

DISERTATIONES GEOLOGICAE UNIVERSITATIS LATVIENSIS  
Nr. 22

**AGNESE KUKELA**

**ĢEOLOĢISKO ZINĀŠANU ATTĪSTĪBA SENĀS  
VALSTS LAIKĀ ĒĢIPTĒ**

DISERTĀCIJA

RĪGA, 2012

DISERTATIONES GEOLOGICAE UNIVERSITATIS LATVIENSIS  
Nr. 22

**AGNESE KUKELA**

**GEOLOGISKO ZINĀŠANU ATTĪSTĪBA SENĀS  
VALSTS LAIKĀ ĒGIPTĒ**

**DISERTĀCIJA**

doktora grāda iegūšanai ģeoloģijas nozares  
lietišķās ģeoloģijas apakšnozarē

**LATVIJAS UNIVERSITĀTE**

Promocijas darbs izstrādāts:  
Latvijas Universitātes Ģeoloģijas nodaļas Ģeoloģijas katedrā no 2008. gada līdz 2012. gadam

Promocijas darba vadītājs:  
**Valdis Segliņš**, profesors, Dr. ģeol. (Latvijas Universitāte)

Recenzenti:  
**Ģirts Stinkulis**, asociētais profesors, *Dr. geol.*, Latvijas Universitāte  
**Juris Soms**, docents, *Dr. geol.*, Daugavpils Universitāte  
**Ojārs Spārītis**, profesors, *Dr. habil. art.*, Latvijas Mākslas Akadēmija

Promocijas padomes sastāvs:  
**Vitālijs Zelčs**, profesors, Dr. ģeol. – padomes priekšsēdētājs  
**Ervīns Lukševičs**, profesors, Dr. ģeol. – padomes priekšsēdētāja vietnieks  
**Aija Dēliņa**, docente, Dr. ģeol.  
**Laimdota Kalniņa**, asociētā profesore, Dr. ģeogr.  
**Valdis Segliņš**, profesors, Dr. ģeol.  
**Ivars Zupiņš**, Dr. ģeol.

Padomes sekretārs:  
**Ģirts Stinkulis**, asociētais profesors, Dr. ģeol.

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

Promocijas darba atklāta aizstāvēšana notiks LU Ģeoloģijas promocijas padomes sēdē 2012. gada 21.decembrī, Rīgā, Alberta ielā 10, Jāņa un Elfrīdas Rutku auditorijā (313. telpa).

Promocijas darba kopsavilkuma izdošanu ir finansējusi Latvijas Universitāte.

Ar promocijas darbu ir iespējams iepazīties Latvijas Universitātes Zinātniskajā bibliotēkā Rīgā, Kalpaka bulvārī 4 un Latvijas Akadēmiskajā bibliotēkā Rīgā, Lielvārdes ielā 4.

Atsauksmes sūtīt: Dr. Ģirts Stinkulis, Latvijas Universitātes Ģeoloģijas nodaļa, Raiņa bulvāris 19, LV-1586, Rīga. Fakss: +371 6733 2704, e-pasts: [Ģirts.Stinkulis@lu.lv](mailto:Ģirts.Stinkulis@lu.lv)

© Agnese Kukela

Latvijas Universitāte  
[www.lu.lv](http://www.lu.lv)

# SATURS

## Ievads

Pētījuma mērķis .....	9
Pētījuma aktualitāte.....	10
Pētījuma galvenie uzdevumi.....	10
Novitāte .....	11
Praktiskā pielietojamība .....	11
Rezultātu aprobācija.....	12
Pateicības .....	16
<b>1. Senās Ēģiptes valstiskuma pirmssākumi, hronoloģija un vēstures galvenie posmi .....</b>	<b>18</b>
<b>2. Līdzšinēji veikto ģeoloģisko pētījumu apskats .....</b>	<b>24</b>
2.1. Ieskats par Ēģiptes ģeoloģisko uzbūvi.....	28
2.2. Līdzšinējie priekšstati par ģeoloģiskajām zināšanām un resursiem Senajā Ēģiptē.....	31
<b>3. Pētījuma teritorijas raksturojums .....</b>	<b>36</b>
3.1. Teritorijas fiziogēogrāfiskie apstākļi un to mainība.....	36
3.2. Sakāras plato ģeoloģiskā uzbūve.....	37
3.3. Pētījumu objekta raksturojums.....	40
<b>4. Materiāli un metodes.....</b>	<b>44</b>
4.1. Pētījuma pamata datu iegūšana .....	44
4.2. Pētījuma objekta izvēle un pētījuma realizācijas secīgums .....	45
4.3. Pētījuma objekta fotodokumentēšana .....	45
4.4. Piramīdas ģeotelpiskā modeļa izveide un aprobācija.....	47
4.5. Senajā valstī izmantotais akmens materiāls .....	55
4.6. Būvakmens virsmas dēdēšanas novērtēšana .....	56
4.7. Raksturīgas akmens materiāla dēdēšanas formas un pazīmju grupēšana Unis piramīdas fāsādēs .....	78
4.8. Pētījumu komplekss Džosera piramīdas fasādēs.....	83
4.9. Datu integrācija un sagatavošana analīzei .....	90
<b>5. Rezultāti.....</b>	<b>91</b>
5.1. Ģeotelpiskā modeļa izveide .....	91
5.2. Pakāpju piramīdas stabilitāte .....	93
5.3. Izmantoto akmens būvmateriālu kvalitātes pazīmes .....	97
5.4. Izmantoto saistvielu novērtējums.....	103
5.5. Džosera piramīdas akmens materiāla dēdēšanas novērtējums.....	107
<b>6. Diskusija.....</b>	<b>117</b>

<b>Secinājumi .....</b>	<b>125</b>
<b>Izmantotā literatūra .....</b>	<b>127</b>
Publicētā .....	127
Nepublicētā.....	135
Interneta resursi.....	135

## 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 izdalīti vairāki piramīdas būvniecības posmi, kuros būtiski atšķiras izmantotā būvakmens un saistvielu kvalitāte. Tie raksturo zināšanu pieaugumu attiecībā uz dabiskajām izejvielām, kā arī daudzus tehnoloģiskus jauninājumus.

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 sistemātiska analīze un pētījumu augsta detalitāte ļauj secināt, kā Senajā Ēģiptē mainījās un pieauga ģeoloģiskās zināšanas.

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

## 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 allows 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 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.

## Ievads

Senā valsts Ēģiptē aptver laika posmu apmēram 2686-2160. g. p.m.ē. un ir salīdzinoši strauju pārmaiņu laikmets kā sabiedriskajā dzīvē, tā arī būvniecībā. Pirmsdinastiju laikā apgūtās prasmes un zināšanas vairāku līmeņu un visai sazarotu pazemes kapeņu veidošanā mazinās, bet zināšanas par iežiem, to īpašībām un apstrādes īpatnībām ir augstā attīstības līmenī. Arī dažādie akmens materiāla apstrādei nepieciešamie instrumenti jau ir izveidoti. Tieši šajā laikā pilnveidojas kleķa būvmateriālu izgatavošanas un būvniecības prasmes, un sākot ar II dinastiju, no akmens tiek izgatavoti atsevišķi būvelementi (durvju ailes, kolonas, retāk grīdas plāksnes). III dinastijas sākumā tiek būvētas grandiozas plakanvirsmas kapenes (mastabas) ar būvpojumu līdz pat 35 tūkst. m<sup>3</sup> (Lehner, 2004). Būvakmens tiek izmantots ļoti ierobežoti, savukārt dažāda sastāva kaļķu apmetumi tiek pielietoti ļoti plaši. To kvalitāte nav augsta, tomēr īpaši zema kvalitāte ir materiāliem, kas tiek izmantoti kā saistvielas, un to ir viegli konstatēt un novērtēt arī mūsdienās.

Tomēr III dinastijas beigu posmā, kas saistās ar valdnieka Džosera valdīšanas laiku, būvniecībā tiek ieviestas daudzas inovācijas. Tās attiecas uz ļoti plašu būvakmens izmantošanu un nesalīdzināmi augstākas kvalitātes saistvielām, kas rezultējas līdz tam neiespējamu būvprojektu realizācijā. Šajā nozīmē Džosera piramīdas būve ir unikāla. Tajā nepastarpināti atspoguļojas visi mēģinājumi radīt un ieviest jauninājumus. Šie jauninājumi apver kā ģeoloģiskās zināšanas par pieejamiem būvkaļķiem un to īpašībām, tā arī zināšanas par saistvielām un to dažādošanu atšķirīgām vajadzībām, kas iezīmē ļoti nozīmīgu posmu silikātu ķīmijas attīstības sākumposmā. Jauninājumi skar arī plānošanas, būvkonstrukciju izveides un inženieraprēķinu, kā arī daudzas citas jomas. Šie eksperimenti un inovācijas nodrošina strauju būvmateriālu izejvielu dažādošanu un jaunās zināšanas kļūst iespējams realizēt vienos no lielākajiem akmens būvprojektiem pasaulē – izveidojot piramīdu kompleksu Gīzā.

Amatniecības izstrādājumu (keramikas, statuju, darba rīku, un tml.) izgatavošanas prasmju attīstība ir plaši pētīta, bet senie pieminekļi un to kompleksi, kā arī to izveides posmi līdz šim ir apzināti ļoti nepilnīgi. Īpaši tas attiecas uz Senās valsts būvēm, kuras līdz mūsdienām ir saglabājušās visai nelielā skaitā, bet mazpārveidotas ir gandrīz tikai senās kapenes. Kā otra problēmu grupa izceļama ne tik daudz faktiskā materiāla un pētniecības objektu nepietiekamība, kā šādas ievirzes pētījumiem piemērotu metožu ierobežotība vai to nepietiekama attīstība, jo ievērojams skaits no tām mūsdienās tiek atzītas par nepiemērotām (Bateman *et al.*, 2010; Barta *et al.*, 2006, 2011).

