

LATVIJAS UNIVERSITĀTE  
ĢEOGRĀFIJAS UN ZEMES ZINĀTŅU FAKULTĀTE



Agnese Kukela

# **ĢEOLOGISKO ZINĀŠANU ATTĪSTĪBA SENĀS VALSTS LAIKĀ ĒGIPTĒ**

Promocijas darba kopsavilkums

Doktora zinātniskā grāda iegūšanai ģeoloģijas nozarē  
Apakšnozare: lietišķā ģeoloģija

Rīga, 2012

Promocijas darbs izstrādāts Latvijas Universitātes Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultātē, Ģeoloģijas nodaļas Lietišķās ģeoloģijas katedrā, laika posmā no 2008. gada līdz 2012. gadam.



LATVIJAS  
UNIVERSITĀTE  
ANNO 1919

IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

Eiropas Sociālā fonda projekta „Atbalsts doktora studijām Latvijas Universitātē ” Nr. 2009/0138/1DP/1.1.2.1.2./ 09/IPIA/ VIAA/004.

Darbs sastāv no ievada, 6 nodaļām, nobeiguma, literatūras saraksta.

Darba forma: disertācija ģeoloģijas nozarē, lietišķās ģeoloģijas apakšnozarē.

Darba zinātniskais vadītājs: profesors *Dr. geol. Valdis Segliņš*

Darba recenzenti:

asociētais profesors *Dr. geol. Ģirts Stinkulis*, Latvijas Universitātē  
docents *Dr. geol. Juris Soms*, Daugavpils Universitātē  
profesors *Dr. habil. art. Ojārs Spāritis*, Latvijas Mākslas akadēmijā

Promocijas padomes sastāvs:

profesors *Dr. geol. Vitālijs Zelčs* – padomes priekšsēdētājs  
profesors *Dr. geol. Ervīns Lukševičs* – padomes priekšsēdētāja vietnieks  
docente *Dr. geol. Aija Dēliņa*  
asociētā profesore *Dr. geogr. Laimdota Kalniņa*  
profesors *Dr. geol. Valdis Segliņš*  
*Dr. geol. Ivars Zupiņš*

Padomes sekretārs: asociētais profesors *Dr. geol. Ģirts Stinkulis*

Promocijas darba aizstāvēšana notiks 2012. gada 21. decembrī plkst. 10.00 Rīgā, Alberta ielā 10, Latvijas Universitātes Ģeoloģijas nozares promocijas padomes atklātā sēdē.

Ar promocijas darbu un tā kopsavilkumu var iepazīties Latvijas Universitātes bibliotēkā Rīgā, Kalpaka bulvārī 4.

Promocijas darbs pieņemts aizstāvēšanai ar LU Ģeoloģijas promocijas padomes 2012. gada 4. oktobra sēdes lēmumu Nr. 01/2012.

Atsaukmes sūtīt: *Dr. Ģirts Stinkulis*, Latvijas Universitātes Ģeoloģijas nodaļa, Raiņa bulvārī 19, LV-1586, Rīga. Fakss: +371 67332704, e-pasts: *Girts.Stinkulis@lu.lv*

© Latvijas Universitāte, 2012

© Agnese Kukela, 2012

ISBN 978-9984-45-604-1

# SATURS

Anotācija .....	4
Pētījuma tēmas aktualitāte .....	5
Pētījuma mērķis un uzdevumi .....	5
Darba novitāte .....	6
Rezultātu aprobācija .....	6
1. Līdzšinēji veikto Ģeoloģisko pētījumu apskats .....	8
1.1. Ieskats par Ēģiptes ģeoloģisko uzbūvi .....	8
1.2. Līdzšinējie priekšstati par ģeoloģiskajām zināšanām un resursiem Senajā Ēģiptē .....	9
2. Pētījuma teritorijas raksturojums .....	11
2.1. Sakāras plato ģeoloģiskā uzbūve .....	11
2.2. Pētījumu objekta raksturojums .....	12
3. Materiāli un metodes .....	14
3.1. Pētījumu objekta fotodokumentēšana un piramīdas ģeotelpiskā modeļa izveide .....	14
3.2. Būvkmens virsmas dēdēšanas novērtēšana .....	14
3.3. Pētījumu komplekss Džosera piramīdas fasādēs .....	15
4. Rezultāti .....	17
4.1. Ģeotelpiskā modeļa izveide .....	17
4.2. Pakāpju piramīdas stabilitāte .....	18
4.3. Izmantoto akmens būvmateriālu kvalitātes pazīmes .....	19
4.4. Izmantoto saistvielu novērtējums .....	20
4.5. Džosera piramīdas akmens materiāla dēdēšanas novērtējums .....	20
5. Diskusija .....	23
Secinājumi .....	26
Pateicības .....	27
Publikāciju saraksts .....	28
Summary of doctoral thesis .....	33
Izmantotā literatūra .....	59

## ANOTĀCIJA

Promocijas darbs ir veltīts ģeoloģisko zināšanu apguves un pieauguma novērtēšanai Ēģiptē Senās valsts laikā, kad tiek veidotas pirmās akmens sakrālās būves, tajā skaitā Džosera pakāpju piramīda. Pētījumā ir nodalīti vairāki piramīdas būvniecības posmi, kuros būtiski atšķiras izmantotā būvākmeņi un saistvielu kvalitāte. Tie raksturo zināšanu pieaugumu par dabiskajām izejvielām, kā arī daudziem tehnoloģiskiem jauninājumiem.

Pētījumā secināts, ka tieši šajā vēsturiskajā posmā salīdzinoši īsā laikā atsevišķu amatnieku iepriekšējās pakāpeniski uzkrātās zināšanas tiek apkopotas savulaik lielākās sakrālās būves izveidei. Tā atspoguļo Senās valsts pārvaldes augsto centralizācijas pakāpi, daudzlīmeņu darba organizāciju un vadību lielajās būvēs, tajā skaitā būvniecībai nepieciešamo materiālu meklēšanu, to iegūvi un sagatavošanu izmantošanai konkrētām būvniecības vajadzībām. Seno būvju sistematiska analīze un pētījumu augsta detalitāte ļauj secināt, kā Senajā Ēģiptē mainījās un pieauga ģeoloģiskās zināšanas.

**Atslēgvārdi:** Ēģiptes ģeoloģija, Senā valsts, būvmateriāli, dēdēšanas novērtēšana, 3D modeļi, ģeoloģiskās zināšanas.

## Pētījuma tēmas aktualitāte

Promocijas darbā un tā nosaukumā ir akcentētas ģeoloģiskās zināšanas un to attīstība Ēģiptes Senās valsts laikā. Šāds uzsvars ir izdarīts, lai pierādītu, ka atšķirībā no tradicionālās seno būvju pētījumu pieejas mūsu pētījuma priekšmetā un Ēģiptes fizioģeogrāfiskajos apstākļos ir jāņem vērā daudzas likumsakarības, kuru izzināšanai ir vajadzīgi speciāli pētījumi. Senajā valstī izmantotā būvākmeņi ieguves avoti un kvalitāte ir intensīvs zinātnisko pētījumu priekšmets visā pasaulē, un tas nosaka pētījuma aktualitāti un mūsdienīgumu.

Ir vispārzināms, ka akmens būvniecības materiālu sākotnējā kvalitāte un pašreizējais stāvoklis ir cieši saistīti ar to veidojošo iežu īpašībām, fizikālķīmiskajiem rādītājiem un vairākiem citiem faktoriem. Šo faktoru mijiedarbība nosaka izmantoto būvmateriālu un saistvielu saglabātības un izmaiņu likumsakarības (Kukela, Seglins, 2012a; Klemm, Klemm, 2010), kas būtiski atšķiras no iežu īpašībām dabiskajā sagulumā, kā arī to eksponētās ieguves vietās Sakāras plato nogāžu atsegumos. Būvniecībā izmantoto akmens materiālu kvalitātes novērtēšanas parametru iegūšanas metode, kas izstrādāta un pārbaudīta promocijas darbā, ir nepieciešama pamatotu seno kultūrvēstures pieminekļu novērtēšanas un saglabāšanas projektu izstrādei un realizācijai.

## Pētījuma mērķis un uzdevumi

Uzsākot pētījumu, tika izvirzītas vairākas hipotēzes. Saskaņā ar tām Ēģiptē Senās valsts laikā ļoti īsā vēsturiskā periodā bija atšķirīgas iespējas apgūt pietiekamas ģeoloģiskās zināšanas, kas ļautu sākt ļoti lielu akmens bloku sakrālo būvju izveidi. Pirmā izvirzītā hipotēze („zināšanu importa” hipotēze) pieļāva, ka jaunās zināšanas un to ieviešana ir saistīta ar to pārņemšanu no citām augsti attīstītām kultūrām, kā arī atsevišķu personu izšķirošo lomu akmens būvju izveides uzsākšanā. Kā alternatīva hipotēze tika noteikta vietējo zināšanu pakāpeniska uzkrāšana un attīstība. Minēto hipotēžu pārbaudei tika izvirzīti atbilstoši promocijas darba uzdevumi.

Pētījuma mērķis bija izvērtēt un pārbaudīt abas pamata hipotēzes par ģeoloģisko zināšanu attīstību Ēģiptē Senās valsts laikā.

Lai sasniegtu mērķi, tika izvērtētas visas pieejamās jaunāko teorētisko metožu izstrādnes, analizēta publicētā zinātniskā literatūra, pētījumu tehniskie ziņojumi un internetā pieejamā informācija, kā arī pēti un analizēti dažādu profesionālo organizāciju rīkoto konferenču, semināru un kursu materiāli.

Pamatuzdevums pētījuma mērķa sasniegšanai bija savākt, apkopot un izanalizēt apjomīgo faktu materiālu, izslēdzot no tā kļūdainos un šaubīgos mērījumu datus, kas varētu negatīvi iespaidot pētījuma gala rezultātu. Tāpat

svarīgi bija atrast metodiski pareizo risinājumu, kas ļautu ierobežotas pieejamības objektos iegūt verificējamus un atkārtojamus datus.

Iepriekš minēto uzdevumu izpilde ietver Senās valsts vēsturiskā konteksta apzināšanu, kā arī atsevišķu kultūrvēstures pieminekļu detalizētu izpēti, dodot iespēju analizēt un novērtēt ģeoloģiskās zināšanas par būvniecībā izmantotajiem materiāliem, to kvalitāti, kā arī izstrādāto metodiku piemērojamību līdzīgos pētījumos šajā reģionā.

### **Darba novitāte**

Promocijas darba autore pētījumā pirmo reizi realizēta netieši iegūto datu sistemātiska analīze un to pārbaude ar lauku eksperimentu rezultātiem: noteiktas likumsakarības, novērtēti apstākļi un faktori, kas ietekmē rezultātus. Veiktais pētījums ir orientēts tieši uz Ēģiptes ģeoloģiskiem un fizioģeogrāfiskiem apstākļiem, kas ļauj pilnīgāk apzināt būvniecībā izmantoto izejvielu īpatnības vērtīgu pieminekļu lokalizācijas vietās.

Autore pētījuma rezultātu analīzei izmantota daudzpusīga un kompleksa datu apstrādes pieeja. Autore veiktais pētījums, plaši lietojot augstas izšķirtspējas objekta fotodokumentēšanu, ir pirmais šāda veida eksperiments, kur piramīdas fasāžu eksponētās virsmas saglabātības aspekti ir pamatoti ar lauku novērojumu datubāzi.

Pētījumā iegūto datu verificēšanai pirmo reizi lietota inovatīva būvbloku virsmas bojājumu novērtēšanas metode, kas balstās uz instrumentāli noteiktiem mērījumiem un ir pilnveidota izmantošanai kultūrvēstures objektos ar ierobežotu pieejamību.

Latvijā šādas ievirzes pētījums ir pirmais, un tāpēc iegūtie rezultāti ir tikai neliela daļa no tās informācijas, kas vēl apgūstama ļoti aktuālajā Senās valsts vēstures izziņāšanas jomā. Tas norāda uz to, ka šajā virzienā pētījumi ir jāturpina arī nākotnē.

### **Rezultātu aprobācija**

Balstoties uz pētījuma rezultātiem, līdz 2012. gadam sagatavotas 12 zinātniskas publikācijas par atsevišķām pētījuma sadaļām un darbu kopumā. No tām 6 raksti publicēti starptautiskos izdevumos un kolektīvajās monogrāfijās, 8 publikācijas satur starptautisko konferenču un semināru tēzes, 5 – Latvijā nolasīto referātu publicētās tēzes. Starptautiskos zinātniskos kongresos, konferencēs un semināros ir nolasīti 10 referāti, kā arī 6 ziņojumi sniegti zinātniskās konferencēs un semināros Latvijā. Kopumā publicētie materiāli pilnībā atspoguļo disertācijas rezultātus un izriet no promocijas darbam izvirzītajiem uzdevumiem.

---

Papildus iepriekš minētajam atsevišķi disertācijā apskatītie metodiskie jautājumi par akmens materiāla bojājumu diagnostiku un rezultātu interpretāciju un prezentāciju ir aprobēti un pārbaudīti arī dažādos ģeoarheoloģiskos pētījumos, kas veikti gan Latvijā gan arī citās Eiropas valstīs.

# 1. LĪDZŠINĒJI VEIKTO ĢEOLOĢISKO PĒTĪJUMU APSKATS

Ēģiptes teritoriju līdz 19. gadsimta nogalei galvenokārt izzināja un pētīja dažādi ceļotāji, senlietu meklētāji, vēsturnieki, arhitekti, arī militārpersonas un valsts ierēdņi un administratori. Napoleona vadītās franču militārās ekspedīcijas laikā tika veikti pirmie Ziemeļģiptes sistemātiskie ģeoloģiskie un mineraloģiskie pētījumi, pirmo reizi tiek minēti ieži, no kuriem būvētas lielākās vēsturiskās būves Senajā Ēģiptē – piramīdas un tempļi.

Mūsdienās sistemātiski Ēģiptes Arābu Republikas ģeoloģiskie pētījumi iesākās 1896. gadā ar Ēģiptes ģeoloģiskā dienesta izveidi. 1912. gadā tiek publicētas pirmās M 1 : 1 000 000 ģeoloģiskās kartes ar ļoti vienkāršotu ģeoloģisko informāciju par galvenajiem pamatiežu litotipiem, un tikai 1981. gadā tiek izdotas līdz mūsu dienām pašas precīzākās Ēģiptes ģeoloģiskās kartes M 1 : 2 000 000, kas pamatā balstās uz lauku apstākļos veiktiem novērojumiem un laboratorijas apstākļos analizētiem paraugiem.

Līdz šim Ēģiptes teritorijas ģeoloģiskā izpēte nav bijusi detalizēta pat salīdzinājumā ar citām Āfrikas valstīm, tādēļ arheoloģiskos un ģeoarheoloģiskos pētījumos tiek lietotas angļu koloniālā laika ģeoloģiskās kartes un savulaik izveidotie ģeoloģiskie apraksti, it īpaši Nilas ielejā attiecībā uz vēsturisko posmu līdz Jaunās valsts periodam.

## 1.1. Ieskats par Ēģiptes ģeoloģisko uzbūvi

Ēģiptes teritorija ir piederīga Āfrikas kontinentālai plātnei, tās ziemeļaustrumu daļai, kur to šķēļ vairāki dziļlūzumi un ir izveidojušās vairākas atšķirīgas tektoniskās struktūras. Tās nodala Ēģiptes Arābu Republikas divas galvenās daļas – Nūbijas un Sinajas tektonisko plātņi. Vairākas paralēlas dziļlūzumu zonas Sarkanās jūras teritorijā nodala Ēģipti no Arābijas pussalas (Arābijas tektoniskā plātne), un paralēli tām ir izvietoti mazāk aktīvi dziļlūzumi, kurus uzskatāmi iezīmē mūsdienu Nilas tecējums un tā meandrēšanas zonas. Kopumā tā ir seismiski aktīva teritorija, kurā zemestrīces ar magnitūdu virs 5 ballēm nav retums.

Ēģiptes ģeoloģiskajā griezumā virs 35–40 km dziļumā esošās Moho robežas pamatklintāju veido magmatiski plutoniski un efuzīvi, kā arī metamorfi ieži. Pamatklintāja virsma nav līdzena, un to daudzos atsevišķos blokos sadala lūzumi. Šo virsmu ar visai ievērojamu ģeoloģisko diskordanci pārsedz paleozoja kontinentālas izcelsmes klastiskie ieži. Tie daudzviet vēlāk tiek erodēti, un šo raksturīgo erozijas virsmu visā Ēģiptes teritorijā pārsedz juras perioda un krīta perioda sākuma nesadalīta, līdz 570 m bieza faciāli mainīga slāņkopa. Vēlā krīta

epohā gandrīz visu Ēģiptes teritoriju sedz jūra, tās attīstībā tiek izšķirtas vairākas transgresijas un regresijas, un ģeoloģiskajā griezumā to ieži secīgi pārsedz juras un krita stratigrāfiski nesadalītos veidojumus.

Ģeoloģisko griezumu turpina līdz 450 m biezi oligocēna veidojumi. Tie ir faciāli atšķirīgi un veido visai viendabīgus vulkānisko pelnu klastiskas sedimentācijas veidotu atšķirīgu iežu slāņus (Taibas slāņi) vai arī tiek raksturoti kā argilītu un aleirolītu slāņi ar nelielu smalkas smilts piejaukumu (Abu Zenimas svīta). Griezumu noslēdz īss intensīvas erozijas posms, ko visbiežāk saista ar senās Nīlas attīstības sākuma fāzēm.

