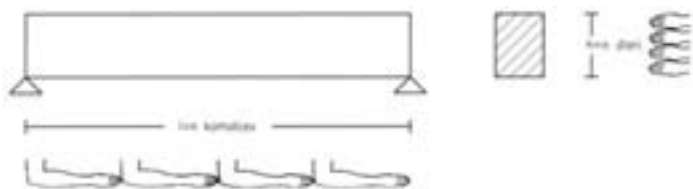
Sedaj veljavna definicija kvalitete materiala določa varnost z verjetnostjo porušitve, kar lahko določimo s pomočjo izvršenih porušnih preizkusov, iz katerih izhajajo tudi ustrezne dopustne upogibne napetosti.

Izpolnjevanje vseh teh zahtev bi pomenilo angažiranje precejšnjih materialnih sredstev in raziskovalnih potencialov. Ker je uporaba kamnitih plošč in nosilcev za nosilne konstrukcije neaktualna, je razumljivo, da nimamo niti ustreznih tehničnih predpisov niti konstrukterskih izkušenj, niti ni tovrstnih podatkov ali izkušenj zaslediti v strokovni literaturi.

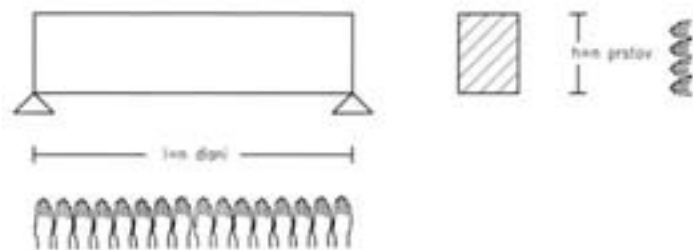
Statična preveritev nosilnosti po postopku dopustnih napetosti

pokaže, da kvalitetnejše plošče /granit, porfir, bazalt/, izdelane v sorazmerju dolžina : debelina = 7, še prenesejo v okviru spodnje meje dopustnih upogibnih napetosti dvojno lastno težo manj kvalitetne plošče /apnenec, peščenec/ izdelane v sorazmerju dolžina : debelina = 4.

Za bolj obremenjene nosilce, kakršni so na primer vmesni, pa bi najbrž veljala uporaba tega pravila v naslednji formulaciji: pri uporabi boljšega kamna vzamemo za enako število komolcev razpona /l/ enako število dlani za širino /b/ nosilca.



Slika 5: Določitev dimenzij nosilca iz kvalitetnejšega kamna.



Slika 6: Določitev dimenzij nosilca iz slabšega kamna

Tudi pri določanju varnih dimenzij prerezov tlačno obremenjenih sten ali stebrov so egiptovski arhitekti imeli v strukturi merskih odnosov komolca enostaven sistem hkratnega varnega in racionalno standardiziranega dimenzioniranja. Kakor pri upogibno obremenjenih kamnitih nosilcih, si moramo tudi v primeru tlačno obremenjenih stebrov ali sten pomagati s teorijo postopkov dimenzioniranja nearmiranih stebrov in sten.

Po tej teoriji se dopustne tlačne napetosti do vitkosti 35 ne zmanjšujejo, nato pa se dopustne napetosti vse bolj reducirajo, vse do vitkosti 75, ki je zgornja še dopustna uklonska meja.