Veiktais pētījums aptver pēdējo sešu gadu laikā autora iegūto lauku novērojumu rezultātu apkopojumu un to analīzi. Pētījums ir balstīts uz eksperimentāliem mērījumiem lauku apstākļos, kas veikti vairākās Ēģiptes Senās valsts pieminekļu vietās, tādās kā Gīza, Dašūra un Sakāra. Tika pētītas IV dinastijas valdnieka Snofru Sarkanā un „Liektā” piramīda Dašūrā, valdnieka Hufu piramīda Gīzā, V dinastijas valdnieka Unis piramīda un III dinastijas valdnieka Džosera piramīda Sakārā.

Promocijas darba apjoms ir 135 lpp.; tas satur 8 teksta tabulas un 52 teksta attēlus.



## Pētījuma mērķis

Uzsākot pētījumu, tika izvirzītas vairākas hipotēzes, atbilstoši kurām Ēģiptē Senās valsts laikā ļoti īsā vēsturiskā periodā bija atšķirīgas iespējas apgūt pietiekamas ģeoloģiskās zināšanas, kas ļautu uzsākt 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.

Promocijas darbā tika izstrādāti vairāki pētījumu virzieni, kas ir tieši saistīti ar disertācijā izskatīto pamattēmu – ģeoloģisko zināšanu paplašināšanās novērtēšanu Ēģiptē Senās valsts laikā, kad tiek uzsākta akmens bloku piramīdu būvniecība. Mūsu rīcībā nav tiešu vēsturisku vai arheoloģisku liecību par šiem notikumiem, tomēr daudziem pētniekiem šie pārsteidzošie sasniegumi būvniecībā un akmens materiāla izmantošanā ļāva izvirzīt atšķirīgas teorijas (Firth, Quibell, 1935; Lauer, 1962; Edwards, 1967) un pieņēmumus (David, 1986; Estep, 2008; Lockyer, 2010) starp kurām ir ne mazums tādu, kuras saukt par zinātniskām mūsdienās ir grūti (Schoch, 2004; Reece, 2006). Apskatot šīs hipotēzes un pieņēmumus ir jāņem vērā, ka pašas būtiskākās izmaiņas akmens materiāla izmantošanā Senajā Ēģiptē ir aptvērušas vēsturiski īsu laika posmu, kas mērāms tikai gadu desmitos un tas ir nozīmīgs aspekts, kurš ir veicinājis daudzo teoriju attīstību (Lucas, 1948).

Tajā pašā laikā atzīmējams, ka neviens no iepriekšēji minētajiem dažādo hipotēžu un teoriju autoriem līdz šim nav sniedzis kādus nozīmīgus pierādījumus, pārbaudāmus novērojumu datus, arheoloģiskās liecības utml. Esošās teorijas balstās uz pieļāvumiem un to interpretāciju, līdz ar to šīs teorijas ir noraidāmas. Veicot pētījumus, drīzāk papildus būtu jāņem vērā šo teoriju iespējamība, kā arī paši pētījumi būt jāveic ar augstāku detalizācijas pakāpi, kas ļautu iegūt viennozīmīgi interpretējamus datus.

Iepriekšēji izklāstītais ļauj noteikt pētījuma mērķi - izvērtēt un pārbaudīt abas pamata hipotēzes par ģeoloģisko zināšanu attīstību Ēģiptē Senās valsts laikā – to aizgūvi no citām senām civilizācijām vai šo zināšanu pakāpenisku apgūvi uz vietas Ēģiptē, veidojot senākās akmens būves.

Lai sasniegtu mērķi, bija nepieciešams izstrādāt jaunas lietišķas dokumentēšanas, datu apstrādes un analīzes metodes, pārbaudīt jau zināmās metodes (Kukela, Seglins, 2012e), izvērtējot to piemērošanas iespējas seno būvju saglabātības pakāpes jautājumu risināšanai Ēģiptē, UNESCO Pasaules kultūras mantojuma objektos - ierobežotas pieejamības apstākļos, ko nosaka pieminekļu statuss.

Lai izpildītu nosprausto mērķi, tika izvērtētas visas pieejamās jaunāko teorētisko metožu izstrādes, analizēta publicētā zinātniskā literatūra (Lehner *et al.*, 2009a,b; Kawae *et al.*, 2009), pētījumu tehniskie ziņojumi (Revolutionizing Archaeology with the Latest Scanning Technology, 2008) un internetā pieejamā informācija, kā arī pētīti un analizēti dažādu profesionālo organizāciju rīkoto konferenču, semināru un kursu materiāli (Barta *et al.*, 2006, 2011; Goyon, Cardin, 2007).

## **Pētījuma aktualitāte**

Promocijas darbā un tā nosaukumā ir akcentētas ģeoloģiskās zināšanas un to attīstība Ēģiptes Senās valsts laikā. Šāds uzsvars ir izdarīts ar nolūku pierādīt, ka atšķirībā no tradicionālās seno būvju pētījumu pieejas, mūsu pētījuma priekšmetā un Ēģiptes fiziogēogrāfiskajos apstākļos darbojas pilnīgi atšķirīgas likumsakarības, kuru izziņošanai ir vajadzīgi speciāli pētījumi. Senajā valstī izmantotā būvākmeņu ieguves avoti un kvalitāte ir intensīvs zinātnisko pētījumu priekšmets visā pasaulē (Nicholson, Shaw, 2009; Isler, 2001; Arnold, 1991; Clarke, Engelbach, 1990; Wright, 2005) 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, fizikāli ķīmiskajiem 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. Promocijas darba ietvaros izstrādātā un pārbaudītā būvniecībā izmantoto akmens materiālu kvalitātes novērtēšanas parametru iegūšanas metode ir nepieciešama pamatotu seno kultūrvēstures pieminekļu novērtēšanas un saglabāšanas projektu izstrādei un realizācijai.

## **Pētījuma galvenie uzdevumi**

Promocijas darba ietvaros tika izvirzīti vairāki pētījuma pamatuzdevumi, kas vērsti uz jaunu ģeoloģisko zināšanu izmaiņu likumsakarību noteikšanas metožu un indikatoru meklēšanu un jau zināmo metožu teorētisko pārbaudi, kā arī visu šo metožu piemērošanas iespēju apzināšanu ģeoarheoloģisko jautājumu risināšanai Ēģiptes ģeoloģiskajos un fiziogēogrāfiskajos apstākļos.

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.

Pirms pētījuma uzsākšanas bija nepieciešams precīzi noteikt pētījuma metodes, izstrādāt eksperimentu plānu un tā izpildes procedūru, kā arī izvēlēties atbilstošu tehnisko nodrošinājumu, kas ļautu šos eksperimentus realizēt nepieciešamajā kvalitātē. Pētījuma sākumā svarīgi bija izvēlēties eksperimenta vietu un detalizēt pētījuma priekšmetu, izpētīt eksperimentālā laukuma ģeoloģiskos apstākļus, kā arī apzināt un raksturot pašu pētījuma objektu.

Ļoti svarīgi bija noteikt iespējamo korelāciju starp pētījuma gaitā ar netiešām metodēm fiksēto un iepriekšējos gados veikto instrumentālo mērījumu rezultātiem un to interpretāciju. Tas ļāva instrumentālo mērījumu rezultātus attiecināt uz objektiem vai to daļām, kas nav pieejamas tiešiem mērījumiem un paraugu ievākšanai turpmākām laboratoriskām pārbaudēm.

Nākamais svarīgs pētījuma uzdevums bija noteikt būvniecībai nepieciešamo izejvielu izvēles un novērtēšanas sistēmu, tajā skaitā, apzināt būvmateriālu eksponēto virsmu ietekmējošos faktorus, kuru iespaidā senās būves jau senatnē bija nepieciešams uzturēt un rekonstruēt.

Iepriekšēji 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.

### **Novitāte**

Atšķirībā no pētījumu reģionā iepriekšēji veiktajiem līdzīgas ievirzes kultūrvēstures objektu pētījumiem (Lehner, 1985; Weeks, Hetherington, 2006; Digital Karnak Project, 2008; Heinrichs, 2008), promocijas darba autora pētījumā pirmo reizi realizēta netieši iegūto datu sistemātiska analīze un to pārbaude ar lauku eksperimentu rezultātiem: noteiktas likumsakarības, novērtēti apstākļi un rezultātus ietekmējošie faktori. Veiktais pētījums ir orientēts tieši uz Ēģiptes ģeoloģiskiem un fiziogēogrāfiskiem apstākļiem, kas ļauj pilnīgāk apzināt būvniecībā izmantoto izejvielu īpatnības vērtīgu pieminekļu lokalizācijas vietās.

Autora pētījuma rezultātu analīzei izmantota daudzpusīga un kompleksa datu apstrādes pieeja. Līdzīgi pētījumi agrāk Latvijā, vai arī citās valstīs nav veikti un līdz šim zinātniskā literatūrā (Emmerson, 2010; Korres *et al.*, 1996; Pompeii Archaeological Research Project: Porta Sabia, 2012; Acropolis Restoration Service, 2011; Amarna Project, 2010) galvenokārt tika akcentēti arhitektoniskie, būves saglabātības vai atsevišķu būves elementu vēsturiskā nozīmīguma un unikalitātes, arī vizuālā tēla uzskatāmības aspekti. Tomēr netika diskutēti jautājumi par minēto teorētisko vai šauri specifisko rezultātu atbilstību dabā novērotajam un novērojumu atkarībai. Tam ir vairāki iemesli, starp kuriem svarīgākais ir lauka pētījumu ar *in situ* novērojumiem tehniskā sarežģītība un to realizācijai nepieciešamais ievērojamais laiks. Autora veiktais pētījums, plaši izmantojot augstas izšķirtspējas objekta fotodokumentēšanu, ir pirmais šāda veida eksperiments, kur piramīdas fasāžu eksponētās virsmas saglabātības aspekti ir pamatoti ar lauku novērojumu datu bāzi.