Sekojošā miocēna laikā veidojas gandrīz puse no visas zināmās nogulumiežu segas Ēģiptes ziemeļdaļā un tās biezums reti ir mazāks par 3–3,5 km. Šajā griezuma daļā tiek nodalīta 16 dažādu svītu nogulumiežu visai mainīga sastāva slāņmija, kas atspoguļo sedimentācijas apstākļu dažādas faciālās izmaiņas. Kopumā griezuma apakšējai daļai raksturīgi smilšakmeņi un kaļķakmeņi ar nelielu argilītu piejaukumu, griezuma vidusdaļā izteikti dominē kaļķakmeņi ar nebūtisku merģeļu klātbūtni, bet griezuma augšējā daļā dominē ļoti kontrastains ģeoloģiskais griezumam ar biežu iežu sastāva mainību – no argilītiem līdz ļoti tīriem kaļķakmeņiem, tomēr visai nozīmīga ir sāls, ģipša un anhidrīta lēcu un slāņu klātbūtne.

Ģeoloģisko griezumu noslēdz pliocēna un kvartāra veidojumi, kas Vidusjūras piekrastes teritorijā var sasniegt pat 4 km biezumu. Pliocēna ģeoloģiskais griezumam šeit ir analogs miocēna vidējās daļas ģeoloģiskam griezumam, kur dominē kaļķakmeņi un pakļauta nozīme ir vāji cementēta smilšakmens un aleirolīta slāņiem. Vietām ir sastopami arī dolomīti. Raksturīgi kvartāra nogulumu tuksnešu teritorijās ir smiltis, Nīlas ielejā tie ir daudzveidīgi aluviālie nogulumu, bet Vidusjūras un Sarkanās jūras piekrastē dominē smilšaini nogulumu, zināmi arī mūsdienu koraļļu rīfi (Schlumberger, 1984; Said, 1990).

## **1.2. Līdzšinējie priekšstati par ģeoloģiskajām zināšanām un resursiem Senajā Ēģiptē**

Kopš senatnes Ēģiptē apdzīvota ir gandrīz tikai Nīlas ieleja (apmēram 0,5% valsts teritorijas), kurā koncentrējas vairāk nekā 95% valsts iedzīvotāju. Romas impērijas laikā Ēģiptes iedzīvotāju skaits jau sasniedza apmēram 18 miljonus un vienmēr ir pastāvējusi atkarība no dabas resursu pieejamības ārpus šaurās Nīlas ielejas. Dabas resursu dabiskais ierobežojums un ļoti lielais iedzīvotāju skaits noteica to, ka Ēģiptes dabas resursu apzināšana, izpēte un novērtēšana bija ļoti augsti attīstīta jau kopš pašiem senākajiem laikiem.

Tieši ūdens Senajā Ēģiptē ir kritiskais resurss un ūdens pieejamība nosaka apdzīvotību. Jau Senās Ēģiptes valstiskuma sākuma posmā ir izstrādāts ne tikai ļoti precīzs plūdu prognožu kalendārs, bet arī ūdens līmeņu monitoringa

sistēma un komplicēta Nīlas ūdens patēriņa uzskaites un norēķinu kārtība par ūdens izmantošanu. Šāda uzskaitē tiek ieviesta arī oāzēs.

Kā otrs nozīmīgākais resurss, kas ir tieši saistīts ar Nīlu, ir palu nestās dūņas, kas kopš vēlā akmens laikmeta šeit tiek izmantotas lauku mēslošanai. Pali Nīlā ir divas reizes gadā, un tie ir atšķirīgi, tādēļ šo Nīlas dūņu apsaimniekošana, jaušana ar kompostu, pelniem un kaļķi, kā arī zināšanas par šādu mākslīgo maisījumu veidošanas tehnoloģijām un izejvielu proporcijām noteikti ir uzskatāmas par ļoti augsti attīstītām tehnoloģijām. Nīlas dūņas tiek izmantotas arī kleķa būvmateriālu izgatavošanai. Šajā laikā tiek ieviesta izejmateriāla skalošana, kas ļauj iegūt mālaini aleirītisku masu, kura ir pietiekami tīra no nevēlamiem piemaisījumiem, un atsevišķi arī skalotu aluviālo smilti tālākai izmantošanai par liesinātāju un apmetumiem. Tiek izstrādātas tehnoloģijas izejvielu atskalošanai, arī dažādi sieti, aprīkojums izejvielu sajaukšanai un vidējošanai; tiek ieviestas piedevas, noteiktas to proporcijas; tiek izstrādāti vairāki standarti kleķa ķieģeļu izmēriem, prasības žāvēšanas ilgumam un apstākļiem, arī gatavās produkcijas uzglabāšanai un transportēšanai.

Ēģiptē ļoti agri tiek apgūta keramikas izgatavošana, apdedzināšana un podnieka ripa. Apmēram 3 tūkst. g. p. m. ē. šeit jau ir visai attīstītas tradīcijas keramikas trauku un māla rotaļlietu izgatavošanā. Īpaši atzīmējama porcelānveidīgu māla keramikas izstrādājumu izgatavošanas apgūšana, kuras vajadzībām tiek meklētas un arī atrastas balto mālu (kaolīnīta) iegulas, un šis māls tiek lietots Nīlas dūņu illīta māla bagātināšanai, līdz tiek iegūta noteiktas kvalitātes porcelānveidīga keramika.

Līdzīgi tiek meklētas un arī sekmīgi atrastas dabisko krāsvielu iegulas, sāls un sodas, pusedzģakmeņu un dzģgakmeņu kļiedņi un dzģslas, zelta un vara rūdas. Šādi jau Senās valsts laikā tiek meklēti un saimnieciskajā dzģvē iekļauti aptuveni 85–90 minerāli un to paveidi.

Iepriekš aprakstītais vēsturiskā secībā uzskatāmi parāda, kā mainās ģeoloģiskās zināšanas par zemes dzģlēm un to kvalitāti, kā arī ļauj izsekot būvniecībai nepieciešamā būvkmens lietošanas izmaiņām. Iespējams, ka šajā nozģmē Dģzosa piramīda ir viens no pašiem veicsmģģākajiem piemģriem, jo tās dažādās būvniecģbas stadijas ļauj izsekot gan akmens materiāla, gan arī saistģvielu lietojuma prasmģu attģstģbai (Kukela, Seglins, 2012b).

## 2. PĒTĪJUMA TERITORIJAS RAKSTUROJUMS

Senās valsts ģeoloģisko zināšanu izmaiņas uzskatāmāk un zinātniski pamatotāk būtu atpazīstamas tieši Sakāras plato izvietotā nekropolē. Vienlaikus par salīdzinājumu pētījumu teritorijām tika noteikta Senās valsts nekropole Gizas plato un Dašūrā, kā arī senākās mošeju būves Kairā.

Vides monitoringa sistēmas mērījumu dati norāda, ka gaisa temperatūra, akmens virsmas temperatūra, relatīvais gaisa mitrums un mitruma kondensēšanās temperatūra būtiski svārstās gan diennakts, gan arī gada laikā. Mērījumu dati norāda uz pastāvošiem nelabvēlīgiem klimatiskiem apstākļiem akmens pieminekļu saglabāšanai, tie sekmē akmens materiāla sabrukšanu un saistvielas sadalīšanos. Šo sabrukuma procesu pastiprina vēja un smilšu erozijas abrazīvā ietekme.

### 2.1. Sakāras plato ģeoloģiskā uzbūve

Sakāras plato atrodas apmēram 40 km uz dienvidaustrumiem no Kairas Nīlas kreisajā krastā un ir par 17–25 m piepacelts virs upes mūsdienu virspalu terases. Tas kontrastaini izeļas apkārtējā ainavā, un šeit kopš pirmās dinastijas laikiem ir ierīkota viena no senākajām nekropolēm, kas ir tikusi izmantota aptuveni 3 tūkstošus gadu. Kapenes šeit ir izveidotas gan kā pazemes būves, gan kā virszemes mastabas, piramīdas un vienkāršas koptu kapsētas. Mūsdienās tā ir tuksneša nomale.

Pētījumu objekts izvietojas plakanā bijušās Nīlas palu un plūdu veidotu aizsērējušu vecupju un lagūnas līdzenuma dienvidu daļā. Zemes virsma darbu teritorijā ir 20–44 m augstāk par pašreizējo jūras līmeni. Šeit gar Nīlas kreiso krastu izvietojas Nīlas vāji izteiktu un daudzviet pārveidotu virspalu un palu trašu josla, daļēji ietverot arī pētījumu objektam piegulošo teritoriju.

Sakāras plato kopumā veido vidējā un vēlā miocēna Mokatamas slāņkopas (Mādi svītas apakšējā daļa) seklas jūras ritmiski kārtoti, slāņoti kaļķieži. Tie slāņkopas apakšējā daļā sastāv no smilšaina un masīva kaļķakmens 30–50 cm bieza slāņa, kuru pārsež 10–15 cm biezi merģeļi, bet ritmu noslēdz līdz 10 cm biezis argilītu un aleirolītu slānis. Nākamais ritms sākas ar smilšainu kaļķakmens vai pat smilšakmens ar karbonātu cementu starpkārtu, kura ne vienmēr ir izteikta, un to turpina mazāk smilšains un masīvs kaļķakmens. Griezumā uz augšu ritma ietvaros proporcijas starp slāņiem mainās un pieaug mālaino iežu nozīme, līdz zemes virsmas tuvumā kaļķakmens un merģeļu / argilītu slāņu biezuma proporcijas var sasniegt 1 : 1. Ritmu biezums nav vienāds un izturēts un mainās no 0,7–1,2 m līdz 4–5 m. Nereti ir sastopami vietēji muldveida padziļinājumi, kuros mālaino iežu slāņa biezums var sasniegt pat vairākus metrus. Mālaino

slāņu biezumam ir tendence palielināties virzienā uz dienvidiem, bet ziemeļu pusē šajos iežos ir visai ievērojams ģipša daudzums. Iepriekš minētie pelēkie un iedzelteni pelēkie smilšainā kaļķakmens slāņi ir galvenais vietējais būvmateriāls nekropoles būvniecībā, un ģeoloģiskā griezuma augšējā daļa vietām atsedzas plato stāvajās nogāzēs (2.1. attēls).



2.1. attēls. Sakāras plato ģeoloģiskā griezuma eksponētā daļa

Teritorija kopumā ir seismiski aktīva, un katru gadu šeit tiek reģistrētas vairākas zemestrīces. Rezultātā masīvie kaļķakmens slāņi ir saplaisājuši, veidojot savdabīgu bloku struktūru ar izmēriem aptuveni 0,30–0,40 m, daudz retāk sastopami lielāki neplaisājuši kaļķakmens dabiskie bloki.

## 2.2. Pētījumu objekta raksturojums

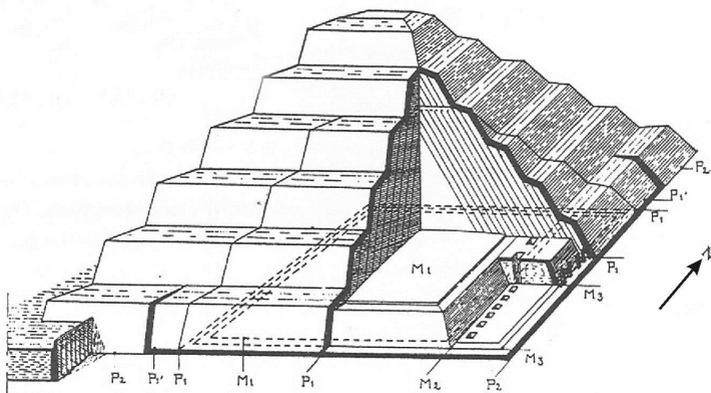
Par pētījuma objektu tika izvēlēta valdnieka Džosera pakāpju piramīda Sakārā. Tā ir sarežģīta būve, kas savu pašreizējo izskatu ir ieguvusi pakāpenisku pārbūvju rezultātā. Sena un ļoti liela solveida virszemes kapene (mastaba) pārbūves procesā tika paplašināta divos posmos, kurus noslēdz četrpakāpju piramīdas izbūve virs paplašinātās mastabas. Savukārt virs četrpakāpju piramīdas tika izbūvēta vēl lielāka un plašāka sešpakāpju piramīda. Kopumā ir atpazīstamas sešas piramīdas būvniecības stadijas (2.2. attēls).

Pašreizējā veidolā piramīdas pamatne ir 121 × 109 metri un augstums sasniedz 63 metrus (Baud, 2002). Mūsdienās noteiktais piramīdas tilpums ir

aptuveni 330 400 kubikmetru, tomēr jāņem vērā, ka piramīdas iekšienē un zem tās ir vairākas visai ievērojamu izmēru šahtas un pazemē ir izveidots vairāk nekā 6 km garš tuneļu un dažādu telpu tīkls, kā arī 28 metrus augsta apbedījuma šahta (Lehner, 2004).

Valdnieka Džosera piramīda nav viendabīga, un tās izbūvē ir izmantoti dažādi, tajā skaitā nepiemēroti, materiāli. Tas bija zināms jau senatnē, un tādēļ šeit vairākkārtīgi tika veikti iespaidīgi rekonstrukcijas un pārbūves darbi.

Sakāras plato, kur izvietots pakāpju piramīdas komplekss, atrodas seismiski aktīvā zonā. Šeit zemestrīces tiek fiksētas vairākas reizes gadā, un ir zināms, ka 1992. gada zemestrīces rezultātā aizbruka ne tikai atsevišķi pazemes tuneļi, bet ievērojami cieta arī piramīdas fasādes daļas. Lielākā bojājumu daļa tika mehāniski nostiprināta ar cementa masu un lietu betonu, kas atšķirīgo īpašību dēļ vietām turpina negatīvi ietekmēt kopējo būves stabilitāti.



## 2.2. attēls. Shematisks pakāpju piramīdas būvniecības stadiju modelis

(pēc Verner, 2004)

Apzīmējumi:

M1, M2, M3 – sākotnējās mastabas pārbūves posmi;

P1, P2 – piramīdas pārbūves posmi.

Pēdējo gadu laikā ir veikti vairāki pētījumi, lai novērtētu kompleksa bojājumu pakāpi un ietekmes riskus. Tāpat tika izstrādāts piramīdas kompleksa nostiprināšanas un kompleksas rekonstrukcijas plāns. Diemžēl šie darbi ne vienmēr ir veikti kvalitatīvi un arī izstrādātais rekonstrukcijas plāns ir nepamatoti vienkāršots un nepilnīgs.

## 3. MATERIĀLI UN METODEDES

### 3.1. Pētījuma objekta fotodokumentēšana un piramīdas ģeotelpiskā modeļa izveide

Piramīdas fasāžu fotodokumentēšana tika veikta ar *SONY DSC-R1 10,3 Mpix* digitālo fotokameru. Visas pētījuma vajadzībām pieejamās Džosera piramīdas fasāžu fotogrāfijas (uzņemtas 2005.–2011. gadā, kopā apmēram 2300 fotoattēli) sākotnēji tika klasificētas pēc uzņēmuma iegūšanas laika (gads, mēnesis), pēc tam – piesaistot uzņēmumus konkrētām piramīdas fasādēm un stūriem (šķautnēm). Papildus tika atzīmēti dati par attēla lielumu, kameras specifikācija, kā arī norādītas papildu ziņas par fotografēšanas apstākļiem. Datubāzē apkopotās digitālās krāsainās fotogrāfijas veido datu pamatmasīvu.

Piramīdas ģeotelpiskais modelis tika izstrādāts *Bentley MicroStation* datorprogrammu vidē. Modeļa tehniskai izveidošanai tika izmantoti Latvijas zinātniskās ekspedīcijas laikā iegūtie 3D lāzerskenēšanas dati par Džosera piramīdas pirmajām divām pakāpēm. Piramīdas trešās, ceturtais, piektās un sestās pakāpes izveidei par pamatu tika izmantots modelis, kas veidots ar *Google SketChup* programmu un koriģēts, pamatojoties uz Džosera piramīdas arhīva dokumentos pieejamiem datiem. Ģeotelpiskā modeļa noslēguma versija veidota, izmantojot datorprogrammā *MicroStation V8i* iestrādāto virsmas veidošanas algoritmu *smartsurface*.

Piramīdas atsevišķu fasāžu foto mozaikas (foto montāžas) izveidei un tās tālākai integrācijai izstrādātajā 3D modeli no radītās datubāzes tika atlasīti atbilstoši fasāžu fragmentu fotoattēli. Attēlu mozaikas novietošana, kā arī dēdēšanas veidu un to intensitātes attēlošana uz piramīdas ģeotelpiskā modeļa tika īstenota ar datorprogrammas *MicroStation V8i* moduli *Descartes*. Šī datorprogramma paredz arī iespēju aprēķināt izzīmēto laukumu platības. Tā kā Džosera pakāpju piramīdas ģeotelpiskais modelis ir izveidots mērogā, ievērojot piramīdas reālos izmērus un dimensijas, izzīmētos dažādas dēdēšanas un intensitātes laukumus ir iespējams izteikt skaitliski (kvadrātmetros).