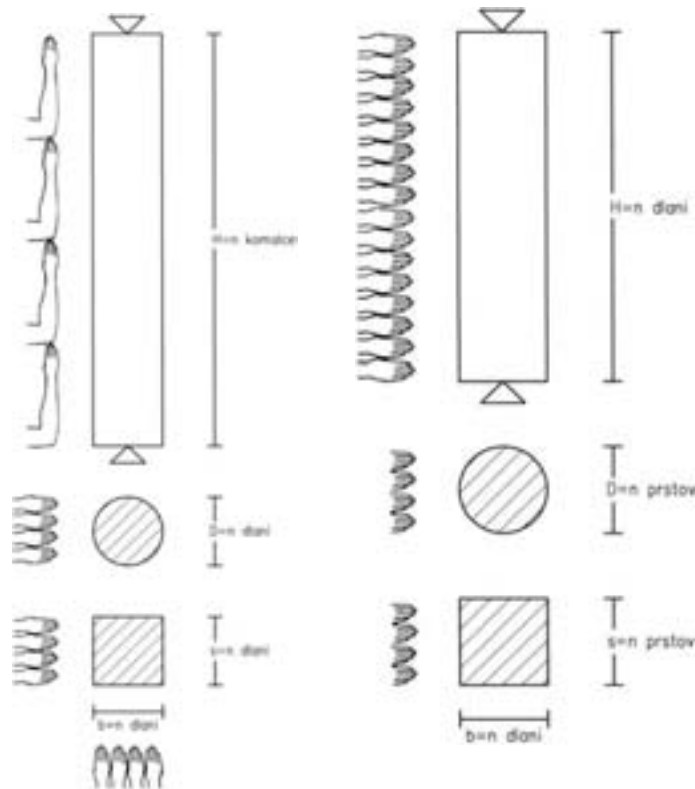
Uklonska preveritev stebrov izdelanih iz kvalitetnejšega kamna, nam za pravokotne prereze poda vitkost 24, za okrogle prereze pa vitkost 28.

Za stebre, izdelane iz slabšega kamna, pa dobimo za pravokotne prereze vitkost 14, za okrogle prereze pa vitkost 16.

Ker pa nastopi pri tlačno obremenjenih stebrih občasno tudi horizontalna sila potresa ali vetra, moramo upoštevati določeno zmanjšanje dopustne obremenitve, ki jo povzroči ta obtežba.

Za nearmirane elemente je dopustna 20% ekscentričnost, ki zmanjša dopustno bremenitev skoraj za polovico /44%/. Dopustna 20% ekscentričnost tudi dobro zajema ustrezno potresno obremenitev na dobrih temeljnih tleh pri IX. stopnji potresa po MCS.

Ugotovitve o možnem dimenzioniranju tlačno obremenjenih stebrov v merskih odnosih egiptovskega komolca kažejo veliko premišljenost. Egiptovski arhitekti so se znali učinkovito izogniti problemu prevelikega uklona stebrov, ki je danes eden najnevarnejših pojavov v gradbeni konstrukcijski tehniki.



Slika 7: Določitev dimenzij stebrov iz kvalitetnejšega kamna

Slika 8: Določitev dimenzij stebrov iz slabšega kamna

## ZAKLJUČEK

Vrjetnost podane teze o dimenzioniranju na osnovi strukture medsebojnih razmerij merskih enot posredno potrjuje tudi naslednja razlaga vitruvijskega pravila o evritmiji:<sup>6</sup>

Vitruvij pravi: *Eurythmia est venusta species commodosque in compositionibus membrorum aspectus. Haece efficitur, cum membra operis convenientia sunt altitudinis ad latitudinem, latitudinis ad longitudinem, et ad summam omnia respondent suae symetriae.* (De Architectura, L. I. C. II. 3.)

To mi pomeni: Evritmija je v lepoti in primernem izgledu v kompozicijah členov. To se doseže, če se pri členih zgradbe skladajo višina s širino, širina z dolžino in končno, če so vse te mere somerne.

Razsežnosti- višina, širina in dolžina, ki jih našteva Vitruvij, so določene mnogokratnikom modula. Če se te razsežnosti členov med seboj skladajo (cum membra convenientia sunt) in če so somerne, če imajo skupno mero, skupni modul (et respondent suae symetriae) – lahko govorimo o evritmiji.

V uporabi sorazmernih odnosov merske strukture egipčanskega komolca lahko zaslutimo preprostost in idealno smotnost dimenzioniranja v splošno poznani meri ter kako iz te merske strukture izhaja učinkovitost standardizacije. Hkrati mersko in nosilno je bila določena dolžina z ustreznim nosilnim prerezom za večjo ali manjšo nosilnost. Standardiziranost je omogočala tudi učinkovito in ekonomsko utemeljeno stalno "proizvodnjo" kamnitih nosilcev – na zalogo, ne glede na kraj kamnoloma ali možnost in potrebo takojšnje uporabe.