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

Šis ir pirmais šādas ievirzes pētījums Latvijā, 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.

### **Praktiskā pielietojamība**

Pētījuma gaitā paraugu laukumos Gīzā un El-Merdani mošejā Kairā pierādīts, ka starp instrumentāliem mērījumiem un fotodokumentācijas interpretācijas rezultātā iegūtām fasāžu virsmas dēdēšanas kategoriju vērtībām eksistē korelācija un visas šīs vērtības ir savā starpā salīdzināmas. Tas norāda, ka, izmantojot pētījumā izstrādāto virsmas dēdēšanas novērtēšanas metodi, bojājumus un to intensitāti ir iespējams novērtēt empīriski, balstoties tikai uz augstas detalizācijas fotodokumentācijas analīzi. Veiksmīgas metodes pilnveides gadījumā būs iespējams samazināt vai pat iztikt bez tehniski ļoti sarežģīti realizējamām mehāniskām pārbaudēm uz vietas, pie tam, ir jāņem vērā, ka šo metožu lielākā daļa ir destruktīvas un to izmantošana netiek pieļauta vairumā no vērtīgākajiem kultūrvēstures mantojuma

objektiem. Izstrādātās metodikas tādējādi ļauj ar netiešām metodēm iegūt svarīgu informāciju par izmantotiem būvmateriāliem un to saglabātības pakāpi, kas būtiski papildina līdzīgos pētījumos tradicionāli pielietojamās metodes (Heinrichs, 2008; Weeks, Hetherington, 2006; Heinrichs, Fitzner, 2007; Lehner *et al.*, 2009).

Lauku apstākļos iegūtā un statistiski pamatotā akmens būvbloku eksponētās virsmas bojājumu un dēdēšanas veidu nedestruktīvā noteikšanas metode paver jaunas iespējas dažādu ģeoarheoloģisko uzdevumu risināšanai tehniski sarežģītās teritorijās, prioritāri UNESCO Pasaulē kultūras mantojuma pieminekļos, kuru skaits jau sen pārsniedz vairākus simtus (Mitchell *et al.*, 2009; Oers van, Haraguchi, 2010).

Līdz šim akmens būvmateriāla bloku, konstrukciju un to saglabātības objektīvai novērtēšanai bija nepieciešami speciāli pētījumi un šo pētījumu realizācijai atbilstošas metodikas. Latvijā šādi pētījumi līdz šim bija veikti ļoti ierobežoti un to trūkums liedza dažādu nozaru speciālistiem, ģeologiem un inženieriem, iegūt nepieciešamos parametrus kvalitatīvu restaurācijas darbu veikšanai, jo īpaši attiecībā uz būvju ārsienām, akmens būvju fragmentiem utml. Tāpēc autora pētījumā aprobētā un zinātniski pamatotā nedestruktīvā akmens materiāla saglabātības novērtēšanas metode kopā ar attīstītām iespējamām pētāmo objektu vizualizēt 3D telpā var kļūt par noderīgu instrumentu dažādu sākotnējo objektu saglabātības un neatliekamo rekonstrukcijas pasākumu nepieciešamības novērtējumu veikšanai un kompleksu tehnisko projektu izstrādei.

Pētījuma gaitā izstrādātā un rezultātu analīzē pielietotā datu ģeotelpiskās organizācijas procedūra, turpmāk var tikt izmantota dažāda veida novērojumu datu analīzei lietišķajā ģeoloģijā un restaurācijā (Salonia *et al.*, 2007; Kukela, Seglins, 2011a; Seglins *et al.*, 2011). Pati pieeja ir metodiski inovatīva un daudzsološa, jo ļauj esošo informāciju sagatavot un pasniegt tās lietotājam pārskatāmā un viegli uztveramā formā, bet daudzos gadījumos - ļauj izdarīt jaunus nozīmīgus secinājumus.

Pētījumā iegūtie rezultāti un izdarītie secinājumi ir laba pieredze rezultātu kompleksā un mērķtiecīgā analīzē, kas ļauj izziņāt ģeoloģisko zināšanu uzkrāšanas un pielietojuma attīstību Senajā valstī Ēģiptē. Šāda pieeja, izstrādājot un pilnveidojot pētniecības metodes, paver plašas iespējas šo rezultātu praktiskam pielietojumam ģeoarheoloģijā nākotnē.

## **Rezultātu aprobācija**

Balstoties uz pētījuma rezultātiem, līdz 2012. gadam sagatavotas 12 zinātniskas publikācijas par atsevišķām pētījuma sadaļām un darbu kopumā, no kurām 6 raksti publicēti starptautiskos izdevumos un kolektīvajās monogrāfijās, 8 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.

## **Raksti starptautiskajos izdevumos un kolektīvajās monogrāfijās**

Kukela, A., Seglins, V., 2012. Džosera piramīdas akmens materiāla dēdēšanas nedestruktīva novērtēšana. Latvijas Universitātes raksti, sērija „Zemes un vides zinātnes, 789 sēj. Rīga, Latvijas Universitāte. lpp. 105.-116.

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), pp. 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.* pp. 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. pp. 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. pp. 112-121.

Kukela, A., Seglins, V., 2011. Znanija o nedrah 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. pp. 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.* Sankt-Petersbourg, Russia. pp. 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. pp. 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. pp. 401-407.

Kukela, A., Seglins, V., 2011. The development and planning of settlements in Ancient Egypt. *In: Proceedings of the 52<sup>rd</sup> International Scientific conference of Daugavpils University. Reports on Research.* Saule. pp. 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. pp. 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 5<sup>th</sup> Baltic Conference on Silicate Materials "Balt silica 2011", May 23-25, 2011, Riga, Latvia, pp. 44-45.*
- Kukela, A., Seglins, V., 2011. From photography to geospatial model in geoarchaeological studies. *In: Abstracts of the 2<sup>nd</sup> 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, pp. 170-171.*
- Kukela, A., Seglins, V., 2010. The development and planning of settlements in Ancient Egypt. *In: Abstracts of the 52<sup>nd</sup> 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, pp. 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, pp. 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 23<sup>rd</sup> 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. *Krāj. Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Vides zinātne. LU 70. zinātniskās konferences referātu tēzes. Rīga, Latvijas Universitāte. lpp. 187-189.*
- Kukela, A., Segliņš, V., 2011. Hufu un Unis piramīdu akmens materiāla dēdēšanas veidu salīdzinošs novērtējums. *Krāj. Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Vides zinātne. LU 69. zinātniskās konferences referātu tēzes. Rīga, Latvijas Universitāte. lpp. 320-323.*
- Kukela, A., Segliņš, V., 2010. Sabiedriskās telpas plānošana Ēģiptē Senās valsts sākuma posmā. *Krāj. Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Vides zinātne. LU 68. zinātniskās konferences referātu tēzes. Rīga, LU Akadēmiskais apgāds. lpp. 145-146.*
- Kukela, A., Segliņš, V., 2010. Būvākmenis Senās valsts sakrālās būvēs Ēģiptē. *Krāj. Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Vides zinātne. LU 68. zinātniskās konferences referātu tēzes. Rīga, LU Akadēmiskais apgāds. lpp. 317-318.*
- Kukela, A., Segliņš, V., 2009. Džosera piramīdas dažādos būvniecības posmos izmantotā akmens materiāla novērtēšana. *Krāj. Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Vides zinātne. LU 67. zinātniskās konferences referātu tēzes. Rīga, LU Akadēmiskais apgāds. 209 lpp.*

## Referāti starptautiskos kongresos, konferencēs un semināros

Kukela, A., Seglins, V.: Znanija o nedrah i ih kachestve v rechnom basseine reki Nil na primere Drevnego Egipta. In: *The International scientific and applied conference „Resources and ecologic problems of Volga basin”, October 20-22, 2011, Vladimir, Russia.*

Kukela, A., Seglins, V.: 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, Riga, Latvia.*

Kukela, A., Seglins, V.: Stone material deterioration studies in world heritage sites for evaluation of conservation strategy. *The 7th International conference “Geology at School and University: GEOLOGY and CIVILIZATION”; June 30 - July 5, 2011, Saint-Petersburg, Russia.*

Kukela, A., Segliņš, V.: Assessment of weathering of construction blocks and mortar in historical monuments. *The 5<sup>th</sup> Baltic Conference on Silicate Materials “Baltsilica 2011”; May 23-25, 2011, Riga, Latvia.*

Kukela, A., Seglins, V.: Study of the historical monuments: from the photography to the digital spatial model. *The 53<sup>rd</sup> International Scientific conference of Daugavpils University; April 13-15, 2011, Daugavpils, Latvia.*

Kukela, A., Seglins, V.: Artefacts and geo-environmental data inventory in the Step Pyramid and its management through Geographical Information System (GIS). *The International conference “Achievements and Problems of Modern Egyptology”; September 29-October 4, 2009, Moscow, Russia.*

Kukela, A., Seglins, V.: Ceramic artefacts and geo-environmental data inventory in the Step Pyramid and its management through Geographical Information System (GIS). *The International conference “Clays, Clay minerals and layered materials – CMLM2009”; September 21-25, 2009, Zvenigorod, Russia.*

Seglins, V., Kukela, A., Sicoovs, G.: Ground penetration radar surveys for Archaeological studies. *The International Scientific Conference „The Methods of Archaeological Investigations”; October 24-25, 2008, Vilnius, Lithuania.*