### 3.2. Būvkmens virsmas dēdēšanas novērtēšana

Jebkura akmens būve neatkarīgi no izmantotā akmens materiāla veida un tā kvalitātes ir pakļauta ārējo apstākļu ietekmei – būvkmens un ar laiku zaudē savas īpašības un dēdē. Pētījumiem kultūrvēstures pieminekļos ir izstrādātas vairākas nedestruktīvas dēdēšanas intensitātes novērtēšanas metodes (Svahn, 2006; Sass, Viles, 2010), tomēr to lietošanai ir nepieciešams tiešs kontakts ar

pētāmo objektu (objekta fragmentu vai fasādi). Starp daudzām šādām pētniecības metodēm izceļama B. Ficnera izstrādātā dēdēšanas veidu un to intensitātes novērtēšanas (Fitzner, Heinrichs, 2002) metode. Lietojot minēto metodi, ir veikti akmens materiāla dēdēšanas novērtēšanas pētījumi vairākos nozīmīgos Ēģiptes kultūrvēstures akmens pieminekļos, tostarp Karnakas templī Luksorā, Hufu piramidā Gīzā, El-Merdani mošejā Kairā. Šo pētījumu rezultātā tika identificēti atbilstošas grupas dēdēšanas veidi un noteikta to dažādā intensitāte. Mūsu pētījuma vajadzībām un metodikas attīstībai sākuma posmā tika izvēlēta tieši B. Ficnera izstrādātā dēdēšanas veidu un to intensitātes klasifikācija, jo tās pamatā ir ne tikai pētāmā objekta vizuāls novērtējums, bet arī akmens materiāla ipašību daudzpusīgi instrumentāli mērījumi.

Sākotnēji sagatavotās klasifikācijas aprobācijas un adaptācijas, bet vēlāk arī metodikas pilnveides mērķiem tika izvēlēts B. Ficnera veiktais pētījums El-Merdani mošejā Kairas vēsturiskajā centrā (Ēģiptē) (Fitzner et al., 2002). El-Merdani mošejas fasādes fragmenta dēdēšanas formu un to intensitātes diagnosticā un kartografēšana tika veikta pēc autores uzņemtām fotogrāfijām, analizējot mošejas dienvidaustrumu fasādes fragmenta katra akmens bloka virsmu. Konstatētie dēdēšanas veidi un to intensitāte tika novērtēta pēc iepriekš izstrādātās vienkāršotās dēdēšanas tipu klasifikācijas shēmas, un iegūtās dēdēšanas un tās intensitātes kartes savstarpēji tika korelētas atsevišķu akmens bloku līmenī. Veiktais pētījums norāda, ka pirms 10 gadiem veikto novērojumu vieta ir atpazīstama dabā un iepriekšējo pētījumu dati ir salīdzināmi ar jaunajiem, vienkāršojot dēdēšanas veidu un intensitātes klasifikāciju. To apstiprina fotodokumentācijas analizē iegūto datu un B. Ficnera oriģinālo instrumentālo pētījumu augsta datu korelācijas vērtība ( $R^2 = 0,8984$ ), kas ļāva šo metodi turpmāk aprobēt un attīstīt.

### 3.3. Pētījumu komplekss Džosera piramīdas fasādēs

Turpmākie akmens materiāla dēdēšanas pētījumi tika veikti valdnieka Džosera pakāpju piramidā. Sākotnēji katras Džosera pakāpju piramīdas fasādes fragments tika novērtēts, lietojot B. Ficnera izstrādāto metodiku (Fitzner et al., 2002) un pētījumam izstrādāto dēdēšanas pazīmju klasifikāciju, kas ļāva konstatēt visus šajā klasifikācijā nodalītos dēdēšanas veidus arī Sakārā, valdnieka Džosera piramidā. Pētījums norāda, ka piramīdas fasādēs dabā un fotodokumentācijā ir atpazīstami vēl arī citi raksturīgi dēdēšanas veidi, kas pēc savas izpausmes katrs ir vērtējams vairākās grupās. Kopumā tās ir pazīmju grupas, kas var tikt secīgi sakārtotas kādā noteiktā sistēmā, kas adaptēta konkrēta objekta pētījuma vajadzībām. Vienotas sistēmas izveidei tika veikti detalizēti pētījumi parauglaukumos visās piramīdas fasādēs. Tas kopumā ļāva sākotnēji iegūt vairāk nekā 30 dažādas pazīmju grupas jeb kategorijas. Vēlāk tās tika apvienotas,

izveidojot vienotu kategoriju sistēmu, kas tika papildināta ar tipiskiem piemēriem jeb kategoriju katalogu un noteicēju (Kukela, Segliņš, 2012c). Autores pieredze liecina, ka šāda konkrētam objektam adaptēta kataloga izveide pētījuma gaitā ir ļoti svarīga, jo ļauj būtiski samazināt subjektīvo vērtējumu un atvieglo dažādās fasādēs iegūto rezultātu savstarpēju salīdzināšanu.

Atsevišķa pētījuma daļa tika veltīta tādu saistvielu izpētei, kas izmantotas Džosera piramīdas būvniecībā. Pakāpju piramīdā par saistvielu ir izmantoti dažādi mākslīgi veidoti maisījumi, un, neveicot laboratoriskas pārbaudes, šeit ir iespējams novērtēt tikai izmantotās saistvielas saglabāšanās pakāpi, vērtējot to kā dēdēšanu. Veiktais pētījums ļauj vizuāli diagnosticēt būvbloku saistīšanai lietoto saistvielu (cementu) 5–6 veidus. Būvniecībā izmantotās saistvielas saglabāšanās pakāpe vairāk nekā četrus tūkstošu gadu laikā ir ļoti atšķirīga, un tas ir konstatējams ne tikai dažādos saistvielu tipos, bet arī viena cementa tipā.

Analizējot kultūrvēstures pieminekļa dimensijas un formas detaļas ģeotelpiskā modeļa izstrādei, tika konstatētas vairākas būtiskas novirzes no ģeometriski pareiza un proporcionāla modeļa. Turpmākā pētījumā tika izvērtētas šīs neatbilstības un konstatēts, ka nozīmīga to daļa ir saistīta ar būves deformācijām. Tās tika konstatētas gan piramīdas fotodokumentācijā, gan arī pārbaudēs dabā. Plaisu un lūzumu diagnostika tika veikta atsevišķos fotodokumentos, lietojot tradicionālo metodiku, kādu izmanto lineāro struktūru noteikšanā tālīzpētē (Gupta, 2003).

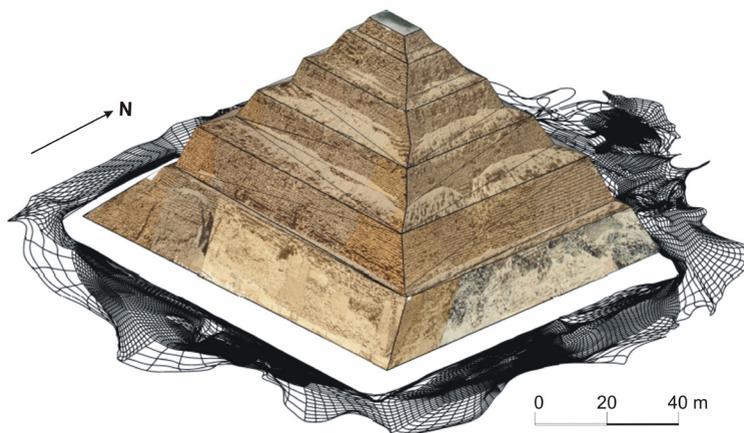
Pētījuma gaitā tika iegūtas dažādas datu kopas, kuras bija nepieciešams sistematizēt un apstrādāt. Šīs datu kopas veido fotogrāfiju datubāze, apkopotie un izstrādātie dēdēšanas katalogi, valdnieka Džosera pakāpju piramīdas ģeotelpiskais modelis, kā arī citi dati, kas nepieciešami pētījuma vajadzībām, – literatūras pētījumu rezultāti, dati par saistvielām, kas izmantotas Džosera piramīdas būvniecībā, kā arī dati par būves plaisainību un tās stabilitāti.

## 4. REZULTĀTI

Promocijas darba pētījumu gaitā tikai iegūti daudzi jauni faktiskie materiāli un dati, sekmīgi tika izstrādāti metodiskas ievirzes risinājumi, iegūtas novitātes, un ievērojamai to daļai ir lietišķa nozīme. Visi tie ir uzskatāmi par darba rezultātiem, un zemāk tie ir grupēti nevis pēc to tehniskās realizācijas secīguma, bet izceļot to savstarpējo saistību un loģisko virknējumu, kas pēc to apspriešanas ļauj nonākt pie pamatotiem secinājumiem.

### 4.1. Ģeotelpiskā modeļa izveide

Piramīdas ģeotelpiskais modelis tika veidots pēc iespējas precīzs, pamatojoties uz datiem, kurus bija iespējams iegūt par objektu ar ierobežotu pieejamību pētījumiem un dokumentācijai. Papildu apgrūtinājums ir būtiska pakāpju piramīdas pārbūve, kuras rezultātā tiek pilnībā liegta iespēja iegūt atjaunotus vai papildinātus datus. Izveidotajā piramīdas ģeotelpiskajā modelī tika iestrādāta izveidotā piramīdas fasāžu mozaīka (4.1. attēls), tādējādi veidojot pamata bāzi specifiskās informācijas slāņu integrācijai.



4.1. attēls. Piramīdas ģeotelpiskais modelis ar integrēto piramīdas fasāžu fotomozaīku

Turpmāk pētījumā izstrādātajā piramīdas 3D modelī tika integrēti specifiskās informācijas slāņi – dēdēšanas veidi un to intensitāte, kā arī būvē konstatētās plaisas un pārrāvumi.

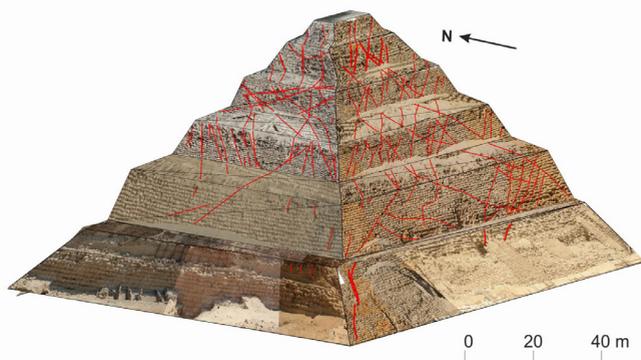
## 4.2. Pakāpju piramīdas stabilitāte

Sakāras plato teritorija ir sen zināma kā seismiski aktīva zona, kur katru gadu tiek fiksētas zemestrīces vidēji ar 4 ballu magnitūdu. Diemžēl sistemātiski seismiskās aktivitātes novērojumi šeit netiek veikti, bet seismisko staciju dati neatbilstošas kvalitātes dēļ nav iekļauti nevienā starptautiskā seismisko novērojumu tīklā.

Zemestrīču ietekme un postījumi ir visai nozīmīgi, un īpaši uzskatāmi tie ir ne tikai pazemē, bet arī Džosera piramīdas ārsienās. Veiktais Džosera piramīdas plaisu un pārrāvumu pētījums balstās uz 2006.–2011. gadā vairākkārtīgi veiktiem piramīdas fasādes augstas izšķirtspējas fotodokumenēšanas darbiem un iegūto attēlu detalizētu analīzi. Pētījumā plaisas un pārrāvumi ir konstatēti visās piramīdas fasādēs, tie ir atpazīstami visās fotodokumentācijas pētījumu sērijās vairāku gadu laikā.

Pētījumā izmantotais 3D modelis ir būtisks ieguvums un rada priekšrocības kā datu piesaistei, tā arī šo datu un rezultātu interpretācijai (Seglins, Kukela, 2012). Pašu nozīmīgāko plaisu un lūzumu analīzes rezultāts ir parādīts 4.2. attēlā.

Apzinātās plaisas un lūzumi piramīdas fasādēs ir konstatējamas, sākot ar plaisām atsevišķos būvkmens blokos un to grupās. Vairāki lūzumi ir konstatēti un pārbaudīti dabā un aptver visu piramīdas pakāpienu. Ir konstatēti tādi lūzumi, kas šķērso piramīdas fasādes lielāko daļu. Blakus apskatītajiem lūzumiem īpaši analizējami ir diagonāli vērsti lūzumi, kas konstatēti visās piramīdas fasādēs. Daudzi no tiem ir izsekojami ne tikai vairākās pakāpēs, bet arī vairāk nekā trešdaļā no fasādes platuma un norāda uz būves viendabīguma zudumu, un tas ir uzskatāms par ļoti nopietnu apdraudējumu objekta saglabāšanai nākotnē.



4.2. attēls. Noteikto lūzumu un plaisu izvietojums uz piramīdas fasādēm

3D modelis uzskatāmi parāda galvenos plaisu orientācijas virzienus un ļauj prognozēt visas būves deformācijas nākotnē. Būves atrašanās seismiski salīdzinoši aktīvā zonā tikai paaugstina riskus, kā arī norāda uz plašāku instrumentālu pētījumu nepieciešamību visā būvē.

### 4.3. Izmantoto akmens būvmateriālu kvalitātes pazīmes

Džosera piramīdas būvniecībā izmantoto akmens bloku izgatavošanas kvalitātes un bloku dēdēšanas novērtējums ļāva nodalīt jau iepriekšēji zināmos (Lauer, 1962) piramīdas izveides posmus (2.2. attēls). Šie valdnieka Džosera piramīdas būvniecības posmi turpmāk tika raksturoti pēc šādiem akmens bloku kvalitātes novērtēšanas kritērijiem: bloku izmēri (izmēru dažādība, variācijas), izvēlēta materiāla vienveidīgums, bloku virsmas apstrāde un bloku iepriekšēja apstrāde.

Veiktais piramīdas akmens bloku raksturojums pēc iepriekš minētajiem kritērijiem norāda, ka piramīdas būvniecības laikā ir sperti divi ļoti nozīmīgi soļi būvmateriālu ieguvē un izmantošanā. Vispirms tā ir pāreja no gadījuma akmeņu, kas tiek saistīti ar ļoti lielu cementa masas daudzumu, savākšanas apkārtnē būvniecības vajadzībām (M1) uz piemērota būvkmens meklējumiem tuvējā klinšainā plato nogāzē (M2). Šo pāreju visdrīzāk ierosina praktiski apsvērumi, jo apkārtējā tuksnesī Sakāras plato šo akmeņu daudzums ir visai neliels. Līdz ar to loģisks ir tuvākā cita avota meklējums plato nogāzē. Pieņēmums, ka šim vajadzībām kapeņu kompleksa apkārtnē tika ierīkots īpašs karjers, nav pamatots ar konstatējamo akmens bloku sastāvu (nav izmantots viena vai līdzīga sastāva akmens materiāls, un daļa akmens materiāla pirms iestrādes būvē ir dēdējusi, tas ir, bijusi ilgstoši pakļauta dēdēšanas procesiem).

Otrs būtisks solis ir pāreja no iepriekšējās raksturotās akmens materiāla kvalitātes (M2/M3) uz viena tipa akmens bloku iestrādi būvē (P1). To kvalitāte nav augsta, bloku izmēri atšķiras, bet iegūts ir līdzīga sastāva un līdzīgu īpašību akmens. Pastarpināti tas norāda uz ieguves centralizāciju un kalnrūpniecības attīstību, bet iegūtā materiāla līdzīgā kvalitāte – uz atbilstošu ģeoloģisko pētījumu realizāciju pirms ieguves (Kukela, Seglins, 2012d).

Kopumā, novērtējot piramīdas celtniecībā izmantoto būvmateriālu, var skaidri izšķirt dažādos būvniecības un materiālu atlasē posmus. Šo dažādo posmu vizualizācijai vislabāk noder izstrādātais piramīdas ģeotelpiskais modelis, kurš ir piemērots dažādu specifiskās informācijas slāņu attēlošanai.

#### 4.4. Izmantoto saistvielu novērtējums

Valdnieka Džosera piramidā par saistvielu ir izmantoti dažādi mākslīgi veidoti maisījumi un šo saistvielu izmantojums dažādās piramīdas daļās nav vienmērīgs un vizuāli gandrīz neatšķirams. Tādēļ pašreiz ir iespējams novērtēt tikai saistvielas dēdēšanas pakāpi, kas ir pretēja tās saglabātības pakāpei. Detalizēti pētījumi norāda, ka piramīdas būvniecības gaitā vienlaikus ir tikušas izmantotas dažāda sastāva javas, tomēr nav zināmi šādas izvēles iemesli, jo ir apzināta tikai fasādes ārējā kārtā nelielā dziļumā. Tāpat objektā nav iespējams veikt tiešus instrumentālus mērījumus un ņemt paraugus analītiskiem pētījumiem.

Visu piramīdas fasāžu fotodokumentācijas analīze ļāva noteikt plašāk izplatītos un piramīdas būvniecībā izmantotos saistvielu veidus. Visplašāk izplatītas ir divu veidu saistvielas, kuru pamatmasu vienā gadījumā veido tradicionāls kleķa materiāls no Nīlas nogulām, bet otrā – kompozītu masa no smiltīm un ģipša ar kaļķa un māla piemaisījumu. Atkarībā no komponentu proporcijām ir iespējams vizuāli diagnosticēt un arī pārbaudīt dabā vairākus šo dominējošo cementu tipu paveidus, kā arī izmantotās saistvielas daudzumu.