S skrbno razčlenitvijo antropometričnih merskih sistemov smo ugotovili, da lahko v vsakem antropometričnem merskem sistemu zasledimo podobno avtomatično konstrukcijsko

določanje dimenzij, kot smo jih razložili na primeru strukture merskih odnosov egiptovskega komolca. Pri vsakem merskem sistemu moramo upoštevati tudi posebne geografske, surovinske, družbene in še kakšne druge danosti, ki vplivajo na zasnovo in potem uporabo določenega sistema.

Podobne "merodajne" konstrukcijske zakonitosti, kot smo jih prikazali v uporabnih možnostih merskih odnosov egiptovskega komolca, lahko ugotovimo tudi pri drugih preteklih kulturnih ljudstvih.

Rimljani še danes slove kot izvrstni gradbeniki. Ker so bili kot vojaški narod nagnjeni k redu in premišljenosti, je najbrž premišljena tudi uporaba njihovih standardnih mer in pravil, ki izhajajo iz medsebojnih razmerij mer.

Vsekakor pa lahko že na osnovi podanih analiz možnosti hkratnega merskega in statičnega dimenzioniranja ugotovimo, da gre pri obvladovanju merskih odnosov in iz njih izhajajočih razmerij za tisto "skrivno zidarsko umetnost", ki se je v preteklosti tako ljubosumno čuvala in skrivnostno prenašala.

Rimski standardizirani merski sistem je sestavljen iz številnih različnih merskih enot, ki so antropometrične, ter se jih je zato lahko zapomniti in ustrezno uporabiti.

Razmerja med merskimi enotami so vsebovala tudi samodejno načelo določanja smotrnih, vendar statično še varnih dimenzij nosilnih gradbenih elementov.

Uporaba struktur medsebojnih razmerij merskih enot je torej avtomatično izključevala gradnjo nevarnih, "štedljivo" dimenzioniranih konstrukcij, enako pa je tudi izključevala gradnjo razsipnih, "preobilno" dimenzioniranih konstrukcijskih elementov. To samodejno, "avtomatično" določanje dimenzij je imelo vgrajeno tisto "mero", ki je smotno vključevala funkcionalne, konstrukcijske, gospodarske in oblikovne zahteve. Te ugotovitve nas poučujejo, da je v smotni in premišljeni merski sistem možno vključiti tudi konstrukcijska pravila in omejitve v preprosti in "avtomatski" obliki, tako da je izključena možnost zasnove in uporabe nevarnih, prešibko dimenzioniranih gradbenih elementov.

Seveda pa bi zanesljivost teh trditev najlaže preverili z obsežnimi trdnostnimi preizkusi dejansko uporabljenega gradiva, z delineacijo dobro ohranjenih arheoloških ostankov objektov, z določitvijo konstrukcijske zasnove in izvedbe takega objekta ter potem s statično analizo kontrolirali statično izkoriščenost gradiva pri raznih obtežnih slučajih.

Pri zasnovi zgradbe in potem gradnji tudi ne smemo pozabiti na praktičnost in priročnost hkratnega merskega in statičnega določanja dimenzij nosilnih gradbenih elementov.

Ker se je ohranilo le malo egipčanskih kamnitih stropnih konstrukcij /pa že te so daleč/, lesenih pa prav nič, ne moremo z vso gotovostjo izvajati sklepa o njih dimenzioniranju.

Zato naj ostane to nedokončan del naloge, ki nakazuje možnost poglobljenega študija na osnovi detajlnih izmer teh konstrukcij ter tudi rezultatov trdnostnih preizkusov kamnitega materiala, iz katerega so zgrajene te konstrukcije.



Slika 9: Prikazani srednjeveški meter, ki sestoji iz petih različnih delov, se je uporabljal do uvedbe merskega sistema

Z uvedbo metrskega sistema, ki temelji na dekadni osnovi, se je nekdanji "merodajni" princip hkratnega določanja mersko

usklajenih in statično varnih dimenzij popolnoma izgubil.