Kalinka, M., Kukela, A.: 3D scanning implementation experience in Latvia and Egypt. *The International Scientific Conference „The Methods of Archaeological Investigations”; October 24-25, 2008, Vilnius, Lithuania.*

Kukela, A.: Archaeological inventory in the Step Pyramid and its management through Geographical Information System (GIS). *The 23<sup>rd</sup> International Baltic Conference on the History of Science; October 9-10, 2008, Riga, Latvia.*

## Referāti Latvijas konferencēs un semināros

Kukela, A., Segliņš, V.: Unis piramīdas fasāžu akmens materiāla dēdēšanas netieša novērtēšana. *LU 70. zinātniskā konference; 2012.gada 3.februāris, Rīga.*

Kukela, A., Segliņš, V.: Hufu un Unis piramīdu akmens materiāla dēdēšanas veidu salīdzinošs novērtējums. *LU 69. zinātniskā konference; 2011.gada 28.janvāris, Rīga.*

Kukela, A., Segliņš, V.: Sabiedriskās telpas plānošana Ēģiptē Senās valsts sākuma posmā. *LU 68. zinātniskā konference; 2010.gada 4.-5.februāris, Rīga.*

Kukela, A., Segliņš, V.: Būvakmens Senās valsts sakrālās būvēs Ēģiptē. *LU 68. zinātniskā konference; 2010.gada 4.-5.februāris, Rīga.*

Segliņš, V., Kukela, A.: 19.gadsimta gravīras un fotogrāfijas kā nozīmīgs avots Senās Ēģiptes pieminekļu pētījumos. „*Izdevuma „Description de l’Egypte” gravīras kā Ēģiptes vēstures un kultūras liecības Konference*”; 2009.gada 11.decembris, Rīga.

Kukela, A., Segliņš, V.: Džosera piramīdas dažādos būvniecības posmos izmantotā akmens materiāla novērtēšana. *LU 67. zinātniskā konference; 2009.gada 2.februāris, Rīga.*

Papildus augstāk minētajam, atsevišķi disertācijā apskatītie metodiskie jautājumi attiecībā uz 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. Atbilstošās sadaļas dažādos tehniskos pārskatos, atskaitēs un ziņojumos ir tikušas izstrādātas pēdējo 6 gadu laikā, daļa no tiem savu atspoguļojumu ir guvuši arī šī promocijas darba ietvaros. Zināma daļa pētījumā iegūto rezultātu, it īpaši attiecībā uz pētījumu metodoloģiju, ir iestrādāta ģeoloģijas maģistra studiju programmas kursā „Ģeoarheoloģija”, kas tiek īstenots LU Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultātē un atsaucību ir guvis arī starp vēstures studiju programmas studentiem. Par pētījumu un tā rezultātiem autors ir vairākkārtīgi uzstājies Latvijas Radio, sniedzis intervijas televīzijai, kā arī stāstījis skolēniem Rīgas Kultūru vidusskolā atklātas lekcijas formā.

Pētījums sākotnēji bija iecerēts ievērojami plašāks un daļu no tā bija plānots veikt sadarbībā ar Kairas Universitāti un Ēģiptes Augstākās Senlietu pārvaldes speciālistiem, detalizētāk pētīt Džosera piramīdas iekšējo struktūru un dažādu tās būvniecības posmos izveidoto konstrukciju savstarpējās attiecības. Diemžēl politisku pārmaiņu rezultātā šis pētījuma sadaļas realizācija ir atlikta uz vairākiem gadiem.

### **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. Viņš palīdzēja arī strukturēt un optimizēt pētījuma saturu un veicināja pētījumā iegūto rezultātu sistemātisku izklāstu.

Metodiskās konsultācijas un atbalstu lauku darbu plānošanā, kā arī eksperimentu veikšanā sniedza Latvijas Zinātniskās ekspedīcijas Ēģiptē vadītājs Dr. Bruno Delāns, Dr. Jānis Klētnieks, Dr. Māris Kaļinka, Francijas arheoloģiskās misijas Bubasteonā, Ēģiptē vadītājs Dr. Alens Zivī, kā arī Latvijas Nacionālā Mākslas Muzeja Ārzemju mākslas departamenta vadītāja Daiga Upeniece un dekoratīvi lietišķās mākslas kolekcijas glabātāja Baiba Uburģe. Pētījumā iekļautos grafiskos attēlus palīdzēja gatavot SIA „Mikrokods” speciālists Oto Lukss ar Baibas Ziemeles atbalstu. Minētajiem kolēģiem esmu pateicīga par ieguldījumu, kuru viņi sniedza pētījuma atsevišķu posmu realizācijā un iegūto rezultātu noformēšanā.



Autors tāpat pateicas arī kolēģiem no Krievijas Zinātņu Akadēmijas Ēģiptes izpētes centra, Kairas muzeja bijušai direktorei Dr. Vafaai el-Saddik un fotogrāfam Ahmedam Aminam, Senlietu Austākās padomes ekspertiem un inspektoriem Dr. Hatemam el-Kereti, Dr. Osamam el-Šimi, Dr. Mohammadam Jussefam, kā arī Sakāras plato un Džosera piramīdas kompleksa rekonstrukcijas projekta vadītājam profesoram Dr. Hasanam Jusef, inženieram Alaa El-Dinam un inženierim Samiram Abdel-Raoufam par sniegto tehnisko atbalstu lauku pētījumu veikšanā.

# 1. SENĀS ĒĢIPTES VALSTISKUMA PIRMSSĀKUMI, HRONOLOĢIJA UN VĒSTURES GALVENIE POSMI

Senākās liecības par Ēģiptes teritoriju apdzīvojošiem cilvēkiem tiek datētas ar aptuveni 500 000 gadus senu Paleolīta periodu (Bard, 2008). Šie cilvēki, kas pārtika no medījumiem un savāktiem savvaļas ēdamajiem augiem, dzīvoja nelielās ciltīs Nīlas ielejā un tās apkārtnē esošos tuksnešos. Pirms aptuveni 12 000 gadiem beidzās pēdējais Ledus laikmets un klimata pārmaiņas pakāpeniski izmainīja mūsdienu Ēģiptes teritorijas iedzīvotāju iztikas iegūšanas iespējas (Shaw, 2003). Neolīta periodā, apmēram 8000 g. p.m.ē., notika būtiskas sociālas un tehnoloģiskas izmaiņas. Šajā periodā notika pāreja no eksistēšanas, kad nelielās pagaidu apmetnēs dzīvojoši cilvēki sev iztiku ieguva medījot un savācot augus, uz ekonomiku, kad cilvēki uzsāka pastāvīgu dzīvi ciematos, nodarbojoties ar zemkopību un lopkopību.

Senākās liecības par Neolīta ekonomiku Ēģiptes teritorijā tika atrastas Fajūmas oāzes apkārtnē Lejas Ēģiptē un tiek datētas ar 5500 g. p.m.ē. Vēlākās Neolīta apmetnes ar līdzīgu saimniekošanas sistēmu tika atrastas el-Badari apkārtnē un attiecināmas uz Badāriešu kultūru (apm. 4500 - 4000 g. p.m.ē.). Augšas Ēģiptē un Ēģiptes vidienē agrārie ciemati parādījās ap 4000 g. p.m.ē. Pirmsdinastiskā perioda sākumā (Bard, 2008).

Ir zināmas vairākas teorijas, kuras izskaidro valsts veidošanās mehānismu Senajā Ēģiptē (Крол, 2005; Wenke, 2009; Wilkinson, 1999, 2003) un šie darbi tika izmantoti sekojošā īsā pārskata sagatavošanai par šo teoriju attīstības vēsturi.

Tā senākās teorijas balstījās uz pieņēmumu, ka Senās Ēģiptes civilizāciju izveidoja zināma ienācēju „dinastiskā rase”. Šis viedoklis bija plaši izplatīts XX gadsimta pirmajā daļā, bet saglabāja savus sekotājus līdz pat 1970-tajiem gadiem. Deviņpadsmitā gadsimta beigās, laika posmā no 1894. līdz 1895. gadam arheologi F. Pitri (W.M.F.Petrie) un Dž. Kvibels (J.Quibell) izpētīja trīs Augšas Ēģiptes nekropoles (nekropoli B, T un Lielo Nekropoli) netālu no senajām apmetnēm Nagadā un Balā. Izrakumu gaitā tika atrastas cilvēku mirstīgās atliekas, kuru galvaskausu izmēri, kaulu masa un kaulu garums bija lielāki nekā citur atrastos Pirmsdinastiju perioda apbedījumos. Balstoties uz apbedījumu, kā arī tur atrastām keramikas liecībām, tika secināts, ka šo nekropoļu apbedījumi piederēja citas rases pārstāvjiem, nevis tā paša vēsturiskā perioda Nagdas un Balas apmetņu iedzīvotājiem.

Vēlāk, P. Engelbahs izteica pieņēmumu, ka „dinastiskās rases” ienākšana bija bruņota iebrukuma un salīdzinoši ātras Nīlas ielejas iekarojuma rezultāts, kas notika pateicoties iebrucēju militāram pārākumam. Pēc pētnieka domām, „dinastiskās rases” dzimtene bija Babilonija, no kurienes iekarotāji, kā raksta Engelbahs, „uz savu zobenu galiem atnesa civilizācijas aizmetņus” (Крол, 2005).