Kapenes pirmā mastaba tika veidota no apkārtņē savāktiem plakaniem akmeņiem, kas ir izturīgāki par kleķa ķieģeļiem. Tomēr to drošība nav pārbaudīta, noteikta nozīme ir arī būvei nepieciešamo akmeņu ierobežotam daudzumam apkārtņē. Iespējams, tieši tādēļ piramīdas pamatnē esošās mastabas būvē ir izmantots ievērojams cementa daudzums, kas vietām pārsniedz iestrādāto akmeņu daudzumu. Turpmākās būvniecības stadijās tiek apgūti jauni akmens materiāla ieguves un apstrādes paņēmieni, kas ļauj būtiski samazināt nepieciešamā cementa daudzumu. Vienlaikus tiek pilnveidota saistvielas kompozīcija, jo mainījies ir arī saistāmo būvbloku sastāvs un īpašības.

Saistvielu novērtējums ir indikators, kuru efektīvi var izmantot, pētot ne tikai būves drošību un stabilitāti, bet nosakot arī neatliekami nepieciešamos remontus. Saistvielas raksturo arī būvniecības dažādos posmus un palīdz novērtēt zināšanu pieauguma izmaiņas piramīdas būvniecības gaitā.

#### 4.5. Džosera piramīdas akmens materiāla dēdēšanas novērtējums

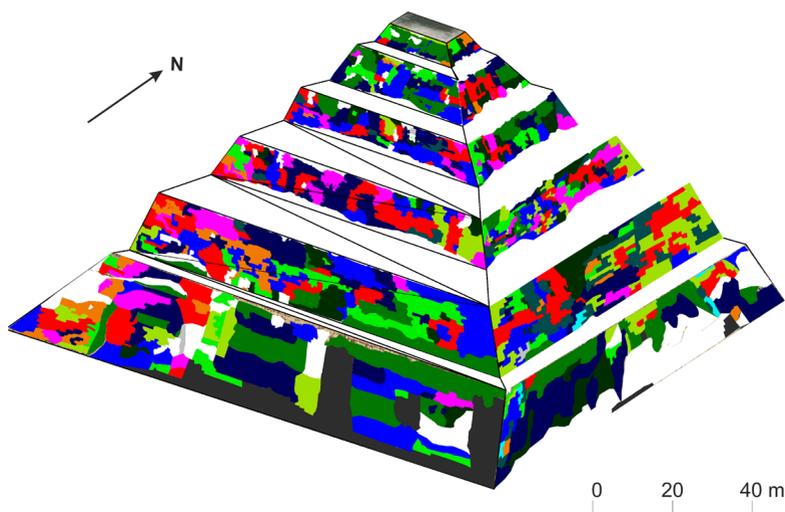
Džosera piramīda nav pieejama tiešiem pētījumiem, un tas ierobežoja metožu izvēli un iespējas instrumentāli un analītiski novērtēt daudzus raksturlielumus. Tādēļ arī šim pētījumam par pamata informācijas avotu tika izmantota vairākkārtīgi veikta piramīdas fasāžu fotodokumentēšana un iegūto datu fragmentāra pārbaude dabā, neizmantojot destruktīvas pētniecības metodes.

Dēdēšanas veidu detalizēta identifikācija tika veikta dabā pārbaudītos parauglaukumos un turpmāk manuāli interpretējot augstas izšķirtspējas fotodokumentāciju. Minētā darba veikšanai tika novērtēta katra piramīdas fasādē

eksponētā bloka virsmas saglabātība jeb bojājumi, kurus izraisījusi dēdēšana. Papildus tika novērtēti arī būvblokus saistošā cementa veidi un to saglabātība (Kukela, Seglins, 2012a).

Pētījuma vajadzībām tika izstrādāts Džosera piramīdas bloku virsmas dēdēšanas piemēru katalogs, kurš aptver vairākus dēdēšanas veidus (noapaļošana, virsmas noslāņošanās un akmens materiāla zudums), un katram no tiem ir noteiktas 5 dēdēšanas izpausmes intensitātes (Kukela, Segliņš, 2012c).

Atspoguļojot konstatētos dēdēšanas veidus un intensitātes 3D ģeotelpiskajā modelī, secināms, ka šo kategoriju izvietojums piramīdas fasādēs veido sarežģītu attēlu un nepastāv kāds dēdēšanas veids vai tā intensitāte, kas būtu raksturīga tikai vienai atsevišķai fasādei vai kādai tās noteiktai daļai (4.3. attēls). Turpretī ļoti izteiktas ir maksimālās dēdēšanas intensitātes piramīdas fasāžu malās, stūros, kā arī iepriekš aprakstīto lūzumu un plaisu zonā tuvumā ar maksimumiem šādu lūzumu krustošanās gadījumos.



Dēdēšanas veidi	Intensitāte 0	Intensitāte 1	Intensitāte 2	Intensitāte 3	Intensitāte 4
Noapaļošanas (N)	White	Light Blue	Dark Blue	Medium Blue	Dark Blue
Virsmas noslāņošanās (V)	White	Orange	Red	Purple	Brown
Akmens materiāla zudums (Z)	White	Green	Light Green	Dark Green	Black

4.3. attēls. Džosera piramīdas fasādēs konstatēto dēdēšanas veidu un intensitātes atspoguļojums piramīdas 3D modeli.

Baltā krāsā atspoguļots nobiru slānis un neinterpretējamie laukumi.

Iegūto datu vienkāršota statistiska analīze ļauj atpazīt arī vairākas citas likumsakarības. Kopējā dēdēšanas skartā fasāžu platība ir visai atšķirīga. Tā, piemēram, dienvidu fasādē tādi dēdēšanas veidi kā būvakmens eksponētās virsmas noslāņošanās un materiāla zudums ir skāruši 49,78% (1709,7 m<sup>2</sup>) virsmas, bet blakus esošā austrumu fasādē – 50,36% (1213,30 m<sup>2</sup>), rietumu fasādē – 39,96% (1145,74 m<sup>2</sup>) un ziemeļu fasādē – 58,69% (1893,77 m<sup>2</sup>) virsmas. Savukārt visai izplatītā bloku noapaļošanās ir salīdzinoši konstants lielums, kas visā piramīdas fasāžu virsmas laukumā mainās 25–33% robežās un kā atsevišķs dēdēšanas veids nav nozīmīgs turpmākai analīzei.

Pētījumā iegūtie dati norāda, ka kopumā dominē dēdēšanas 2. un 3. intensitāte, un tas raksturo seno būvnieku augstās zināšanas materiālu izvēlē. Izņēmums ir austrumu fasāde, kur dēdēšanas 4. intensitāte ir sasniegusi 27% no visas fasādes virsmas. Tā ir fasāde, kurā atspoguļojas piramīdas būvniecības senākie posmi.

Konstatētais dēdēšanas intensitātes sadalījums norāda uz sarežģītām likumsakarībām, kas galvenokārt izriet no būvniecībā izmantotā akmens materiāla kvalitātes. Analizētie dēdēšanas veidu un intensitātes sadalījuma dati skaidri norāda uz piramīdas fasādēs eksponētiem dažādiem būvniecības posmiem, ko apstiprina arī izmantotā cementa kvalitātes atšķirības.

## 5. DISKUSIJA

Līdzšinēji zināmie novērojumi, dokumenti, arheoloģiskie atradumi un vēsturiskās liecības, kā arī autores veiktie pētījumu rezultāti nesniedz kādus apstiprinājumus tam, ka ģeoloģiskās zināšanas tika pārņemtas no citām civilizācijām. Senākās akmens būves Senajā Ēģiptē ir saistītas ar mirušo kultu un valdnieku kapenēm (Shafer, 1997). Šādu sakrālo būvju izveide balstās uz daudzu gadu simtu senām tradīcijām, kā arī ļoti savdabīgo reliģisko kultu praksi Senās valsts laikā Ēģiptē, kad jaunievedumi tiek ieviesti ļoti pakāpeniski un nav zināmi gadījumi par svešu kultūru ietekmi uz tiem (Kamil, 1998, Arnold, 1999).

Konkrētu analītisku pētījumu datu par valdnieka Džosera piramīdas būvniecībā izmantoto akmens materiālu nav daudz. Pirmo plašāko ieskatu sniedz D. un R. Klemmu pētījums (publicēts 2010. gadā) par būvakmeni, kas izmantots Senās Ēģiptes piramīdu būvniecībā (Klemm, Klemm, 2010). Šajā pētījumā ir sniegts piramīdā izmantoto 67 kaļķakmens paraugu petrogrāfiskais apraksts un realizēta šo paraugu plazmas spektroskopiskā analīze. Diemžēl nav zināmas šo paraugu noņemšanas vietas un iegūto analīžu konkrētie rezultāti, bet ir interpretētas tikai proporcijas Mg/Fe, Mg/Sr, Fe/Mn, kas ļauj autoriem secināt, ka būvniecībā izmantots vietējās izcelsmes materiāls no Sakāras plato.

Autores veiktais pētījums apstiprina iepriekšējo pētnieku minētos piramīdas būvniecības posmus un skaidri norāda arī uz izmantotā būvakmens atšķirīgo kvalitāti (Kukela, Seglins, 2012d). Piramīdas būvniecības veids nepārprotami norāda uz būvakmens vietējo izcelsmi, ko apstiprina D. un R. Klemmu (2010) pētījums, un izceļ materiāla kvalitātes atšķirības. Tātad seno būvnieku zināšanas par materiāliem un ģeoloģiskiem apstākļiem bija mainījušās, un tas ļāva būvniecības gaitā būtiski paaugstināt prasības, izvēloties akmens materiālu.

Iepriekš norādītās nepilnības un ierobežojumi būtiski veicināja autora oriģinālos pētījumus par piramīdas fasādēs eksponēto būvbloku virsmu bojājumu un dēdējumu novērtēšanu. Līdzīgas metodes savulaik tika lietotas Gīzas plato valdnieka Hufu piramīdas dienvidu fasādes neliela fragmenta dēdēšanas veidu un to intensitātes novērtēšanā, ieskaitot instrumentālus mehāniskās izturības mērījumus, kas tika papildināti ar izmantoto būvakmens paraugu petrogrāfiskām un ķīmiskām analīzēm (Fitzner et al., 2002). Šis izvērsta pētījums veido nozīmīgu daļu B. Ficnera un līdzautoru (2002) izstrādātā dēdēšanas pazīmju klasifikatorā, kas paredzēts izmantošanai kultūrvēstures pieminekļu izpētē. Diemžēl iegūtā klasifikācija ir izmantojama tikai ar izvērstiem instrumentāliem un laboratoriskiem pētījumiem un tāpēc ir ārkārtīgi darbietilpīga un dārga, kā arī nerealizējama objektos ar ierobežotu pieejamību.

Promocijas darbā veiktie pētījumi liecina (Kukela, Seglins, 2011a), ka attiecībā uz pētītajiem Senās valsts pieminekļiem, kas atrodas Sakāras un Gīzas

plato, pastāv iespēja šo pieeju būtiski uzlabot, loģiskā secībā sakārtojot dēdēšanas pazīmes un intensitāti, kā arī ierobežojot pazīmju un kategoriju skaitu tiktāl, ciktāl to diagnostikai nav nepieciešams destruktīvu metožu lietojums. Svarīgi atzīmēt, ka lauku pētījumu un datu apstrādes posmā tika panākta izstrādāto dēdēšanas kategoriju un pazīmju augsta korelācija ar B. Ficnera instrumentālo pētījumu rezultātiem divos detalizēti pētītajos parauglaukumos. Tas ļāva pierādīt saistību starp divu pētāmo parametru kopu vērtībām, kas noteiktas ar divām dažādām metodēm – empīrisko (uz fotodokumentācijas analīzi balstīto) un instrumentālo metodi (B. Ficnera pētījumi). Tas nozīmē, ka B. Ficnera eksperimenta mērījumu rezultāti un detalizētu fotodokumentācijas analītisko novērtējumu dati adekvāti raksturo nosakāmā parametra skaitlisko vērtību un šī parametra variēšanu, kas šādus datus ļauj ar statistiski noteiktu ticamības pakāpi izmantot dažādiem akmens pieminekļu saglabāšanas un restaurācijas projektu aprēķiniem Ēģiptē un teritorijās ar līdzīgiem fiziogēogrāfiskiem apstākļiem. Savukārt promocijas darbā iepriekš apskatītā metodika sniedza ļoti svarīgu informāciju par valdnieka Džosera piramīdas pēdējā izbūves posmā izmantotā būvkmens kvalitāti un būtiskām šīs kvalitātes izmaiņām pat vienas būvniecības stadijas laikā.

Nemot vērā valdnieka Džosera piramīdas un kapeņu kompleksa statusu, kā arī Ēģiptes valdības noteiktos ierobežojumus, mūsu pētījuma laikā nebija iespējams ne ievākt būvkmens un dabisko atsegumu paraugus, ne arī izvest tos no valsts detalizēto ģeoloģisko pētījumu vietām. Tādēļ pētījums tika veidots un organizēts, balstoties uz nedestruktīvām metodēm un to attīstību pētījuma gaitā.

Veiktais pētījums norāda, ka, attīstot detalizētu pieminekļu augstas izšķirtspējas fotodokumentēšanu, šo dokumentu piesaisti ģeotelpiskā modeli un būvkmens eksponētās virsmas bojājumu un dēdēšanas novērtēšanas metodiku, ir iespējams iegūt ļoti augstvērtīgus materiālus, kas ļauj izdarīt secinājumus par izmantotā akmens materiāla kvalitāti. Šāda pieeja ļāva detalizētāk raksturot jau iepriekš nodalītos piramīdas būvniecības posmus un izvērsti vērtēt jaunākajā būvniecības posmā izmantotā akmens materiāla kvalitāti. Tas ir ļoti vērtīgs faktiskais materiāls būves saglabāšanas un rekonstrukcijas projektu izstrādei.

Valdnieka Džosera piramīdas būvniecības gaitā izmantotās saistvielas līdz šim ir raksturotas ļoti vienkāršoti, vien atzīmējot, ka tās ir lietotas, tām ir sulfātcementa sastāvs, bet detalizēti pētījumu rezultāti līdz šim nav bijuši publicēti. Vairums pētnieku norāda uz saistvielu līdzību visām piramīdām, kas būvētas Senās valsts laikā, bet ķīmiskā sastāva analīzes ir veiktas tikai dažiem paraugiem (Lucas, 1948; Salmoni, 1933). Promocijas darba autore pētījums liecina, ka piramīdas būvniecības gaitā ir izmantotas dažāda sastāva saistvielas (Kukela, Seglins, 2012a), tās ir pilnveidotas, tās atšķiras savā starpā un secīgi raksturo piramīdas izveides galvenos posmus. Pierādīts, ka saistvielu sastāva (kompozīcijas) atšķirības ir tieši korelatīvas ar fotodokumentācijā

diagnosticējamām cementa dēdēšanas un zuduma pazīmēm. Līdz ar to varēja izstrādāt cementa materiāla dēdēšanas pazīmju klasifikatoru konkrētam piemiņeklīm (Kukela, Seglins, 2012a) un iegūtie rezultāti ļauj cerēt, ka, to pilnveidojot, var tik attīstīta pietiekami jutīga un augsti efektīva piemiņekļu saglabātības novērtēšanas metodika.

Iepriekš teiktais attiecas galvenokārt tikai uz pētījuma galvenā objekta – valdnieka Džosera piramīdas – detalizētu izpēti. Šajā gadījumā izvēlētais objekts ir bijis ļoti piemērots, jo ļāva detalizēti izsekot piramīdas būvētāju prasmju un zināšanu izmaiņām. Vēlāk izbūvēto Senās valsts piramīdu veidošanai izmantotā būvmateriālu kvalitāte un saistvielas mainās ievērojami mazāk un kopumā atspoguļo to zināšanu kopumu, kas tika iegūts jau Džosera piramīdas izveides gaitā.

Kopumā pētījuma rezultāti ļauj izsekot, kā Senās valsts laikā notika ģeoloģisko zināšanu uzkrāšana un kā paplašinājās izmantošanas loks. Tomēr joprojām nezināmu iemeslu dēļ Senās valsts laikā ļoti vāji tiek apzināti eksogēnie ģeoloģiskie, tajā skaitā erozijas un sedimentācijas, procesi. Atzīmējamas arī vājās zināšanas par gruntīm un to īpašībām, jo būvlaukumu iepriekšējā sagatavošana un atbrīvošana no augšējā mainīgā sastāva grunts slāņa Sakāras un Gīzas nekropoles būvēs tiek ieviesta tikai Senās valsts noslēguma posmā (Kukela, Seglins, 2011b).