Tehnološka revolucija v proizvodnji lesenih in jeklenih profilov je omogočila inženirju, da je začel samostojno graditi javne in industrijske objekte. Arhitekt, ki se je opiral na akademizem različnih slogovnih pravil, ni bil več potreben.

Inženir je sledil le proizvodnji, eksperimentu in računu. XIX. stoletje pa je prineslo še bolj "inženirsko" gradivo – železobetone, ki ga je možno obvladati le z eksperimentom in računom.

Preučujoč postopke "avtomatičnega" dimenzioniranja s pomočjo strukture sorazmernih odnosov antropometričnih sistemov moramo najbrž tudi še danes upoštevati veljavno dejstvo, da pri gradnji monumentalne arhitekture racionalnost in cenenost nista najbolj pomembni.

Iz teh razlogov tudi ni mogoče iz ohranjenih arheoloških monumentalnih izkopnin preveriti veljavnost uporabe opisanega načina statično konstrukcijskega dimenzioniranja. Pri sakralnih, vladarskih in drugih javnih zgradbah sta vtis mogočnosti in vtis večnosti daleč važnejša kot optimalno dimenzioniranje vseh gradbenih elementov. V takih primerih gre za prestiž, upoštevajo pa tudi ti objekti v svoji zasnovi spoznanja o geometrijskih sovisnostih proporcijjskih razmerij, ki omogočajo statično varno gradnjo.

Monumentalne arhitekture se gradi razmeroma malo. Mnogičnost bi povzročila, da bi se izgubil čar posebnega, izjemnega. Največji del gradbene dejavnosti je nekdanj, tako kakor danes, obsegala gradnja objektov za stanovanje, delo, trgovino in promet. Pri teh delih pa so za naročnika cenenost in hitrost gradnje pri zagotavljeni varnosti bistvene prvine.

Mislimo, da teza o dimenzioniranju gradbenih elementov s strukturo sorazmerij merskih enot egiptovskega antropometričnega sistema predvsem prikazuje model preprostega in zanesljivega "orodja" za varno, usklajeno in racionalno dimenzioniranje, kakršno potrebujejo arhitekti tudi pri modernem dimenzioniranju v procesu zasnove načrtovanja, proizvodnje in vgrajevanja.

## SLIKOVNO GRADIVO

Slika 1: Konstrukcija nosilcev in srtebrov vestibula Kefrenovega svetišča v Gizeh.-Po: Pirenne J., HISTOIRE DE LA CIVILISATION DE L'EGYPTE ANCIENNE – DEUXIEME CYCLE, Ed. Albin Michel, Paris, 1962, str. 453-454

Slika 2-8 : delo avtorja

Slika 9: Prikazani srednjeveški meter, ki sestoji iz petih različnih delov in se je uporabljal do uvedbe merskega sistema. – Po: Muheim E., DIE ABTEI VON SENANQUE, Senanque, 1991

## LITERATURA

Kušar, J.: Dimenzioniranje lesenih nosilcev s strukturo medsebojnih antropometričnih mer egiptovskega komolca, AR 2002/1, FA, Ljubljana, 2002

Devide, V.: Matematika skozi kulture in epohe, Društvo matematikov, fizikov in astronomov, 1984, str. 69

Kurent, T.: Sistemi standardnih modularnih mera v arhitekturi, Arhitektonski fakultet, Beograd, 1975, str. 28

Kregar, R.: Naš kamen I. del, Naravni in umetni kamen za tehniko in okras, Naš dom, Gradbena strokovna založba, Ljubljana, 1974, str. 24

Curk, J.: Še o tonalitu, Črta in tvor, 2. Simpozij o naravnem kamnu v arhitekturi, Mineral d.d., Ljubljana 2002

Kurent, T.: Modularna evritmija šempeterskih edikul, Narodni muzej, Ljubljana, 1970, str. 92

prof dr Jože Kušar  
Univerza v Ljubljani  
Fakulteta za arhitekturo  
joze.kusar@arh.uni-lj.si