Starp pētniekiem, kuri meklēja Senās Ēģiptes valsts veidošanās iemeslus pašas senās valsts iekšienē, ievērojama nozīme bija K. Vitfogelam, pēc kura domām, izšķirošs valsts rašanās faktors Nīlas ielejā bija vienotas apūdeņošanas sistēmas izveidošanas nepieciešamība. Saskaņā ar Vitfogela teoriju, sākotnēji, katrai atsevišķai apmetnei bija sava apūdeņošanas sistēma un kā svarīgs solis vienotas valsts izveidē bija šo atsevišķo apūdeņošanas sistēmu apvienošana vienotā tīklā, kas, iespējams, notika, brīvprātīgi vienojoties. Šī apvienošanas procesa rezultātā veidojās aizvien plašāks apūdeņošanas sistēmu tīkls, kas sekmēja vienotas saimniekošanas sistēmas un arī valsts izveidošanos. Savukārt, lai izveidotu apūdeņošanas sistēmas un sadalītu

ūdeni, bija nepieciešama šo darbu vadība un uzraudzība. Pēc Vitfogela domām šī vadības un uzraudzības struktūra veidoja pamatu Senās Ēģiptes pārvaldes funkcionēšanai.

Tomēr jaunākie pētījumi norāda, ka upes pārplūšanas un apūdeņošanas sistēmu uzturēšanas kontrole bija vietējās administrācijas rokās, kas varētu nebūt ieinteresēta pārvaldes centralizētas sistēmas attīstībā. Pret K. Vitfogela teorijas pierādījumiem liecina arī fakti, kas norāda, ka līdz pat Pirmajam Pārejas periodam (2181 – 2040 g. p.m.ē.) starp ēģiptiešu ierēdņu tituliem netika atrasts neviens, kas būtu saistīts ar apūdeņošanu (Wilkinson, 1999).

Ir tikušas izvirzītas arī citas teorijas. Tā vācu zinātnieks K. Zete piedāvāja Senās Ēģiptes valsts rašanās mitoloģisko interpretāciju pieņemot, ka pastāvēja divas atsevišķas valstis Augšas Ēģiptē („Ieleja”) un Lejas Ēģiptē („Delta”) un kara rezultātā „Delta” guva uzvaru pār „Ieleju”, izveidojot vienotu valsti. Pēc K. Zetes domām, vēlāk šī atsevišķo valstu savstarpējā cīņa simboliski pārtapa mītā par cīņu starp Horu, kuru godāja Behdetā (Lejas Ēģiptē) un Setu, kura sakrālā pilsēta bija Ombosa (Nagada, Augšas Ēģiptē) (Wilkinson, 1999).

Vēlāk, pētnieki K. Bards un R. Karneiro noteica vairākus pamata faktoros, kas, viņuprāt, ietekmēja Senās Ēģiptes teritoriju apdzīvojošo kultūru vēsturisko attīstību, kā rezultātā izveidojās Senās Ēģiptes valsts:

1. Dabas resursu koncentrācija ierobežotā teritorijā, ko no visām pusēm ietver tuksnesis.

2. Teritorijas nepietiekamība. Īpaši tas izpaudās līdz ar nokrišņu daudzuma samazināšanos un Sahāras pakāpenisku aridizāciju. Šīs teritorijas iedzīvotāji bija spiesti pārcelties uz Nīlas ieleju, kas, savukārt, izraisīja iedzīvotāju skaita pieaugumu divas-trīs reizes laika periodā no 4000 līdz 3000 g. p.m.ē. Rezultātā izveidojās pārāpdzīvotība un notika esošo sociālo attiecību izmaiņas. Šo izmaiņu indikators bija Nagadas nekropoles apbedījumi, kuru struktūra un piedevas liecina par vēlā pirmsdinastiskā periodā pastāvošo sabiedrības daudzslāņainumu.

3. Konflikti un karadarbība. Pēc autoru domām, karš ir valsts izveidošanās procesa pamata elements. Vēlā pirmsdinastiskā perioda attēli uz lietišķās mākslas priekšmetiem liecina par to, ka vairums tā laika apdzīvotās vietas bija nocietinātas. Piemēram, tā saucamās „Lībijas paletes” vienā no pusēm ir shematiski attēlotas septiņas nocietinātas rietumu Deltas pilsētas.

Pēc K. Barda un R. Karneiro domām, šādas nocietinātas apdzīvotās vietas, ko viņi nosauca par „vadoņciltīm” pārsvarā veidojās Augšas Ēģiptē. Šajā darbā ar terminu „vadoņcilts” tiek apzīmēta „stratificētas sabiedrības politiskā apvienība, kuras priekšgalā atrodas cilts vadonis”. Pieaugot šādu vadoņcilšu skaitam, atrisināt pārāpdzīvotību mehāniski paplašinot vadoņcilts teritoriju, kļuva aizvien grūtāk, jo šo vadoņcilšu teritorijas sāka robežoties viena ar otru. Līdz ar to, teritorijas nepietiekamības un pārāpdzīvotības problēma varēja tikt atrisināta vienīgi uz blakus esošo teritoriju rēķina tās iekarojot. Šādi bruņotie konflikti noslēdzās ar Nīlas ielejas un Deltas teritoriju apvienošanu vienotā valstī. Līdz ar to, pēc K. Barda un R. Karneiro domām, karš ir pamata pārejas mehānisms no autonomām vadoņcilīm uz centralizētu valsti Senajā Ēģiptē (Wenke, 2009).

Arī citi pētījumi, kas apskata Senās Ēģiptes valstiskuma izveidošanās faktoros un priekšnosacījumus, neskatoties uz šajos pētījumos izvirzīto teoriju dažādību, norāda uz to, ka vienotas valsts rašanās iemesls Nīlas ielejā bija pakāpeniska Nagadas kultūras nesēju migrācija.

Diemžēl neviena no augstāk minētajām Senās Ēģiptes valsts veidošanās teorijām nav viennozīmīgi pamatota un pierādīta un pētījumi šajā jomā turpinās vēl šodien.

Senās Ēģiptes vēstures periods tiek sīkāk dalīts atsevišķos vēsturisko posmos, kuri īsumā ir apskatīti zemāk.

Arhaiskais (jeb pirmsdinastiju) periods (apm. 5000–3100 g. p.m.ē.) tiek izdalīts kā vēstures posms pirms Ēģiptes dienvidu un ziemeļu daļas apvienošanas vienotā valstiskā veidojumā. Pirmās valstiskās formas arhaiskā jeb pirmsdinastiju (arī pirmvēstures) periodā bija nelielas cilšu savienību valstiņas jeb zemes. Tādu visā Nīlas ielejā bijis vairāki desmiti. Vēlāk tās pakāpeniski apvienojās nelielās valstiņās, bet tās savukārt sāka veidot kaut ko līdzīgu federācijai. Ap ceturto gadu tūkstoša beigām Nīlas ielejā bija izveidojušās trīs atsevišķu valdnieku veidotas divas šādas federācijas – Augšēģipte un Lejasēģipte. Apdzīvotās vietas šajā laikā bija izvietotas Nīlas abos krastos. Aptuveni 3500 g. p.m.ē. lielākā pilsēta bija Hērakleopole Augšēģiptē, tā stiepjas vairāk nekā trīs kilometru garumā gar Nīlu.

Šī perioda beigu posmā ēģiptieši sāk izmantot pirmos hieroglifus, un senākie zināmie teksti radušies apmēram 3250 gadus pirms mūsu ēras.

Par senākām kultūrām pētniekiem nav vienota viedokļa, jo materiālās kultūras liecības ir ļoti retas un fragmentāras. Balstoties uz ceturto gadu tūkstoša p.m.ē. keramikas veidu un to izplatības analīzi (Wilkinson, 1999), tiek definētas divas dažādas Pirmsdinastiskās kultūras: Buto-Maādi Lejas Ēģiptē un Nagadas kultūra Augšas Ēģiptē. Šo kultūru nosaukumi ir veidoti no apdzīvoto vietu nosaukumiem, kuru apkārtnē šo kultūru liecības savulaik tika atrastas. Nagadas kultūras liecības tika atrastas arī vēlāka perioda apmetnēs Lejas Ēģiptē, kas norādīja uz to, ka šīs kultūras pārstāvji pakāpeniski apguva jaunas teritorijas, virzoties uz Ēģiptes ziemeļiem un trešajā gadu tūkstoši p.m.ē. Tiek pieņemts, ka Nagadas kultūra bija vienīgā jeb vismaz dominējošā kultūra visā Senās Ēģiptes teritorijā. Šis periods, kad Nagadas kultūra kļūst par dominējošo kultūru visā Senā Ēģiptes teritorijā, iezīmē Dinastiskā perioda sākumu un Senās Ēģiptes valsts rašanos.

Arhaiskā perioda beigās, aptuveni 3250–3100 g. p.m.ē., ēģiptologi sauc par 0. dinastijas laiku. Tajā izteikti dominēja Augšēģipte (Dienvidēģipte), kuru pārvaldīja Narmers (Meness), jo šajā laikā tika pakļauta lauksaimnieciski attīstītā, bet vāji organizētā Lejasēģipte (Ziemeļēģipte). Cik mūsdienās ir zināms, Dienvidēģipte salīdzinoši īsa kara laikā sagrāva Ziemeļēģipti. To apliecina, tā sauktā, Narmera plāksne, kuras vienā pusē valdnieks Narmers ir attēlots ar Ziemeļēģiptes kroni, bet otrā pusē – uzvarētie ienaidnieki un Narmers ar Dienvidēģiptes kroni galvā (Segliņš, 2011).