Veiktais pētījums norāda, ka ģeoloģiskās zināšanas Senās valsts laikā ir nozīmīgi palielinājušās, tomēr nav pamata tās pārspilēt. Kopumā tās drīzāk būtu saucamas par augstām profesionālām prasmēm, pieredzi un zināšanām, kas tika nodotas no paaudzes uz paaudzi. Tas ir tradicionāls zināšanu pārneses veids, kas zināms ne tikai Senajā Ēģiptē, bet ļoti daudzos pasaules reģionos arī mūsdienās (Nicholson, Shaw, 2009). Savukārt Džosera piramīdas izveides posmu analīze norāda, ka pieaugošās ģeoloģiskās zināšanas un iespējas izvēlēties noteiktas kvalitātes būvakmeni ir veicinājušas būves vairākkārtīgu pārbūvi, līdz tā ieguvusi mūsdienās zināmo izskatu.

## SECINĀJUMI

Džosera piramīdas būvniecībā izmantotie materiāli un to kvalitāte norāda uz ģeoloģisko zināšanu par būvmateriālu dabiskām izejvielām pakāpenisku pieaugumu būvniecības gaitā. Tās ir iepriekšējos vēsturiskos periodos uzkrātās zināšanas un prasmes, kas Senās valsts laikā tiek pielāgotas un attīstītas akmens materiāla piegādēm lielāko sakrālo būvju vajadzībām.

Novērtējot piramīdas ģeotelpiskajā modelī attēloto dēdēšanu pēc maksimālās tās izpausmes intensitātes, tika konstatēts, ka 1., 2., 5. un 6. piramīdas pakāpes ir veidotas no līdzīgas kvalitātes materiāla. Dominējošs dēdēšanas veids ir akmens bloku noapaļošana un akmens materiāla zudums. Piramīdas 3. un 4. pakāpes celtniecībā izmantotais materiāls ir atšķirīgs – šeit dēdēšanas veidi un to intensitātes ir ļoti dažādas un skar nelielus fasādes laukumus.

Lielāka dēdēšanas intensitāte ir plaisu blīvuma zonās. To analīze norāda, ka piramīdas pakāpju centrālajā daļā ir izmantots zemākas kvalitātes akmens materiāls, bet pakāpju sānu malās – augstākas kvalitātes materiāls.

Būtiska nozīme ir akmens būvbloku cementējošai vielai. Veiktais pētījums norāda, ka saistvielas sastāva kvalitatīvi un daudzskaitliski analītiskie pētījumi ir uzskatāmi par vienu no prioritātēm piramīdas turpmākajā izpētē.

Veiktais pētījums pirmo reizi piedāvā Džosera piramīdas mūsdienīgu ģeotelpisko modeli, kas ļauj atsevišķo akmens materiālu pētījumu rezultātus atspoguļot telpiski. Šādi sagatavotie informācijas slāņi ļauj izdarīt būtiskus secinājumus par izmantotā būvakmens kvalitāti un apzināt piramīdas fasāžu bojājumus.

Daudzus gadus ilgušā pētījumā iegūtie rezultāti ir tikai neliela daļa no tās informācijas, kas vēl apgūstama ļoti aktuālajā seno pieminekļu bojājumu veidošanās mehānisma izziņāšanas un šo procesu prognožu jomā, kā arī citu nedestruktīvu seno pieminekļu pašreizējā stāvokļa novērtēšanas metožu attīstībā. Tas nepārprotami liecina par to, ka šajā virzienā pētījumi ir jāturpina arī nākotnē.

## PATEICĪBAS

Promocijas darbs izstrādāts ar ESF projekta „Atbalsts doktora studijām Latvijas Universitātē”, Nr. 2009/0138/1DP/1.1.2.1.2/09/IPIA/VIAA/004, LU reģistrācijas Nr. ESS2009/77, finansiālu atbalstu. Lielu ieguldījumu darba tapšanā, kā arī metodiskās konsultācijas un rekomendācijas sniedza šī pētījuma zinātniskais vadītājs ģeoloģijas doktors un Latvijas Universitātes profesors Valdis Segliņš.

Metodiskās konsultācijas un atbalstu lauku darbu plānošanā, kā arī eksperimentu veikšanā sniedza Latvijas zinātniskās ekspedīcijas (Ēģiptē) vadītājs *Dr. arh.* Bruno Delāns, *Dr. sc. ing.* Jānis Klētnieks, *Dr. sc. ing.* Māris Kaļinka, Francijas arheoloģiskās misijas Bubasteonā (Ēģiptē) vadītājs *Dr.* Alans Zivī, kā arī Latvijas Nacionālā mākslas muzeja Ārzemju mākslas departamenta vadītāja Daiga Upeniece un kolekcijas glabātāja Baiba Uburģe. Tāpat autore pateicas SIA „Mikrokods” darbiniekiem Baibai Ziemelei un Oto Luksam.

## PUBLIKĀCIJU SARAKSTS

### Raksti starptautiskajos izdevumos un kolektīvajās monogrāfijās

- Kukela, A., Segliņš, V., 2012. Džosera piramīdas akmens materiāla dēdēšanas nedestruktīva novērtēšana. No: *Latvijas Universitātes Raksti*, 789 sēj. Rīga: LU Akadēmiskais apgāds, 105.–116. lpp.
- Kukela A., Seglins V., 2012. Application of Building Stone in the Old Kingdom of Ancient Egypt as an Indicator of Changes in Knowledge. *Scientific Journal of Riga Technical University*. 1. series, Material Science and Applied Chemistry, Vol. 25 (2012), p. 31–36.
- Seglins, V., Kukela, A., 2012. Damage assessment and 3D visualization: an example of the Step Pyramid, Egypt. In: *Proceedings of the International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference Surveying Geology & mining Ecology Management*. SGEM2012, Bulgaria, p. 1005–1011.
- Kukela, A., Seglins, V., 2012. Assessment of weathering of construction blocks and mortar in historical monuments. *Journal of Earth Sciences and Engineering*, Vol. 2, Number 4 (2012). David Publishing, USA, p. 235–240.
- Kukela, A., Seglins, V., 2012. Cultural heritage between environmental conditions and human impact, example of Egypt. In: *Proceedings of the Liepaja University 14th International Scientific conference "Society and Culture: frontiers and new horizons"*. Liepaja, p. 112–121.
- Kukela, A., Seglins, V., 2011. Znanija o ņdrah i ih kachestve v rechnom basseine reki Nil na primere Drevnego Egipta. In: *Proceedings of the International scientific and applied conference „Resources and ecologic problems of Volga basin"*. Vladimir, Russia, p. 72–75.
- Kukela, A., Seglins, V., 2011. Stone material deterioration studies in world heritage sites for evaluation of conservation strategy. In: *Proceedings of the 7th International conference "Geology at School and University: GEOLOGY and CIVILIZATION"*, Vol. I. Saint-Petersburg, Russia, p. 142–149.
- Kukela, A., Seglins, V., 2011. Simplified Method of Assessment of Weathering on Historical Stone Monuments: An Example of El-Merdani Mosque, Cairo, Egypt. *Journal of Earth Sciences and Engineering*, Vol. 1, Number 2 (2011). David Publishing, USA, p. 82–90.
- Kukela, A., Seglins, V., 2011. Study of the historical monuments: from the photography to the digital spatial model. In: *Proceedings of the 53rd International Scientific conference of Daugavpils University*, [CD-ROM].
- Seglins, V., Kukela, A., Kalinka, M., 2011. Geovizualization of stone material weathering data for geoarchaeological studies. In: *Proceedings of the International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference Surveying Geology & mining Ecology Management*. Vol. II. SGEM2011, Bulgaria, p. 401–407.
- Kukela, A., Seglins, V., 2011. The development and planning of settlements in Ancient Egypt. In: *Proceedings of the 52<sup>nd</sup> International Scientific conference of Daugavpils University. Reports on Research*. Saule, p. 66–73.
- Kukela, A., Seglins, V., 2010. Artefacts and geo-environmental data inventory in the Step Pyramid and its management through Geographical Information System (GIS). In: *The International conference "Achievements and Problems of Modern Egyptology" Conference proceedings*. Moscow, Russia, p. 185–195.

### Starptautisko konferenču un semināru referātu tēzes

- Kukela, A., Seglins, V., 2011. Application of building stone in the Old Kingdom in Ancient Egypt as an indicator of changes in knowledge. In: *Book of abstracts of the 52nd International Scientific conference of Riga Technical University, October 13–15, 2011*, RTU, Riga, Latvia, p. 79.
- Kukela, A., Segliņš, V., 2011. Assessment of weathering of construction blocks and mortar in historical monuments. In: *Book of abstracts of the 5th Baltic Conference on Silicate Materials "Balt silica 2011", May 23–25, 2011*, Riga, Latvia, p. 44–45.
- Kukela, A., Seglins, V., 2011. From photography to geospatial model in geoarchaeological studies. In: *Abstracts of the 2nd Students' International Geological Conference, April 28 – May 01, 2011*, Ratnieki, Latvia, p. 14.
- Kukela, A., Seglins, V., 2011. Study of the historical monuments: from the photography to the digital spatial model. In: *Abstracts of the 53rd International Scientific conference of Daugavpils University, April 13–15, 2011*, Daugavpils, Latvia, p. 170–171.
- Kukela, A., Seglins, V., 2010. The development and planning of settlements in Ancient Egypt. In: *Abstracts of the 52nd International Scientific conference of Daugavpils University, April 14–16, 2010*, Daugavpils, Latvia, p. 211.
- Kukela, A., Seglins, V., 2009. Artefacts and geo-environmental data inventory in the Step Pyramid and its management through Geographical Information System (GIS). In: *Abstracts of the International conference "Achievements and Problems of Modern Egyptology", September 29 – October 4, 2009*, Moscow, Russia, p. 18–19.
- Kukela, A., Seglins, V., 2009. Ceramic artefacts and geo-environmental data inventory in the Step Pyramid and its management through Geographical Information System (GIS). In: *Abstracts of the International conference "Clays, Clay minerals and layered materials – CMLM2009", September 21–25, 2009*, Zvenigorod, Russia, p. 285–286.
- Kukela, A., 2008. Archaeological inventory in the Step Pyramid and its management through Geographical Information System (GIS). In: *Abstracts and programme of the 23rd International Baltic Conference on the History of Science, October 9–10, 2008*, Riga, Latvia, p. 39.

### Konferenču un semināru referātu tēzes Latvijā

- Kukela, A., Segliņš, V., 2012. Unis piramīdas fasāžu akmens materiāla dēdēšanas netieša novērtēšana. No: *Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Vides zinātne. LU 70. zinātniskās konferences referātu tēzes*. Rīga: LU Akadēmiskais apgāds, 187.–189. lpp.
- Kukela, A., Segliņš, V., 2011. Hufu un Unis piramīdu akmens materiāla dēdēšanas veidu salīdzinošs novērtējums. No: *Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Vides zinātne. LU 69. zinātniskās konferences referātu tēzes*. Rīga: LU Akadēmiskais apgāds, 320.–323. lpp.
- Kukela, A., Segliņš, V., 2010. Sabiedriskās telpas plānošana Ēģiptē Senās valsts sākuma posmā. No: *Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Vides zinātne. LU 68. zinātniskās konferences referātu tēzes*. Rīga: LU Akadēmiskais apgāds, 145.–146. lpp.
- Kukela, A., Segliņš, V., 2010. Būvakmens Senās valsts sakrālās būvēs Ēģiptē. No: *Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Vides zinātne. LU 68. zinātniskās konferences referātu tēzes*. Rīga: LU Akadēmiskais apgāds, 317.–318. lpp.
- Kukela, A., Segliņš, V., 2009. Džosera piramīdas dažādos būvniecības posmos izmantotā akmens materiāla novērtēšana. No: *Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Vides zinātne. LU 67. zinātniskās konferences referātu tēzes*. Rīga: LU Akadēmiskais apgāds, 209. lpp.



UNIVERSITY OF LATVIA  
DEPARTMENT OF GEOGRAPHY AND EARTH SCIENCES



Agnese Kukela

# **THE DEVELOPMENT OF GEOLOGICAL KNOWLEDGE IN THE OLD KINGDOM OF ANCIENT EGYPT**

Summary of Doctoral Thesis

In partial Fulfilment of the Requirements  
of the Doctoral Degree in Geology  
Subdiscipline of Applied Geology

Riga, 2012

The doctoral thesis was carried out at the Chair of Applied geology, department of Geography and Earth sciences, University of Latvia from 2008 to 2012.



Eiropas Savienība



LATVIJAS  
UNIVERSITĀTE  
ANNO 1919

## IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

The Promotion thesis has been supported by the European Social Fund within the project «Support for Doctoral Studies at the University of Latvia» (Nr. 2009/0138/IDP/1.1.2.1.2/09/IPIA/VIAA/004) of the University of Latvia.

The thesis contains the introduction, 6 chapters, and reference list.  
Form of the thesis: dissertation in geology, sub discipline of applied geology

Supervisor: *Dr. geol.*, Professor, **Valdis Segliņš**

Reviewers:

**Ģirts Stinkulis**, Assoc. Professor, *Dr. geol.*, University of Latvia

**Juris Soms**, doc., *Dr. geol.*, University of Daugavpils

**Ojārs Spārītis**, Professor, *Dr. habil. art.*, Art Academy of Latvia

Doctoral Committee:

**Vitālijs Zelčs**, Professor, *Dr. geol.* – council chairman

**Ervīns Lukševičs**, Professor, *Dr. geol.* – deputy chairman

**Aija Dēliņa**, Docent, *Dr. geol.*

**Laimdota Kalniņa**, Assoc. Professor, *Dr. geogr.*

**Valdis Segliņš**, Professor, *Dr. geol.*

**Ivars Zupiņš**, *Dr. geol.*

Secretary: **Ģirts Stinkulis**, Assoc. Professor, *Dr. geol.*

The thesis will be defended at the public session of the Doctoral Committee of Geology, University of Latvia, at 10:00am on December 14, 2012, Alberta street 10, *Rīga*.

The thesis is available at the Library of the University of Latvia at Kalpaka blvd. 4.

This thesis is accepted for the commencement of the degree of Doctor of geology on October 4, 2012, Protocol No.01/2012, by the Doctoral Committee of Geology, University of Latvia.

Address for submission of comments:

Dr. **Ģirts Stinkulis**, Department of Geology, University of Latvia, Raiņa Blvd. 19, LV-1586, Riga. Fax: +371 67332704, e-mail: [Girts.Stinkulis@lu.lv](mailto:Girts.Stinkulis@lu.lv)

© University of Latvia, 2012

© Agnese Kukela, 2012

ISBN 978-9984-45-604-1

# CONTENTS

Abstract .....	34
Topicality of the study .....	35
The aim and main objectives of the study .....	35
Scientific novelty of the study .....	36
Approbation of the study results .....	36
1. The Review of previous geological studies of egypt .....	37
1.1. Geological structure of Egypt .....	37
1.2. Previous concept about resources and geological knowledge in Ancient Egypt .....	38
2. The territory of the study .....	40
2.1. Saqqara plateau geological structure .....	40
2.2. Characteristics of the study object .....	41
3. Materials and methods .....	43
3.1. The photo documentation of the pyramid and creation of geo-spatial model .....	43
3.2. The assessment of stone block surface weathering .....	43
3.3. Studies of the facades of the Step Pyramid .....	45
4. Results .....	46
4.1. Development of geospatial model .....	46
4.2. The stability of the Step Pyramid .....	47
4.3. Characteristic features of the stone material .....	48
4.4. The assessment of mortar used in the pyramid .....	49
4.5. Assessment of weathering of the stone material at the Pyramid of Djoser .....	49
5. Discussion .....	52
Conclusions .....	55
Acknowledgments .....	56
List of publications .....	57
References .....	59

## ABSTRACT

The doctoral thesis is dedicated to the analysis of development of geological knowledge in the Old Kingdom of Ancient Egypt, at the period when first stone cult buildings are being built, including the Step Pyramid of Djoser. This pyramid was built in several construction stages that differ significantly in the quality of stone material and mortar used. These differences characterize the development of knowledge regarding the extraction of natural raw materials and numerous technological innovations.

The results of the study allow to conclude that during this historical period in comparatively short time skills and knowledge of individual craftsmen were gradually accumulated and resulted in construction of the greatest stone monument of that time. This building indicates a high level of state administration's centralization, multilevel organization and management of work in a large scale project, including research and extraction of all necessary raw materials and their processing for particular construction needs. Systematic analysis of ancient monuments and high degree of detailed elaboration allow us to apply this evidence as an indicator to evaluate changes and development of geological knowledge in Ancient Egypt.

**Keywords:** geology of Egypt, Old Kingdom, construction materials, assessment of weathering, 3D models, geological knowledge.

---

## **Topicality of the study**

The geological knowledge and its development during the Old Kingdom of Ancient Egypt are emphasized not only in the title of the thesis, but also in the work itself, aiming to prove the necessity of a customised approach to the studies of ancient monuments in the specific physiogeographical conditions in Egypt, requiring assiduous research. The provenance and quality of the stone materials used in the Old Kingdom is a subject for intensive studies of many scholars and this fact defines the topicality and modernity of this research.

It is a well-known fact that initial conditions and present state of preservation of the stone material is linked to the properties of natural rocks, their physical and chemical properties, as well as several other factors. The interaction of these factors defines changes and preservation of the building materials and mortar (Kukela, Seglins, 2012a; Klemm, Klemm, 2010). These changes differ from the properties of rock in natural bedding and on the exposed outcrops of the Saqqara plateau. The method of acquiring parameters to evaluate the quality of building materials elaborated in this study is necessary for the development of restoration and preservation plans for historical stone monuments.

## **The aim and main objectives of the study**

At the beginning of the study several hypotheses have been proposed. According to these hypotheses during the Old Kingdom of Ancient Egypt there have been different possibilities of attaining geological knowledge enabling the inception of large stone monument construction. The first hypothesis proposed that the knowledge was imported from other highly developed cultures. The alternative hypothesis proposed the idea of gradual accumulation and development of local knowledge. The objectives of this study were set, accordingly, for verification of these two hypotheses.

The aim of the study is to appraise and verify both formulated hypotheses regarding the development of geological knowledge during the Old Kingdom of Ancient Egypt.

In order to achieve the aim, all available elaborations of theoretical methods, scientific literature, technical reports, proceedings of conferences and seminars were evaluated and analysed.

The main objective of the study is to aggregate and analyse information and extensive factual material, identifying and excluding erroneous data potentially affecting credibility of the final results of the study. Additionally, it has been necessary to find a correct methodological solution that would allow us to obtain verifiable and repetitive data at the objects of limited accessibility.

The implementation of aforementioned objectives encompasses the study of historical context and detailed exploration of several monuments of cultural heritage thus enabling us to analyse and evaluate geological knowledge regarding construction materials and their quality, as well as appraise an option of applying the methodology developed in similar studies in this region.

### **Scientific novelty of the study**

In this doctoral thesis for the first time systematic analysis of the data obtained in a remote manner was analysed and verified in situ, identifying the regularities, appraising conditions and factors affecting the results.

This research focused, especially, on the geological and physiogeographical conditions of Egypt, allowing to assess the particularities of raw materials used in the construction of the monuments.

For analysing the results a versatile and complex approach was applied. The photo documentation in high definition was used to analyse the state of preservation of the exposed surfaces of the stone blocks, verifying the results obtained in situ thus demonstrating the novelty of this approach.

To verify the results obtained the innovative method of assessment of construction block damages was applied. This method was based on instrumental measurements and adjusted for application in the objects of limited accessibility.

This study is the first of its kind in Latvia, and the results obtained are only a minor part of the whole scope of information necessary to analyse in the field of the history of the Old Kingdom. Thus it denotes the necessity to continue such studies in the future.

### **Approbation of the study results**

The results of this thesis are published in 12 scientific papers, 6 of which have been published in peer reviewed journals and monographs, 8 publications contain international conference and seminar theses and 5 reports were published in scientific conferences and seminars in Latvia. At the international congresses and conferences 10 papers were presented and 6 papers presented at the conferences and seminars in Latvia. The materials published fully cover the results obtained in this study and emerge from the objectives of this doctoral thesis.

As an additional aspect the issues regarding the diagnostics of the stone material damage and interpretation of the results were analysed. The interpretation and presentation of the results were approbated in various geoarchaeological studies in Latvia, as well as in other European countries.

---

# 1. THE REVIEW OF PREVIOUS GEOLOGICAL STUDIES OF EGYPT

Up to the end of the 19<sup>th</sup> century the research of the territory of Egypt was mainly conducted by individual naturalists and travellers, and by commissioned scientists. During Napoleon's expedition first systematic geological and mineralogical studies of Northern Egypt were undertaken. The rocks used in the construction of the pyramids and temples of Ancient Egypt were recognised and identified for the first time.

Systematic geological studies of the Arab Republic of Egypt begun in 1896, when the Geological Survey of Egypt was established. In 1912 the first geological maps M 1 : 1 000 000 were published. These maps contained general geological information on the main rock lithotypes. In 1981 geological maps of Egypt M 1 : 2 000 000 were published and up to date these maps are the most accurate ones and are based on the field observations and laboratory analysis of samples.

In comparison to other countries of Africa, the geology of Egypt's territory is not so particularly explored. Therefore in archaeological and geoarchaeological studies the maps from English Colonial period are used. Especially it concerns the areas of the Nile Valley up to the period of New Kingdom of Ancient Egypt.

## 1.1. Geological structure of Egypt

The Arab Republic of Egypt is situated in the north-eastern corner of the African continent and extends beyond the Gulf of Suez and the Suez Canal into the Asian Near East. Egypt is a part of North African Shield which during its geological history underwent periodic transgressions. There are three plates for the northernmost area of Africa – the Nubian plate, the Arabian plate and the Sinai plate. The relative motion of these plates led to the opening of the Red Sea, the Gulf of Aqaba and, in part, of the Gulf of Suez. Overall this is a seismically active area where earthquakes with magnitude above 5.0 happen regularly.

The sedimentary cover overlying Precambrian basement accounts for about 90% of Egypt's surface. The sequence embraces almost all stratigraphic stages and ranges from Early Palaeozoic to Quaternary. Palaeozoic era is characterized by a prevalence of continental clastic deposits. This period ends with the Upper Carboniferous – Lower Permian marine deposition that followed the Hercynian orogenic phase and subsequent erosional period.

The Mesozoic begins with continental deposition predominantly. Jurassic deposits, mainly continental, cover parts of the western side of the Gulf of Suez, northern Sinai and large areas of the Western Desert. The Cretaceous sedimentary section is represented by the Nubian sandstone of continental and

marine origin. The Late Cretaceous series are represented by a variety of marine facies with a pronounced phosphatic development along the rims of the local depocentres and basinal facies, as well as dolomitic sandstones and biomicrites along the rims of the basins in the northern Egypt.

Palaeocene – Eocene formations were deposited over large areas of Egypt up to the border of Sudan. Oligocene time is characterised by general uplift that affected most of the area of Egypt with concurrent deposition of coarse continental clastics over eroded surfaces and structural lows, that prevailed mostly in southern Egypt.

Late Miocene and Pliocene represent the final phase of Egypt's depositional history. Crustal movements continued from Late Miocene into Early Pliocene and then were substituted by renewed and short lived transgressional period which affected the relatively narrow coastal area of northern Egypt, Gulf of Suez and the Red Sea. The Nile River finally followed its present course and built up its huge delta, protruding over the step-faulted hinge line into the Mediterranean (Schlumberger, 1984; Said, 1990).

## **1.2. Previous concept about resources and geological knowledge in Ancient Egypt**

Since antiquity times most of the population of Egypt inhabited the Nile Valley only (about 0.5% of the whole territory of the country). On this territory more than 95% of inhabitants were concentrated.

During the Roman Empire the number of inhabitants of Egypt reached approximately 18 million. The dependence on accessibility of natural resources outside the borders of the Nile Valley was always a pending matter. Limitation of natural resources and the large number of inhabitants have been the factors accelerating the development of exploration and investigation of natural resources since the most ancient times.

In Ancient Egypt water was always a critical resource and its availability defined density of population. Already at the birth of Ancient Egyptian state the nilometers – special tools to measure the Nile waters during the annual flood season were introduced. Such water monitoring system not only helped to prognosticate the volume of crop, but also calculate taxes to be paid.

The second important resource coming from the Nile River is alluvial deposits – mud used to fertilize the fields. This material was also used in making mud-bricks applied in construction. At this period raw material washing was introduced. This technique facilitated the obtention of pure, admixture free clayey – aleirite paste and washed out alluvial sand that later could be used as a lean material.

The pottery making was highly developed in Ancient Egypt. Ancient Egyptian craftsmen produced large quantity of pottery, including porcelain like ware, whose production required extraction of white clay (kaolinite). The knowledge obtained for the provision of these raw materials was accumulated and later used for extraction of stones necessary to construct large scale buildings such as pyramids (Kukela, Seglins, 2012b).

## 2. THE TERRITORY OF THE STUDY

The ancient Necropolis of Saqqara plateau was chosen as the most appropriate territory to study the development of geological knowledge during the Old Kingdom. Additionally the Old Kingdom necropolises at Giza and Dashur, as well as ancient Mosques in Cairo were studied to perform comparative studies.

The data of the environmental monitoring system demonstrate that the average air temperature and temperature of the stone surface, as well as relative moisture and dew point temperature vary significantly during the day and the whole year period. This denotes the existence of constant untoward conditions for preservation of the stone monuments. Such conditions provoke the decay of stone material and deterioration of mortar. These processes are accelerated by abrasive effect of wind and sand erosion.

### 2.1. Saqqara plateau geological structure

The Saqqara plateau is situated about 40 km southeast of Cairo on the left bank of the river Nile and rises for 17-25 m above the present flood terrace of the river. Starting from the Early Dynastic times this plateau was used as a necropolis which had served as such for about 3 thousand years. The tombs were built as underground structures, as well as mastabas and pyramids, their combination and as simple Coptic cemeteries. Nowadays, these are outskirts of the desert with active movement of sand.

The Saqqara plateau is formed by middle and late Miocene Mokkatam Formation (separate lower part of Maadi group) as layered and rhythmic lime rocks at shallow sea conditions. The lower part of the rhythm consists of 30-50 cm thick massive sandy limestone layer, covered by 10-15 cm thick lime marl. These layers are overlaid by up to 10 cm thick layer of marl and argillite. The next rhythm basement layer is sandy limestone or sandstone with carbonate cement, which is not always marked clearly and is followed by less sandy and massive limestone. At the upper section the proportions of layers change and clayey rocks prevail. At the top of rhythm the proportion of the limestone and marl/argillite reaches almost 1:1. The thickness of rhythms is not constant and variations are observed from 0.7-1.2 m up to 4-5 m. Sometimes local depressions are visible, where the thickness of clayey rock layer reaches several meters. The general tendency marks an increase of clayey layers thickness towards the south, but to the north these rocks have considerable amount of gypsum. Aforementioned grey and yellowish grey layers of sandy limestone are the main building materials in this area used in construction of the necropolis and the upper part

of the geological section at some parts are exposed on the stem escarpments of the plateau (Fig. 2.1.).



*Figure 2.1. Exposed part of the geological outcrop of the Saqqara plateau*

The Saqqara plateau is located in the seismically active area where earthquakes with magnitude of about 4.0 happen yearly. As a result, massive limestone layers are cracked forming peculiar structure of blocks measuring approximately 0.30-0.40 m.

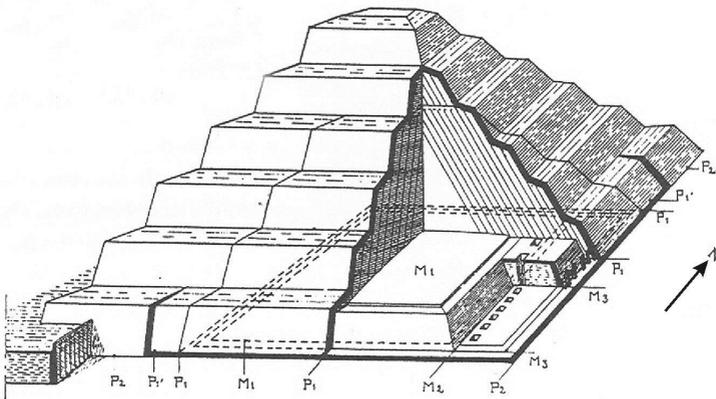
## **2.2. Characteristics of the study object**

The Step Pyramid of Djoser was chosen as the object of our study. This pyramid was built in six stages, gradually progressing from initial square mastaba and then forming the final six-step pyramid (Fig.2.2.). During almost 20 years long construction period the initial square mastaba (M1) had two phases of enlargement (M2 and M3) and later, this step-shaped mastaba was also rebuilt—first forming a four-step pyramid (P1) and later a six-step pyramid (P2) of rectangular base.

At its present form the base of the pyramid measures  $121 \times 109$  meters, the height of the pyramid is 63 meters (Baud, 2002). According to the recent calculations, the volume of the pyramid is 330 400 cu. metres. The substructure of the pyramid consists of numerous tunnels, underground passages and magazines of about 6 km and the Central Shaft, 28 meters deep, was dug for the burial chamber (Lehner, 2004).

The Step Pyramid of Djoser is not a congeneric structure. Materials of various kinds were used in its construction although not all these materials were

applicable. It was known already in the antiquity; therefore the pyramid was substantially rebuilt and reconstructed several times. The Pyramid is located on Saqqara plateau which is seismically active area where earthquakes with magnitude of about 4.0 happen yearly. Some of these earthquakes are very heavy and cause severe damage to the stability of the structure of the pyramid. It is known that the earthquake of the 1992 caused not only collapse of some underground tunnels but also damaged the façade of the pyramid. Most of the damaged parts were fixed with cement and concrete. These materials due to differences in their properties in some parts still cause threat to stability of the whole structure.



*Figure 2.2. The Step Pyramid of Djoser and its main construction stages* (after Verner, 2004). M1, M2, M3 – initial mastaba rebuilding stages; P1, P2 – pyramid rebuilding stages.

In recent years, a number of studies to assess the degree of damage and potential risks for pyramid complex have been performed. An extensive pyramid's reconstruction plan was developed. However, it is important that such work is carried out taking into consideration various stages of the pyramid's construction and diverse quality of the construction material and mortar used for this building.

---

## 3. MATERIALS AND METHODS

### 3.1. The photo documentation of the pyramid and creation of geo-spatial model

The photographic documentation was carried out using digital camera SONY DSC-R1 10.3 Mpix. The images of the pyramid were taken in several shifts during the period from the year 2005 till the year 2011 acquiring images of all four facades repeatedly (approximately 2300 images). These images were classified according to the date of acquisition and facades of the pyramid depicted. Additionally, the data about the size of the image, specification of the camera and information about special conditions when the photograph was taken are noted. All the digital images included in the data base form the main data array.

To organize and manage the data necessary for our study, the geospatial model of the Step Pyramid was used. This 3D model was elaborated using the data collected in the framework of the Latvian Scientific Mission working in Egypt from the year 2005 till the year 2007 and performing 3D laser scanning of the pyramid, obtaining the data on the 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> steps of the pyramid (ca. 5 million points). The final stage of elaboration of the 3D model was performed using Google SketChup program and SmartSurface algorithm of the MicroStation V8i software. This model was further developed and adjusted to suit the needs of our study.

The 3D model of the pyramid was supplemented with the photo mosaic created for each facade of the pyramid using MicroStation V8i software *Descartes* module. This photo mosaic, merged with the accuracy of centimetre points, was later integrated into the 3D model as a texture covering all four sides of the pyramid (area of approximately 12000 m<sup>2</sup>) and forming a background for other specific information layers. Another advantage is an option to integrate and maintain the data, as well as photo documentation archive in Geographic Information System (GIS) environment. Since the 3D model of the pyramid was created in scale, taking into account the real size and dimensions of the pyramid, various stone material weathering types and their intensities depicted as a specific information layer could be expressed numerically (in square metres).

### 3.2. The assessment of stone block surface weathering

Stone damage and deterioration of historical monuments due to weathering is a growing concern. Therefore, precise determination of weathering damages

is vital for remedy and sustainable monument preservation. The studies of stone monument preservation are carried out in many countries world-wide. However, most of these methods of deterioration diagnostics are expensive and labour-consuming, therefore rarely used in practice. Several non-destructive weathering intensity assessment methods have been developed (Svahn, 2006; Sass, Viles, 2010), yet their application in many cases requires direct contact with an object of the study.

One of the most noteworthy methods of stone material deterioration diagnosis was developed by Bernd Fitzner (Fitzner, Heinrich, 2002). This method was applied in many stone material weathering studies in numerous cultural heritage sites, such as Giza, Karnak and Old Cairo. Comprising laboratory analysis and *in situ* investigations, the analysis of the fragment of particular monument's facade included survey and evaluation of weathering forms by means of monument mapping and *in situ* measurements. Mineral composition and classification of limestone used for the construction of the monument was produced based on microscopic studies. Therefore, the methodology elaborated by B. Fitzner was chosen as the most appropriate for further adjustment and development at the initial stage of our study.

One of the objects of detailed investigation performed by B. Fitzner was El-Merdani Mosque in the Islamic centre of Cairo, Egypt (Fitzner et al., 2002).

The diagnostics and mapping of weathering forms and intensity of El-Merdani mosque's southern facade fragment was carried out basing on the photographs taken by the author, analyzing the surface of each stone block of the fragment. Identified weathering forms and their intensities were evaluated and mapped using a previously elaborated simplified weathering classification scheme and correlated block by block.

This study, including several verifications, provides a justification for analysis of weathering of stone materials applying simplified classification scheme. Such analysis allows us to evaluate the current situation with high precision and to compare the data of previous investigations at the same area. These results have high credibility and they are supported by a very high correlation ( $R^2 = 0.8984$ ) between the data of the initial study of B. Fitzner published in 2002, and re-interpretation of these data applying simplified classification of weathering forms and their intensities, basing on examination of weathering forms and visual evaluation of their intensity carried out *in situ*. It makes this method widely applicable in numerous historical monuments where such a non-destructive and remote access method could be the only option.

### 3.3. Studies of the facades of the Step Pyramid

Further stone material weathering studies were conducted at the Step Pyramid of Djoser. Initially, each of the pyramid's facades was assessed applying methodology developed by B. Fitzner (Fitzner et al., 2002) and a classification developed for this particular study. It was established that all weathering types included in the classification are recognisable also in Saqqara and in the Step Pyramid. The study revealed the existence of other weathering types recognisable in photo documentation and *in situ*. To facilitate the development of weathering catalogue inherent to the particular monument, sample areas of each of the pyramid's facades were analysed. This analysis revealed more than 30 different weathering categories, which later were combined to form a unified classification scheme (catalogue) including typical weathering type and intensity samples (Kukela, Segliņš, 2012c).