Nākamais vēsturiskais posms Senajā Ēģiptē ir Agrais dinastiju periods (3100–2686 g. p.m.ē. (I un II dinastija)). Tiek pieņemts, ka jaunizveidoto vienoto Ēģiptes valsti Narmers nodod savam dēlam Hor-Aha, kas tiek uzskatīts par senākās dinastijas pirmo valdnieku. Jaunais valdnieks pieņem sev otro karalisko vārdu – Men (Menas, Menes), kas nozīmē “nodibinājis, izveidojis”. Ir zināms arī cits Mena vārda izcelsmes skaidrojums – no vārda Manetho, kas nozīmē Augšējās un Lejas Ēģiptes valdnieks. Hor-Aha Lejasēģiptē nodibina Hikuptahu (Memfisu), tā kļūst par jauno valsts galvaspilsētu, administratīvo un reliģisko centru.

Senā valsts (2686–2160 g. p.m.ē. (III–VI dinastija) ir Ēģiptes tā sauktais “zelta laikmets”. Valdnieks tiek uzskatīts par dieva Hora inkarnāciju, bet kopš V dinastijas – par dieva Re dēlu. Šajā laikā tiek izveidoti paši pazīstamākie Senās Ēģiptes

monumentālās mākslas pieminekļi – piramīdas (Djosea jeb Džosea, Khufu jeb Heopsa un vairāki desmiti citu).

Re kulta augstākās garīdzniecības sēdeklis atrodas Hēliopolē, bet V dinastijas daži valdnieki mazākus Re tempļus izbūvē arī savu kapeņu tuvumā Abū Sirā (netālu no Sakāras). Piektās dinastijas pirmais valdnieks Userkafs (apmēram 2467–2465 g. p.m.ē.) veic būtiskas valsts pārvaldes reformas, kas ierobežo valdnieka varu un centralizēto valsts pārvaldi. Rezultātā nostiprinās iecelto (ne no valdnieka ģimenes) provinču jeb nomu pārvaldītāju vara un attīstās tirdzniecība, pieaug pārticība. Tomēr nākamā valdnieka Sahures laikā sākas tautas nemieri un nomi mēģina atdalīties no valsts, nereti pat sekmīgi karojot. Visai neparasta ir šo provinču pārvalde šajā laikā, jo neviena no tām necenšas kļūt par valsti – tās ir cilšu un pilsētu savienības ar vietēju centralizētu varu. Tas vairāk līdzinās kādai reģionālas pašvaldības formai.

VI dinastijas pirmo valdnieku Teti, iespējams, noslepavo tā apsargs. Dinastija līdz ar to beidzas, un varu faktiski pārņem Pepi II. Šis nav valstij sekmīgs attīstības posms, un centralizētā valsts kļūst aizvien vājāka. To pastiprina vairāki ļoti postoši sausuma periodi (2200–2150 g. p.m.ē.), Nīlā vairs praktiski nav plūdu. Valstī trūkst ūdens, ir bads, izplatās slimības un plosās pilsoņu karš starp dažādām provincēm – tā rakstīts valdnieka ieceltā vietvalža jeb nomarha Ankhtifi kapenēs (Grimal, 1994).

Pirmais pārejas periods (2160–2055 g. p.m.ē. (VII–X dinastija)) ir centrālās varas sagrūšanas periods. Valsts atsevišķās provinces un daļas pārvalda vietvalži, kuri nepakļaujas centrālās formālās varas aktiem. Mūsdienās nav zināms neviens ievērojams šajā laikā izveidots objekts (kapeņas, tempļi, būves), un tas netieši norāda uz centrālās valsts vājumu. Pārejas periodā ir zināmi vairāki duči valdnieku, lielākā daļa no tiem varu spēj noturēt tikai ļoti īsu laiku. Ir konstatēti vairāki gadījumi, kad valstī vienlaikus ir vairāki valdnieki.

Seno Ēģipti šai laikā atkārtoti piemeklē bads, jo Nīlā vairākus gadus pēc kārtas ir ļoti zems plūdu līmenis, un tāpēc lauksaimniecībai nepieciešamais ūdens netiek savākts. Šī laika kapeņu zīmējumos pat redzami izģindušu cilvēku attēli.

Memfisa ievērojami zaudē savu reliģiskā centra nozīmi, un, sākot ar IX dinastijas laiku, par galveno atkal kļūst Hērakleopole. Tajā tiek sagatavoti un izdoti Ēģiptes centrālās varas dekrēti un rīkojumi. Šāda varas centra pārvietošana perioda beigās izraisa asus konfliktus ar tiem valdnieku ģimeņu pārstāvjiem, kuru izcelsme ir Tēbas (mūsdienu Luksora), un tas tikai palielina vispārējos nemierus valstī. Šī iemesla pēc daudzi pētnieki šajā pārejas periodā ieskaita vēl arī vairākus Senās Ēģiptes valdniekus no XI dinastijas sākuma posma (Segliņš, 2011).

Pirmā pārejas perioda laikā notiek būtiskas pārmaiņas ne tikai valsts sociālajā un iekšpolitiskajā jomā, bet arī būvniecībā. Monumentālo būvju, kas būtu celtas pēc valdnieka pasūtījuma, trūkums norāda uz valsts resursu kontroles trūkumu. Tomēr, neskatoties uz to, ka sadrumstalatās valsts daudzie vietvalži ir apmierināti ar centralizētās varas trūkumu, valsts vienotība tomēr tiek atjaunota, iezīmējot Vidējās valsts periodu. Bet, šis vēsturiskais posms jau ir ārpus autora pētījuma apskatītā vēsturiskā laika.

Vienkāršota Senās Ēģiptes valsts attīstības hronoloģiskā shēma ir parādīta 1.1. tabulā. Tā aptver laika periodu no Senās Ēģiptes pašiem pirmssākumiem līdz pat mūsdienu perioda sākumam. Atzīmējams, ka precīzi vēsturisko notikumi datējumi ir zināmi tikai kopš mūsu ēras 664. gada.

1.1.tabula. Senās Ēģiptes valsts periodu hronoloģiskā shēma (Segliņš, 2011)  
 Table 1.1. Chronological scheme of the Ancient Egypt's state periods (Segliņš, 2011)

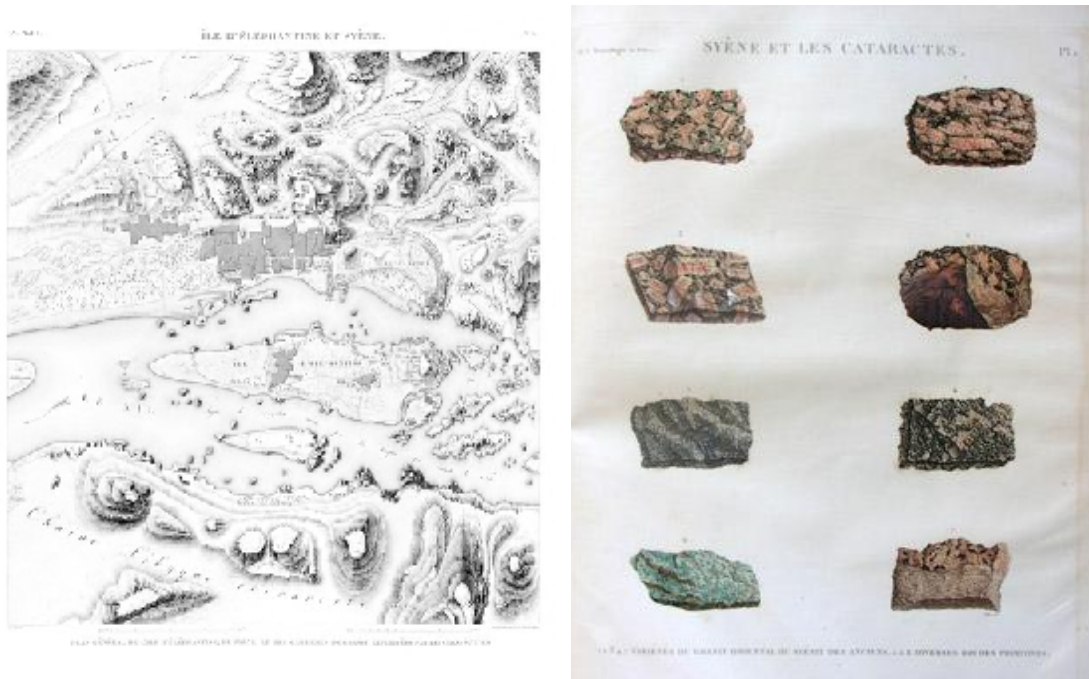
Laiks, gadi	Svarīgākie periodi	Valdnieku dinastijas	Posma ilgums, gadi
Pirms 8800 g. p.m.ē.	Paleolīts		
8800–5200 g. p.m.ē.	Epipaleolīts		3000
6000–5000 g. p.m.ē.	Nabta Plaijas kultūra		1000
5200–4000 g. p.m.ē.	Faijūmas neolīts		1200
4800–4200 g. p.m.ē.	Merimdes kultūra		600
4600–4400 g. p.m.ē.	Elomari kultūra		200
4400–4000 g. p.m.ē.	Badarī kultūra		400
4000–3300 g. p.m.ē.	Mādi kultūra		700
4000–3500 g. p.m.ē.	Nagādas jeb pirmsdinastiju periods	Nagāda I	500
3500–3200 g. p.m.ē.		Nagāda II; 00 dinastija	300
3200–3100 g. p.m.ē.		Nagāda III; 0 dinastija	100
3100–2686 g. p.m.ē.	Agrais dinastiju periods	I, II	400
2686–2160 g. p.m.ē.	Senā valsts	III–VI	500
2160–2055 g. p.m.ē.	Pirmais pārejas periods	VII–XI	150
2055–1650 g. p.m.ē.	Vidējā valsts	XII–XIII	325
1650–1550 g. p.m.ē.	Otrais pārejas periods	XIV–XVII	150
1550–1069 g. p.m.ē.	Jaunā valsts	XVIII–XX	500
1069–664 g. p.m.ē.	Trešais pārejas periods	XXI–XXV	400
664–525 g. p.m.ē.	Vēlais periods	XXVI	139
525–404 g. p.m.ē.	Pirmais persiešu periods	XXVII	121
404–343 g. p.m.ē.	Vēlais dinastiju periods	XXVIII–XXX	61
343–332 g. p.m.ē.	Otrais persiešu periods	XXXI	11
332–305 g. p.m.ē.	Maķedoniešu periods	XXXII	27
323–30 g. p.m.ē.	Ptolemaju periods		293
no 30 g. p.m.ē. līdz 640 g. m.ē.	Romas un Bizantijas periods		670
640–1517	Islāmiskais periods	Islāmiskā perioda sākums	877
1517–1805		Otomaņu (jeb osmaņu) periods	288
1805–1919		Hedivāta periods	114
1919–1953		Monarhija	34
no 1953 līdz mūsdienām		Republika	50+

Turpmākais pētījums apskatīs tieši Senās valsts vēsturisko periodu, īpaši, tā sākuma posmu, kad tiek uzsākta akmens piramīdu un citu sakrālo celtnu būvniecība. Šis periods iezīmē arī būtiskas izmaiņas seno ēģiptiešu ģeoloģiskajās zināšanās.