The author's experience indicates that such a catalogue developed for the particular monument is very important as it can significantly reduce the subjective assessment of different facades and facilitate comparisons between the results obtained.

A part of this thesis is focusing on the study of binding material used in the construction of the Step Pyramid of Djoser. In this pyramid mixtures of various compositions were used as a mortar and currently it is only possible to appraise the state of preservation of this mortar as a result of weathering process. The study allows identifying up to six mortar (cement) types used to bond the building blocks of the pyramid. The majority of these binder types are directly related to various types of cementing matter used during different stages of construction of the pyramid. This typology was developed on several sample areas verifying its validity *in situ*.

Detailed analysis of the pyramid's form and dimensions for the needs of elaboration of spatial model revealed deflexions in the geometry of the pyramid. Further analysis of these deflexions demonstrated that most of them appeared due to deformations of the structure identified in the photo documentation and on site. The diagnostics of faults and cracks was performed analyzing photographic documentation using traditional methodology applied in remote sensing to determine linear structures and features (Gupta, 2003).

During the research various sets of data were obtained. These data sets consist of imagery, analysed and developed catalogues of weathering, geospatial model of the Step Pyramid, as well as other data necessary for research purposes, such as literature studies, data on the mortar used in the building of Djoser's pyramid and data on the stability of the pyramid's structure.

## 4. RESULTS

New factual material and data were obtained as a result of this study. Additionally, new methodology was developed and the innovations introduced can be applied in practice. The analysis of correlation and discussion of the results obtained allows us to draw conclusions regarding the objectives of this thesis.

### 4.1. Development of geospatial model

The 3D model of the Step Pyramid of Djoser was developed relying on the measurements taken *in situ* and aerial photographs. This model serves as a reliable geometrical frame for georeferencing various observations, including photographic documentation. The 3D model elaborated is possibly the best solution, taking into account the limited data available, with no option to acquire this data once again due to the extensive reconstruction works currently carried out on the site of the Step Pyramid (Fig. 4.1).

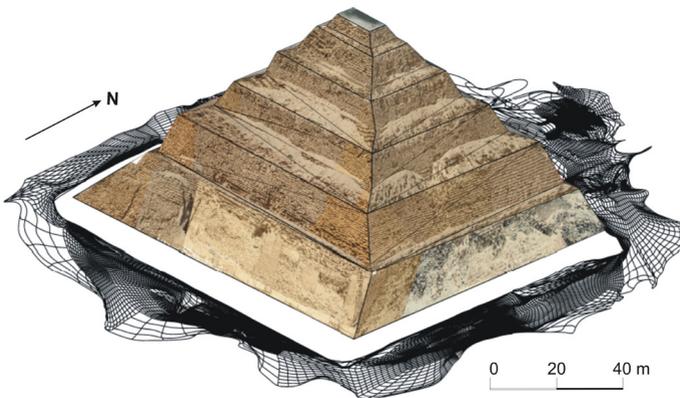


Figure 4.1. Geospatial model of the pyramid with integrated photo mosaic of the facades (south-east corner)

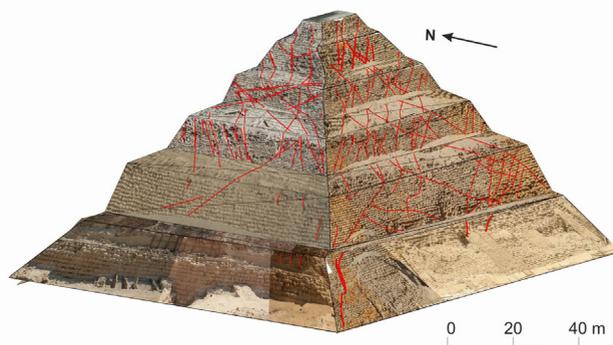
The data identified the weathering types and their intensities, as well as results of the analysis of faults and cracks visible on the facades of the pyramid were specific information layers integrated into the 3D model of the pyramid.

## 4.2. The stability of the Step Pyramid

The Saqqara plateau is known as a seismically active area where earthquakes with magnitude of about 4.0 happen yearly. Unfortunately, the quality of the data of the seismic stations in Egypt forming united national observation net is insufficient and, therefore, these seismic stations are not included in any of international seismic observation nets.

The study of the damage at the Step Pyramid caused by earthquakes was based on several high resolution photo-documentation series and further analysis carried out on site during the years 2007 - 2011. The results of this study demonstrate substantial deformations on all four facades of the Step Pyramid.

The elaborated geospatial model of the pyramid allows us to display and analyse various data, as well as to perform a complex interpretation of the study results. The location of the main faults and cracks identified on the facades of the Step Pyramid are shown in the figure 4.2. The results of this analysis revealed comparatively large number of fissures on individual construction blocks. Most of the faults affect the areas of block groups within the limits of each step of the pyramid. Some of these faults can be traced through several steps of the pyramid, and some of them affect almost 1/3 of the facade's area. Some faults can be identified on three or even all four facades of the pyramid, thus forming a plane that in case of a considerable earthquake could become a surface for sliding motion resulting in irreversible damage of the pyramid.



*Figure 4.2. Location of faults and cracks identified on the facades of the Step Pyramid (south-west corner)*

The 3D model of the pyramid indicates main directions and the orientation of faults allowing prognosticating future deformations of the structure. The

fact the pyramid is located in the seismically active area is only increasing the risk and denotes the necessity of extensive studies of the whole structure of the pyramid.

### **4.3. Characteristic features of the stone material**

The appraisal of the quality of stone production and assessment of weathering of stone blocks allowed to distinguish previously identified construction stages of the Step Pyramid (Lauer, 1962) (Fig.2.2.) and characterise them applying following criteria: sizes of the blocks, frontal part, variations and diversity in size of the blocks, uniformity of the material chosen, treatment of the surface of the blocks and pre-processing of the blocks.

The results of analysis of these criteria denotes that during the construction of the Step Pyramid two major steps in extraction and application of the building material have been made.

At first, during the initial stages of the construction there was a transition from the coincidental gathering of stones in the vicinity (M1) using large volume of mortar to bind the stones, towards intentional search for appropriate construction blocks (M2) at the nearest plateau escarpment. Most likely, such a transition was initiated by practical considerations, since the desert, surrounding the Saqqara plateau has a limited volume of scattered stones. Therefore, the search for an alternative source of building material on the escarpments of the plateau is very logical. The presumption that for the needs of the construction a quarry was laid out in the vicinity of the construction site is not reasoned. The evaluation of the building blocks utilised in the construction of the pyramid reveals that almost none of these blocks have the same or similar composition. Moreover, part of the building material before laying in the masonry, was already affected by continuous weathering processes.

The other essential step is the transition from the material of diverse quality (M2/M3) to the application of blocks of one particular type (P1). The quality of such blocks still is not high, the sizes of the blocks differ, but the stone material has similar composition and properties. It implies the existence of centralization of extraction and development of mining; yet, similarities in quality of the material extracted imply the implementation of appropriate geological investigation prior to extraction (Kukela, Seglins, 2012d).

The assessment of the stone building material used in the construction of the pyramid helps to identify different pyramid construction stages and phases of material selection. The elaborated geospatial model of the pyramid is the most suitable tool to visualize these construction stages and different specific information layers.

---

#### **4.4. The assessment of mortar used in the pyramid**

In the Step Pyramid different artificial compositions are used as binder and their application in different areas of the pyramid is uneven and almost undistinguishable. Currently, it is only possible to appraise the state of preservation of the mortar as a result of weathering process.

Taking into account the restriction to carry out direct instrumental measurements or take any samples on site for analytical studies, the study of mortar at this pyramid is just empirical and not suitable for all potential large-scale monuments. Nevertheless, the method developed yields some important information for elaboration of conservation projects for the monuments of cultural heritage.

The analysis of photographic documentation of all four facades of the Step Pyramid enabled us to identify the most common types of mortar used in the construction. Two types of cement were used more often: the composition of one type includes traditional Nile silt adobe; the other type is formed of composite paste of sand and gypsum with lime and clay admixture. Depending on the proportion of the components it is possible to evaluate visually and verify in situ the predominant varieties of cement types.

As mentioned above, the Step Pyramid of Djoser was built in six stages. The first mastaba of king Djoser's tomb was built of flat stones found in the vicinity, which were more durable than adobe mud bricks. However, the strength of these stones was not verified and the quantity of stones available in the locality was limited. This could be the reason why the amount of cement used in the construction of the mastaba at the base of the Step Pyramid is so significant, and at some parts it even exceeds the quantity of building stones. In the subsequent construction stages, new stone material extraction and processing techniques were developed, allowing to reduce the amount of cement necessary for the construction. At the same time, the composition of mortar was also improved, as well as the quality and properties of the building blocks.

The assessment of binding material is an effective indicator to study the stability of the structure and to identify most urgent preservation measures necessary to undertake. The mortar characterizes different construction stages of the pyramid and helps to evaluate the development of geological knowledge during the construction of the pyramid.

#### **4.5. Assessment of weathering of the stone material at the Pyramid of Djoser**

The Step Pyramid of Djoser is currently under vast reconstruction, and its facades are almost completely covered by scaffoldings making any studies of the

pyramid practically impossible. Moreover, no direct measurement or analysis is permitted on site. Therefore, for the needs of the study photo documentation carried out by the author during the years 2007-2011 has been used. Further study focused on verification of the data obtained on site and the application of non-invasive methodology only.

Detailed identification of the weathering types was carried out on sample areas on site, and then performing manual interpretation of high resolution photographic documentation. During this stage of the study the surface of each pyramid's construction block was evaluated and its state of preservation resulting from impact of weathering was appraised. Additionally, the state of preservation of the mortar binding construction blocks of the pyramid was assessed (Kukela, Seglins, 2012a).

For the needs of this study the weathering type classification scheme was developed, allowing us to identify most common weathering types visible on the facades of the pyramid and to evaluate their intensity. These weathering types are: loss of stone material, rounding and surface detachment of construction blocks. Each of these weathering types was evaluated applying a 5-category intensity system (Kukela, Segliš, 2012c).

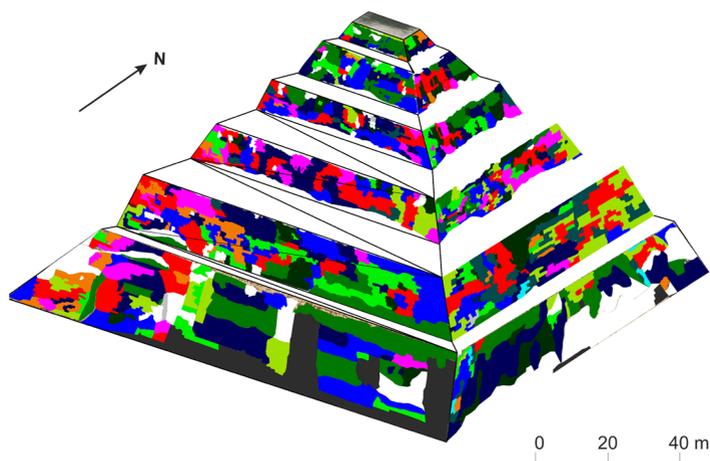
The integration of the identified weathering types and their intensities into a 3D model of the pyramid enabled us to establish that location of these features on the facades of the pyramid form a diverse and complex structure. Various weathering types of different intensity are spread all over the pyramid and can not be attributed to any particular facade or pyramid's step (Fig. 4.3.). However, the edges and corners, as well as aforementioned crack zones of the pyramid's steps are affected by weathering more severely and even to a greater extent in the crossing areas of the faults and cracks identified.

Simplified statistical analysis of the data obtained provides possibility to determine several other correlations. Regardless of the complicated distribution of different weathering types on the pyramid's facades, the total area affected by weathering varies. On the southern facade of the pyramid surface the detachment and loss of stone material of the exposed stone blocks have affected 49.78% (1709.70 m<sup>2</sup>) of the surface. On the proximal eastern facade these weathering types affected 50.36% (1213.30 m<sup>2</sup>); on the western facade – 39.96% (1145.74 m<sup>2</sup>) and on the northern facade – 58.69% (1893.77 m<sup>2</sup>). On the other hand, a rather common weathering type – rounding is spread quite evenly and the areas affected by this type of weathering vary between 25-33%; therefore, as a specific weathering type rounding is not very substantial for further analysis.

The results of this study demonstrate that predominant weathering intensities are “2” and “3”. Overall, it is an indication of quite a high degree of knowledge of ancient builders regarding the choice of construction material. Yet, the eastern facade, where weathering intensity “4” forms 27.07% of the whole

area of the facade, is an exception. This is the facade where on the first two steps the initial stages of the pyramid's construction are exposed and the construction blocks are elaborated less accurately. This also is fortified by a significant loss of cement mass and its comparatively low quality in that area.

The surface of the stone material exposed on the facades of the pyramid has disintegrated. It was possible to evaluate not only predominant weathering types and their intensities, but also their spatial distribution and correlation with other evaluation parameters.



Weathering forms	Intensity 0	Intensity 1	Intensity 2	Intensity 3	Intensity 4
Rounding (N)	Grey	Light Blue	Dark Blue	Medium Blue	Dark Blue
Surface detachment (V)	Grey	Orange	Red	Purple	Dark Red
Loss of stone material (Z)	Grey	Light Green	Green	Dark Green	Black

**Figure 4.3. Visualization of weathering types and their intensities on the facades of the Step Pyramid's 3D model.**

The scree layers and non-interpreted areas are indicated in white; reconstructed parts of the pyramid – in dark grey.

The study results demonstrate a direct connection of the material weathering to the construction stages of the pyramid. Such studies along with the evaluation of the cement properties are essential before attempting any reconstruction and conservation work on the pyramid site.

## 5. DISCUSSION

Current observations, documents, archaeological findings and historical evidence, as well as the study results obtained by the author do not provide any proof of the fact that geological knowledge was adopted from other civilizations. The most ancient stone buildings in Ancient Egypt are related to the funerary cult and royal tombs (Shafer, 1997). The construction of such structures is based on ancient traditions and a very specific religious practice in the Old Kingdom. At this historical period any innovations are introduced very cautiously, and no evidence suggests an impact of other cultures (Kamil, 1998, Arnold, 1999).

There are not many studies regarding the stone material used in the construction of the Step Pyramid. One of the first most explicit studies was published by D. and R. Klemm in 2010 and it focuses on the provenance of the building stones of the Old Kingdom pyramids (Klemm, Klemm, 2010). This study offers a petrographic and plasma spectroscopic analysis of 67 samples of the pyramid's limestone blocks. Unfortunately, in this study, there are no indications on the provenance of particular sample results of the analysis. Only the proportions Mg/Fe, Mg/Sr and Fe/Mn are interpreted, that allow us to come to the conclusion regarding the local provenance of the construction material, i.e., from Saqqara plateau.

The study carried out by the author confirms the pyramid construction stages identified by other scholars and clearly denotes the diverse quality of the construction blocks (Kukela, Seglins, 2012d). The pyramid's construction manner denotes local provenance of the construction material, and it is also approved by the study of D. and R. Klemm (2010). It highlights the diversity in the quality of the construction material as an indicator of changes in ancient knowledge about raw materials and geological conditions, which were gradually improved during pyramid construction process.

Aforementioned incompleteness and limitations accelerated original studies of the author regarding the assessment of stone material surface weathering. Similar methodology was applied in the studies in Giza plateau at the pyramid of king Hufu. The fragment of the southern facade of this pyramid was analysed, carrying out mechanical durability instrumental measurements, petrographic and chemical analysis to determine stone material weathering types and their intensities (Fitzner et al., 2002). This study was an important part of creation of weathering trait classification scheme developed by B. Fitzner and his colleagues (2002) for the monuments of cultural heritage. Unfortunately, this classification can be applied only by using instrumental and laboratory analysis and turns out to be extremely cost and labour consuming and can not be performed at the objects of limited accessibility. The studies presented in this thesis demonstrate

the possibility to improve the application of such methodology in historical monuments of the Old Kingdom of Ancient Egypt in Saqqara and Giza plateau by classifying the weathering types and their intensities and limiting the number of characteristic features and categories, so the application of such a simplified methodology does not require destructive diagnosis (Kukela, Seglins, 2011a). It is noteworthy to mention that during field investigations and after processing the data of two sample areas, a high correlation was reached with instrumental studies performed by B. Fitzner. This enabled us to prove the link between values of the two groups of parameters – empirical (based on analysis of photo documentation) and instrumental (studies by B. Fitzner). This means that the results of B. Fitzner experimental measurements and the data of detailed photographic documentation assessment adequately characterize the test parameters and their numerical value, as well as differentiation. Such data can be used for development of stone monument conservation and restoration projects in Egypt and the areas with similar physiographic conditions.

The methodology developed in this thesis has provided some important information about the quality of the stone material used in the construction of the Step Pyramid and how this quality has changed during the whole pyramid construction process.

Taking into consideration the status of the Step Pyramid complex and the restrictions of the local authorities, during our study there were no possibility to take any samples from the pyramid construction blocks or escarpments of the Saqqara plateau. Therefore, this study was developed only basing on non-destructive and remote methods.

This study indicates that by developing high resolution photographic documentation of the monument, its integration into geospatial model and elaboration of weathering assessment methodology allow us to draw conclusions regarding the quality of the stone material used. Such an approach helps to characterize the identified pyramid construction stages and to evaluate the progress in the quality of stone material. This factual material is important for elaboration and development of preservation and reconstruction plans for this monument.