Ģeoloģisko pētījumu vēsture ir atsevišķi apskatīta promocijas darba 2. nodaļā.

## 2. LĪDZŠINĒJI VEIKTO ĢEOLOĢISKO PĒTĪJUMU APSKATS

Daudzu gadsimtu Ēģiptes izziņāšanas un izpētes laikā, kuru līdz 19. gadsimta nogalei, galvenokārt, veica dažādi ceļotāji, senlietu meklētāji, vēsturnieki, arhitekti, arī militārpersonas un valsts ierēdņi un administratori, ļāva apzināt dabas apstākļu dažādību un sniedza atšķirīgus viedokļus par Ēģiptes fizioģeogrāfiskiem apstākļiem, ģeoloģisko uzbūvi un derīgajiem izrakteņiem. Lai gan jau Napoleona vadītās franču militārās ekspedīcijas laikā tika veikti pirmie Ziemeļēģiptes sistemātiskie ģeoloģiskie un mineraloģiskie pētījumi, diemžēl tā nebija visbiežāk lasītā nodaļa daudzsējumu pārskata darbā „Description de l’Egypte” (1809-1826). „Description de l’Egypte” izdevumā 1813. gadā pirmo reizi tiek publicētas Ēģiptes austrumu tuksneša kartes ar svarīgāko ģeoloģisko informāciju un minerālu aprakstiem, pirmo reizi tiek minēti ieži, no kuriem būvētas lielākās vēsturiskās būves Senajā Ēģiptē – piramīdas un tempļi. Daži piemēri no šīs publikācijas ir parādīti 2.1. attēlā.



2.1. attēls. Gravīru attēli no izdevuma „Description de l’Egypte” (1809), attēlā pa kreisi - vispārējs Elefantīnas salas plāns un senās Asuānas granīta raktuves (Sēj. I, 31.att.); attēlā pa labi – Asuānas granīta variācijas (Sēj. XXI, Syene Et Les Cataractes. H.N., 1.att.)

Figure 2.1. Depiction of plates from „Description de l’Egypte” (1809). On the left – general plan of the Elephantine Island and ancient granite quarries (Vol.I, pl.31); on the right – variation of Aswan granite (Vol. XXI, Syene Et Les Cataractes. H.N. pl.1).

Minētais ir ļoti svarīgs un līdz šim nenovērtēts ieguldījums Ēģiptes un tās senvēstures izpētē, jo izdevums veicina Ēģiptes apzināšanu un izpēti, kā arī no akmens darināto artefaktu un akmens būvju - pieminekļu raksturošanu, iekļaujot arī



datu par izmantoto materiālu. Par šiem jautājumiem autors ziņoja Latvijas Universitātes Zinātniskās bibliotēkas organizētajā zinātniskajā konferencē „Izdevuma „Description de l’Egypte” gravīras kā Ēģiptes vēstures un kultūras liecības” 2009. gada 11. decembrī, savā pētījumā „19. gadsimta gravīras un fotogrāfijas kā nozīmīgs avots Senās Ēģiptes pieminekļu pētījumos”, izceļot tieši augstās minerālu un iežu daudzveidības zināšanas Senajā Ēģiptē.

Tomēr franču pētnieku ierosinātā detalitāte pieminekļu aprakstos ieviešas visai lēni un turpmākajos gados daudzie akmens kultūrvēsturiskie pieminekļi un atsevišķi no akmens materiāla darināti priekšmeti tiek apzīmēti un arī kolekciju katalogos ievietoti ar visneiedomājamākajiem nosaukumiem, kurus savulaik ir piešķīris to atklājējs. Rezultātā minētās kļūdas, pārpratumi un nezināšanas ļāva attīstīties ne vienai vien hipotēzei par seno būvju un izmantoto būvmateriālu visai oriģinālu izcelsmi. Dažas no šādām teorijām joprojām tiek diskutētas populārajā literatūrā, nereti to uztur arī sabiedriskie mēdiji.

Sistemātiski ģeoloģiskie pētījumi Ēģiptē iesākas salīdzinoši vēlu, jo valsts iegūst politisko neatkarību tikai 1954. gadā un līdz tam izteikti dominē tikai lietišķie ģeoloģiskie pētījumi atsevišķu inženierbūvju izveides un kalnrūpniecības uzņēmumu attīstībai. Svarīgi atzīmēt, ka vairums no šiem pētījumu pārskatiem un rezultātiem joprojām neatrodas Ēģiptē un tie nav pieejami arī pētniecībai. Arī mūsdienās pat pamata ģeoloģiskās informācijas pieejamība ir visai nopietni apgrūtināta dažādu iemeslu dēļ, starp kuriem nacionālās drošības un komerciālās intereses ir noteicošās. Papildus ir jāņem vērā, ka valsts dienestos sagatavotā vai akceptētā informācija ir tikai arābu valodā (bet vietvārdi - vidusēģiptes dialektā), tādēļ pat dažādu materiālu savstarpēja sasaite un korelācija ne vienmēr ir iespējama, pietiekoši korekta un zinātniski pamatota.

Vienlaicīgi kontrastējot ar pagājušā gadsimtā visai ierobežotajiem sistemātiskiem ģeoloģiskajiem pētījumiem, to attīstībai nozīmīgu impulsu sniedz arheoloģiskie atklājumi. Šajā nozīmē mazāk būtu izceļamas materiālās vērtības, kā arī seno rakstu atšifrēšana un analīze. Bet, kā izcilākais apskatāmajā kontekstā ir Turīnas papirus (Turīnas Ēģiptoloģijas muzejā Itālijā) (2.2. attēls). Dokumenta studijas uzskatāmi norāda uz izciliem panākumiem ģeoloģiskajos pētījumos Senajā Ēģiptē (Harrell, Brown, 1992). Cik tālu tas ir mūsdienās zināms, tieši Ēģiptē tiek izveidotas pirmās ģeoloģiskās kartes un tām Vidējās valsts laikā ir visai atzīstama ģeoloģiskās informācijas noslodze. Uz Turīnas papirusa ir attēlota senākā saglabājusies Ēģiptes topogrāfiskā karte. Tajā ir attēlotas zelta un sudraba atradņu atrašanās vietas Nīlas ielejas austrumu tuksnesī un apkārtnē esošo ceļu virzieni.



2.2. attēls. Turīnas papirusa fragments, kurā attēlota shematiskā karte.  
Figure 2.2. Fragment of the Turine Papyrus depicting a schematic map.

Mūsdienās sistemātiski Ēģiptes Arābu Republikas ģeoloģiskie pētījumi iesākas ar sava veida koordinējošās struktūras izveidi, kas reģistrēja un uzskaitīja

veiktos derīgo izrakteņu pētījumus valstī un tā ātri pārtapa par administratīvu struktūrvienību. Ēģiptes ģeoloģiskais dienests tiek izveidots 1896. gada 8. martā kā atbildīgā institūcija par vietējo būvmateriālu pieejamību valsts teritorijā un tā darbību pārrauga kā vietējā administrācija, tā arī Britu ģeoloģiskais dienests. Tas tika apvienots ar topogrāfisko dienestu un 1912. gadā iznāk pirmās 6 lapas M 1: 1 000 000 ar ļoti vienkāršotu ģeoloģisko informāciju par galvenajiem pamatiežu litotipiem un atsevišķām norādēm uz atspoguļoto iežu iespējamo vecumu. Tas nav sevišķi sarežģīti, jo atspoguļotās teritorijās dominē kvartāra tuksneša nogulumi, kas arī aizņem kartēs absolūti dominējošo lomu. Bet, 1928. gadā jau tiek izdots Ēģiptes atlants ar kartēm M 1 : 1 000 000, kur ir izdalīti mezozoja (karbons, triass, juras un krīta nesadalīta slāņkopa) un kainozoja (terciāra) veidojumi. Turpmākos gados nozīmīgākie pētījumi tiek veikti ūdensapgādes risinājumiem oāzēs un militārām vajadzībām Kairas apkārtnē. Tikai 1956. gadā tiek izveidots nacionālais ģeoloģiskais dienests Ēģiptes rūpniecības ministrijas pakļautībā, bet kopš 1984. gada tas kļūst par departamentu Ēģiptes Naftas un minerālu nodrošinājuma ministrijā.

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.