The mortar used in the construction of the Step Pyramid was characterised very generally, simply mentioning its sulphate cement composition and giving no detailed results of analysis. Currently, there are few analytic studies regarding the composition of the mortar used in the construction of the Djoser pyramid. Most extensive parts of these studies focus just on the analysis of samples of cement already affected by weathering, therefore, the results of such an analysis are just approximate. Many scholars accentuate the similarity of mortar used in most of the Old Kingdom pyramids, yet chemical analysis was carried out only for a few samples (Lucas, 1948; Salmoni, 1933).

The results of this study indicate that during the numerous stages of the construction of the Step Pyramid mortar of different composition was used. These various types differ not only in their composition and method of production, but also in their resistance to deterioration. The quality of the mortar applied was also gradually increased. The photographic documentation of the pyramid was appraised manually, verifying the quality of the data obtained and possibilities to use the images for the development of cement weathering classification. The classification elaborated further was simplified, so it could be applied also for the studies of images of the upper steps of the pyramid (Kukela, Seglins, 2012a). The method developed yields important information for elaboration of conservation projects for the monuments of cultural heritage.

All aforementioned is mainly related to the Step Pyramid of Djoser – the main object of our study. To such an extent this monument had been the most suitable for study purposes, since its study allowed us to trace the changes in development of craftsmen knowledge and skills. The quality of construction blocks and mortar of later Old Kingdom pyramids is less variable and generally demonstrates the level of knowledge obtained already during the construction process of the Step Pyramid of Djoser.

The results of the study allow us to trace the accumulation of geological knowledge and expansion of their application. However, due to unknown reasons the exogenic processes, including erosion and sedimentation processes, are studied to a less extent. The knowledge on soil and preparation of construction bedding is rather low. Such practice in Saqqara and Giza necropolises has been introduced only at the end of the Old Kingdom (Kukela, Seglins, 2011b).

Overall, the geological knowledge during the Old Kingdom should be considered as high professional skills, which have been accumulated for generations. This is one of the traditional ways of transmission of experience, and such a way is known not only in Ancient Egypt but also in other regions (Nicholson, Shaw, 2009). The analysis of the construction stages of the Step Pyramid indicates a constant development of geological knowledge and understanding of building material choice. All this has facilitated numerous reconstructions and rebuilds of this monument until it has acquired its present state.

---

## CONCLUSIONS

The materials used in the construction of the Step Pyramid and their quality denote a gradual development of geological knowledge during the pyramid's construction process. This knowledge and skills have been accumulated during previous historical periods, and in the Old Kingdom they were adjusted and evolved for the construction of large scale monuments.

The assessment of weathering intensity depicted on the geospatial model of the pyramid has revealed that 1<sup>st</sup>, 2<sup>nd</sup>, 5<sup>th</sup> and 6<sup>th</sup> steps of the pyramid were built from a similar stone material. The predominant weathering types are rounding and loss of stone material. The stone material of the 3<sup>rd</sup> and 4<sup>th</sup> steps differs – the weathering types and their intensities are diverse and affect smaller areas of the facade.

Weathering intensity is higher in the areas mostly affected by faults and cracks. The results of the analysis demonstrate that in the central part of the pyramid lower quality material was used, whereas the sides of the steps are more resistant to weathering.

A significant role is played by the binding material used in the construction of the pyramid. The results of the research demonstrate that analytic studies of mortar composition are one of the priorities in the future investigations.

In this research a geospatial model of the Step Pyramid has been created for the first time, allowing to display different stone material studies in 3D. Such information layers provide a possibility to make conclusions regarding the quality of the stone material used and to identify most severe damages of the pyramid's structure.

The research results are only a small part of the information, yet to be learnt about the very topical exploration area of development of non-destructive research methods and understanding on the mechanisms and prognostication of decay processes in historical monuments. This clearly indicates that this direction should be investigated in the future.

## ACKNOWLEDGMENTS

The thesis has been developed with a financial support of the ESF project “Support of Doctoral Studies at the University of Latvia”, No. 2009/0138/1DP/1.1.2.1.2/09/IPIA/VIAA/004, LU registration No. ESS2009/77. The author thanks Professor, Dr. Geol. Valdis Segliņš - the leader of the promotion work, for his great contribution, support and advice during the writing of the thesis and the scientific articles.

Great acknowledgement also goes to Dr. Bruno Deslandes, Dr. Jānis Klētnieks, Dr. Māris Kaļinka, Dr. Alain Zivie, Mrs. Daiga Upeniece, head at the Art Museum “RIGA BOURSE” and Mr. Oto Lukss.

The author also thanks the experts and inspectors of the Supreme Council of Antiquities (Egypt), Dr. Hatema el-Kereti, Dr. Osama el-Shimi, Dr. Mohammad Youssef, as well as engineers working at the Step Pyramid site, Dr. Hasan Yusef and Mr. Alaa El-Din for their support during the field work on site.

## LIST OF PUBLICATIONS

### Articles in international publications and collective monographs

- Kukela, A., Segliš, V., 2012. Džosera piramidas akmens materiāla dēdēšanas nedestruktīva novērtēšana. No: *Latvijas Universitātes Raksti*, 789 sēj. Rīga: LU Akadēmisklais apgāds, 105.–116. lpp.
- Kukela, A., Segliš, V., 2012. Application of Building Stone in the Old Kingdom of Ancient Egypt as an Indicator of Changes in Knowledge. *Scientific Journal of Riga Technical University*. 1. series, Material Science and Applied Chemistry, Vol. 25 (2012), p. 31–36.
- Segliš, V., Kukela, A., 2012. Damage assessment and 3D visualization: an example of the Step Pyramid, Egypt. In: *Proceedings of the International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference Surveying Geology & mining Ecology Management*. SGEM2012, Bulgaria, p. 1005–1011.
- Kukela, A., Segliš, V., 2012. Assessment of weathering of construction blocks and mortar in historical monuments. *Journal of Earth Sciences and Engineering*, Vol. 2, Number 4 (2012). David Publishing, USA, p. 235–240.
- Kukela, A., Segliš, V., 2012. Cultural heritage between environmental conditions and human impact, example of Egypt. In: *Proceedings of the Liepaja University 14th International Scientific conference "Society and Culture: frontiers and new horizons"*. Liepaja, p. 112–121.
- Kukela, A., Segliš, V., 2011. Znanija o ņedrah i ih kachestve v rechnom basseine reki Nil na primere Drevnego Egipta. In: *Proceedings of the International scientific and applied conference „Resources and ecologic problems of Volga basin"*. Vladimir, Russia, p. 72–75.
- Kukela, A., Segliš, V., 2011. Stone material deterioration studies in world heritage sites for evaluation of conservation strategy. In: *Proceedings of the 7th International conference "Geology at School and University: GEOLOGY and CIVILIZATION"*, Vol. I. Sankt-Petersbourg, Russia, p. 142–149.
- Kukela, A., Segliš, V., 2011. Simplified Method of Assessment of Weathering on Historical Stone Monuments: An Example of El-Merdani Mosque, Cairo, Egypt. *Journal of Earth Sciences and Engineering*, Vol. 1, Number 2 (2011). David Publishing, USA, p. 82–90.
- Kukela, A., Segliš, V., 2011. Study of the historical monuments: from the photography to the digital spatial model. In: *Proceedings of the 53rd International Scientific conference of Daugavpils University*, [CD-ROM].
- Segliš, V., Kukela, A., Kalinka, M., 2011. Geovizualization of stone material weathering data for geoarchaeological studies. In: *Proceedings of the International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference Surveying Geology & mining Ecology Management*. Vol. II. SGEM2011, Bulgaria, p. 401–407.
- Kukela, A., Segliš, V., 2011. The development and planning of settlements in Ancient Egypt. In: *Proceedings of the 52<sup>nd</sup> International Scientific conference of Daugavpils University. Reports on Research*. Saule, p. 66–73.
- Kukela, A., Segliš, V., 2010. Artefacts and geo-environmental data inventory in the Step Pyramid and its management through Geographical Information System (GIS). In: *The International conference "Achievements and Problems of Modern Egyptology" Conference proceedings*. Moscow, Russia, p. 185–195.

### International conferences and seminar thesis

- Kukela, A., Seglins, V., 2011. Application of building stone in the Old Kingdom in Ancient Egypt as an indicator of changes in knowledge. In: *Book of abstracts of the 52nd International Scientific conference of Riga Technical University, October 13–15, 2011, RTU*. Riga, Latvia, p. 79.
- Kukela, A., Segliņš, V., 2011. Assessment of weathering of construction blocks and mortar in historical monuments. In: *Book of abstracts of the 5th Baltic Conference on Silicate Materials "Balt silica 2011", May 23–25, 2011*. Riga, Latvia, p. 44–45.
- Kukela, A., Seglins, V., 2011. From photography to geospatial model in geoarchaeological studies. In: *Abstracts of the 2nd Students' International Geological Conference, April 28 – May 01, 2011*. Ratnieki, Latvia, p. 14.
- Kukela, A., Seglins, V., 2011. Study of the historical monuments: from the photography to the digital spatial model. In: *Abstracts of the 53rd International Scientific conference of Daugavpils University, April 13–15, 2011*. Daugavpils, Latvia, p. 170–171.
- Kukela, A., Seglins, V., 2010. The development and planning of settlements in Ancient Egypt. In: *Abstracts of the 52nd International Scientific conference of Daugavpils University, April 14–16, 2010*. Daugavpils, Latvia, p. 211.
- Kukela, A., Seglins, V., 2009. Artefacts and geo-environmental data inventory in the Step Pyramid and its management through Geographical Information System (GIS). In: *Abstracts of the International conference "Achievements and Problems of Modern Egyptology", September 29 – October 4, 2009*. Moscow, Russia, p. 18–19.
- Kukela, A., Seglins, V., 2009. Ceramic artefacts and geo-environmental data inventory in the Step Pyramid and its management through Geographical Information System (GIS). In: *Abstracts of the International conference "Clays, Clay minerals and layered materials – CMLM2009", September 21–25, 2009*. Zvenigorod, Russia, p. 285–286.
- Kukela, A., 2008. Archaeological inventory in the Step Pyramid and its management through Geographical Information System (GIS). In: *Abstracts and programme of the 23rd International Baltic Conference on the History of Science, October 9–10, 2008*. Riga, Latvia, p. 39.

### Conference and seminar thesis in Latvia

- Kukela, A., Segliņš, V., 2012. Unis piramīdas fasāžu akmens materiāla dēdēšanas netieša novērtēšana. No: *Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Vides zinātne. LU 70. zinātniskās konferences referātu tēzes*. Rīga: LU Akadēmiskais apgāds, 187.–189. lpp.
- Kukela, A., Segliņš, V., 2011. Hufu un Unis piramīdu akmens materiāla dēdēšanas veidu salīdzinošs novērtējums. No: *Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Vides zinātne. LU 69. zinātniskās konferences referātu tēzes*. Rīga: LU Akadēmiskais apgāds, 320.–323. lpp.
- Kukela, A., Segliņš, V., 2010. Sabiedriskās telpas plānošana Ēģiptē Senās valsts sākuma posmā. No: *Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Vides zinātne. LU 68. zinātniskās konferences referātu tēzes*. Rīga: LU Akadēmiskais apgāds, 145.–146. lpp.
- Kukela, A., Segliņš, V., 2010. Būvakmens Senās valsts sakrālās būvēs Ēģiptē. No: *Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Vides zinātne. LU 68. zinātniskās konferences referātu tēzes*. Rīga: LU Akadēmiskais apgāds, 317.–318. lpp.
- Kukela, A., Segliņš, V., 2009. Džosera piramīdas dažādos būvniecības posmos izmantotā akmens materiāla novērtēšana. No: *Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Vides zinātne. LU 67. zinātniskās konferences referātu tēzes*. Rīga: LU Akadēmiskais apgāds, 209. lpp.

## IZMANTOTĀ LITERATŪRA / REFERENCES

### Publicētā / Published materials

- Arnold, D., 1999. *When the Pyramids Were Built: Egyptian Art of the Old Kingdom*. Book. Rizzoli International Publications, p. 144.
- Baud, M., 2002. *Djéser et la IIIe dynastie*. Book. Pygmalion/Gérard Waletet, p. 146.
- Fitzner, B., Heinrichs, K., 2002. Damage diagnosis on stone monuments – weathering forms, damage categories and damage indices. In: Prikryl, R., Viles, H. A. (ed.). *Understanding and managing stone decay. Proceedings of the International Conference „Stone weathering and atmospheric pollution network (SWAPNET 2011)”*, The Karolinum Press, Charles University, Prague, Czech Republic, p. 11–56.
- Fitzner, B., Heinrichs, K., Bouchardiers, D., 2002. *Limestone weathering of historical monuments in Cairo, Egypt*. Special Publication. Geological Society of London, 205, p. 217–239.
- Gupta, R. P., 2003. *Remote Sensing Geology*, 2nd ed. Book. Spinder Verlag, Germany, p. 655.
- Kamil, J., 1998. *Ancient Egyptians: Life in the Old Kingdom*. Book. Columbia University Press, p. 206.
- Klemm, D., Klemm, R., 2010. *The stones of the Pyramids. Provenance of the Building Stones of the Old Kingdom Pyramids of Egypt*. Book. German Archaeological Institute Cairo Department. Walter de Gruyter GmbH, p. 167.
- Kukela, A., Seglins, V., 2012a. Assessment of weathering of construction blocks and mortar in historical monuments. *Journal of Earth Sciences and Engineering*, Vol. 2, Number 4, (2012), David Publishing, USA, p. 235–240.
- Kukela, A., Seglins, V., 2012b. Cultural heritage between environmental conditions and human impact, example of Egypt. In: *Proceedings of the Liepaja University 14th International Scientific conference “Society and Culture: frontiers and new horizons”*. Liepaja, p. 112–121.
- Kukela, A., Segliņš, V., 2012c. Džosera piramīdas akmens materiāla dēdēšanas nedestruktīva novērtēšana. No: *Latvijas Universitātes Raksti*, 789. sēj. Rīga: LU Akadēmiskais apgāds, 105.–116. lpp.
- Kukela A., Segliņš V., 2012d. Application of Building Stone in the Old Kingdom of Ancient Egypt as an Indicator of Changes in Knowledge. *Scientific Journal of RTU*. 1. series. Material Science and Applied Chemistry, Vol. 25 (2012), p. 31–36.
- Kukela, A., Seglins, V., 2011a. Simplified Method of Assessment of Weathering on Historical Stone Monuments: An Example of El-Merdani Mosque, Cairo, Egypt. *Journal of Earth Sciences and Engineering*, Vol. 1, Number 2 (2011). David Publishing, USA, p. 82–90.
- Kukela, A., Seglins, V., 2011b. Znanija o ņedrah i ih kachestve v rechnom basseine reki Nil na primere Drevnego Egipta. In: *Proceedings of the International scientific and applied conference „Resources and ecologic problems of Volga basin”*. Vladimir, Russia, p. 72–75.
- Lauer, J. P., 1962. *Histoire Monumentale des Pyramides d'Égypte*, Vol. 1: Les Pyramides à Degrés (IIIe Dynastie). Book. Institut Français d'Archéologie Orientale. Cairo, p. 286.
- Lehner, M., 2004. *The Complete Pyramids*. Book. The American University in Cairo Press, p. 256.
- Lucas, A., 1948. *Ancient Egyptian materials and industries*, 3<sup>rd</sup> edition. Book. The St Ann's Press, London, p. 548.
- Nicholson, P. T., Shaw, I., (eds.), 2009. *Ancient Egyptian Materials and Technology*. Book. Cambridge University Press, p. 702.

- Salmoni R. *Sulla Composizione di alcune antiche malte egiziane, in Atti e Memorie della Ra. Accademia di Scienze Lettere ed Arti in Padova.* 1933 (XI), Vol. XLIX, p. 251–256.
- Said, R. (ed.), 1990. *The Geology of Egypt.* Book. Taylor & Francis. Amsterdam, p. 734.
- Sass, O., Viles, H. A., 2010. Wetting and drying of masonry walls: 2D-resistivity monitoring of driving rain experiments on historic stonework in Oxford, UK. *Journal of Applied Geophysics*, 70, p. 72–83.
- Schlumberger, 1984. Well evaluation conference of Egypt. Schlumberger Middle East, Vol. 1. *The Geology of Egypt.* Cairo, p. 67.
- Shafer, B. E. (ed.), 1997. *Temples of Ancient Egypt.* Book. Cornell University Press, p. 352.
- Seglins, V., Kukela, A., 2012. Damage assessment and 3D visualization: an example of the Step Pyramid, Egypt. In: *Proceedings of the International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference Surveying Geology & mining Ecology Management*, SGEM2012, Bulgaria, p. 1005–1011.
- Svahn, H., 2006. Non-destructive field tests in stone conservation: Field and laboratory tests: final report for the research and development project. In: *Rapport från Riksantikvarieämbetet 2006*, 4, Riksantikvarieämbetet. Stockholm, p. 118.
- Verner, M., 2004. *The Pyramids: The Mystery, Culture and Science of Egypt's Great Monuments.* Book. The American University in Cairo Press, p. 495.