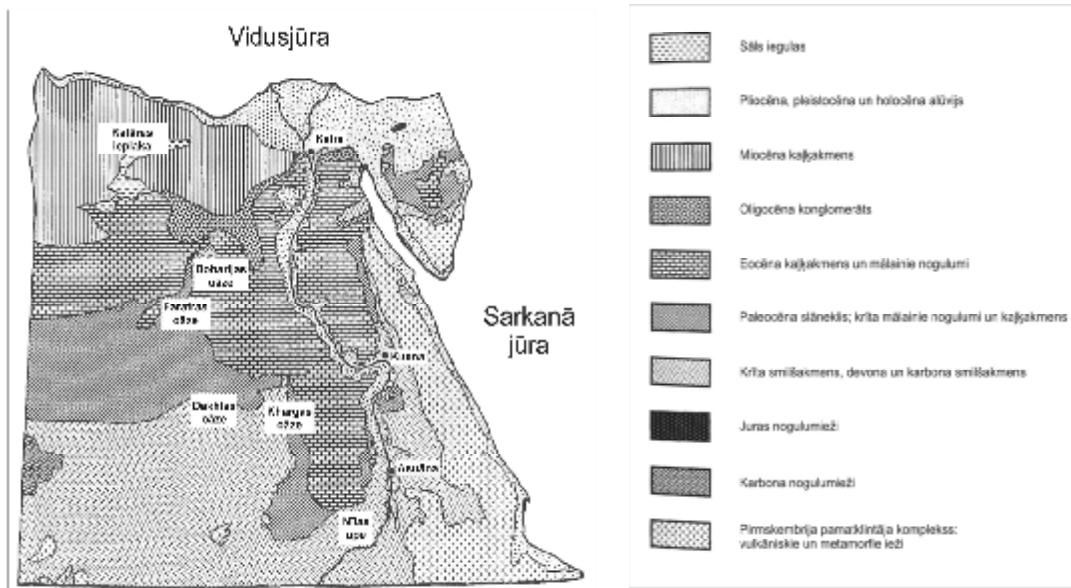
1984. gadā tiek publicētas divas lapas Dienvidēģiptē (Asuāna un Kena) ģeoloģiskām kartēm M 1 : 500 000 sadarbībā ar ASV Valsts ģeoloģiskā dienesta speciālistiem, kas veica arī nepieciešamos lauka darbus. Kopš 1984. gada sadarbībā ar Britu ģeoloģisko dienestu ir realizēti pētījumi 6 lapu izdošanai M 1 : 250 000, kā arī 13 lapas M 1 : 100 000 un šīs teritorijas ir noteiktas kā valstij nozīmīgas minerālo resursu ieguvei (Ziemeļēģipte un Sinaja). Turpmākajos gados tiek veikta tikai atsevišķu zemes dzīļu ieguvei nozīmīgu teritoriju ģeoloģiskā kartēšana mērogā 1 : 10 000, 1 : 5 000 un 1 : 2000. Tie ir komerciāli darbi un to rezultāti nav pieejami turpmākajai pētniecībai un apskatam.

Līdz šim Ēģiptes teritorijas ģeoloģiskā izpēte nav bijusi detalizēta pat salīdzinājumā ar citām Āfrikas valstīm, un viens no pašiem svarīgākajiem iemesliem ir ļoti plašās tuksnešu teritorijas, par kurām uzkrātais faktisko ģeoloģisko pētījumu materiāls ir visai ierobežots. Tāpēc fakti par Ēģiptes ģeoloģiskās uzbūves galvenajiem elementiem balstās uz pētījumiem Nīlas ielejā un augstas detalitātes pētījumiem valsts ziemeļaustrumos, kas ir bagāti ar naftas un dabas gāzes resursiem.

Rezultātā Ēģiptē pat vispārīgā stratigrāfiskā shēma un ģeoloģiskā griezuma raksturojums līdz šim nav unificēti, bet to vēl vairāk sarežģī dažādas reģionālās shēmas un stratigrāfiskās konstrukcijas ar ļoti lielu pēc vietvārdiem veidoto nosaukumu dažādību. Ņemot vērā, ka arābu valodā netiek pierakstīti patskaņi, tad šo nosaukumu daudzveidība angļu vai citā Eiropā plašāk lietotā valodā ir vēl lielāka un kāda salīdzinošā shēma vai sinonīmu vārdnīca šobrīd nav pieejama. Tādēļ turpmākam raksturojumam promocijas darba vajadzībām mēs pieturēsimies pie nosaukumu rakstības angļu valodā un to tradicionālas transliterācijas latviešu valodā, pēc nepieciešamības, iekavās norādot nosaukumu rakstību angļiski.

Ēģiptē ir oficiāli apstiprināta stratigrāfiskā shēma un pamatgriezuma raksturojums un tas ir publiski pieejams Ēģiptes Naftas un minerālu nodrošinājuma ministrijas mājas lapā. Šī shēma ir pamata aspektos korelēta ar kaimiņvalstu ģeoloģiskās attīstības galvenajiem posmiem. Diemžēl šo shēmu un atbilstošo terminoloģiju Ēģiptē lieto tikai derīgo izrakteņu meklēšanas un ieguves licenču izsniegšanas vajadzībām un zinātniskos pētījumos uz to neatsaucas. Retāk šo shēmu

izmanto par pamatu dažiem valsts pasūtītiem pētījumiem un izvērtējumiem. Vienkāršota Ēģiptes ģeoloģiskā karte ir parādīta 2.3. attēlā.



2.3. attēls. Shematiska Ēģiptes ģeoloģiskā karte (pēc Sampsell, 2003)  
Figure 2.3. Schematic Geological Map of Egypt (after Sampsell, 2003)

Visplašāk tiek lietota Ēģiptes naftas kompāniju konsorcijs izstrādātā un uzturētā stratigrāfiskā shēma un tās detalizēti apraksti. Tās pamats ir oficiāli publicēts (Klitzsch, List, 1989; Klitzsch *et al.*, 1986-87) un turpmākie papildinājumi tiek publicēti īpašā citējamā zinātniskā žurnālā „GeoArabia”, kas ir Starptautiskās Stratigrāfijas Komisijas (ISC) oficiālais avots šajā reģionā (Starptautiskā Stratigrāfijas Komisija). Diemžēl šī shēma apskata tikai to Ēģiptes reģionu, kas atrodas Sarkanās jūras piekrastē, Sinajā un uz austrumiem no Kairas. Tādējādi tajā nav iekļauta Nīlas ieleja un tās tuvākā apkaime un mūsu vajadzībām šie pētījumi nav tieši izmantojami. Piebilstams, ka šī ir jauktas struktūras shēma, kurā dominē litostratigrāfiskas vienības un to robežas gandrīz vienmēr ir pamatotas tikai ar ģeofizikāliem datiem, bet stratigrāfisko vienību paleontoloģiskais un nogulumu vecuma datējumu skaits ir visai ierobežots.

Minētais attiecas arī uz valsts teritorijas uzmērīšanas un kartogrāfiskajiem datiem – tie joprojām ir tikai orientējoši, pat tad, ja ir pieejamas kartes un norādīti to mērogi. Valsts drošības apsvērumu dēļ pamatotas un detalizētas topogrāfiskās kartes ģeoloģiskajiem pētījumiem ir pieejamas tikai par atsevišķām ierobežotām teritorijām. Tādēļ valstī ģeoloģiskie pētījumi tiek veikti tikai pēc vietējām koordinātu sistēmām, kuras pēc tam atbildīgā valsts institūcija apkopo un veic nepieciešamos pārrēķinus. Ievērojami vājāks ir arheoloģisko pētījumu topogrāfiskais nodrošinājums un, saņemot atļaujas uzsākt pētījumus, misijai ir jānodrošina sava objekta topogrāfiskā uzmērīšana, kā arī piesaiste izsniegtiem plāniem. Diemžēl izsniegtie plāni kā Gīzas, tā arī Sakāras teritorijai ir izgatavoti Otrā pasaules kara laikā, bet arheoloģiskās misijas tikai dažos gadījumos piesaista profesionālus kartogrāfus. Rezultātā mūsdienās, piemēram, Sakārā, nav dabā atrodamas vairāk kā puse no iepriekšējo gadu arheoloģisko

izrakumu vietām, bet jaunatsegte pieminekļi tiek noklāti ar smiltīm jau turpmāko desmit gadu laikā.

Iepriekšēji minēto nenoteiktību un ģeoloģiskās uzbūves aprakstu komplicētību dēļ arheoloģiskos un ģeoarheoloģiskos pētījumos tiek lietotas angļu koloniālā laika ģeoloģiskās kartes un savulaik izveidotie ģeoloģiskie apraksti (Sanford, Arkell, 1929; Ball, 1939). Tie arī mūsdienās joprojām tiek izmantoti par pamatu arheoloģisko pētījumu veikšanai Ēģiptē, it īpaši Nīlas ielejā attiecībā uz vēsturisko posmu līdz Jaunās valsts periodam.

Vienlaicīgi pēdējo 20 gadu laikā ir salīdzinoši daudz dažādu zinātniskās sadarbības projektu rezultātā sagatavotu pētījumu par Ēģiptes ģeoloģiju, kas ir publicēti dažādās pasaules valstīs kā pārskati. Tie kopumā ir salīdzinoši kvalitatīvi attiecībā uz analītisko pētījumu daļu, bet diemžēl gandrīz nekad nesatur pietiekoši viennozīmīgas norādes uz novērojumu veikšanas vietu, kā arī nesatur šo vietu aprakstus. Būtisks to trūkums ir ģeoloģisko karšu visai vienkāršota stratigrāfiskā piesaiste (visbiežāk aprobežojoties – no klints nobīrām vietā „N” un tamlīdzīgi). Tomēr starp šādiem augstvērtīgiem analītiskiem pētījumiem noteikti izceļami R. un D. Kemmu darbi (Klemm, Klemm, 1993; Klemm, Klemm, 2008).

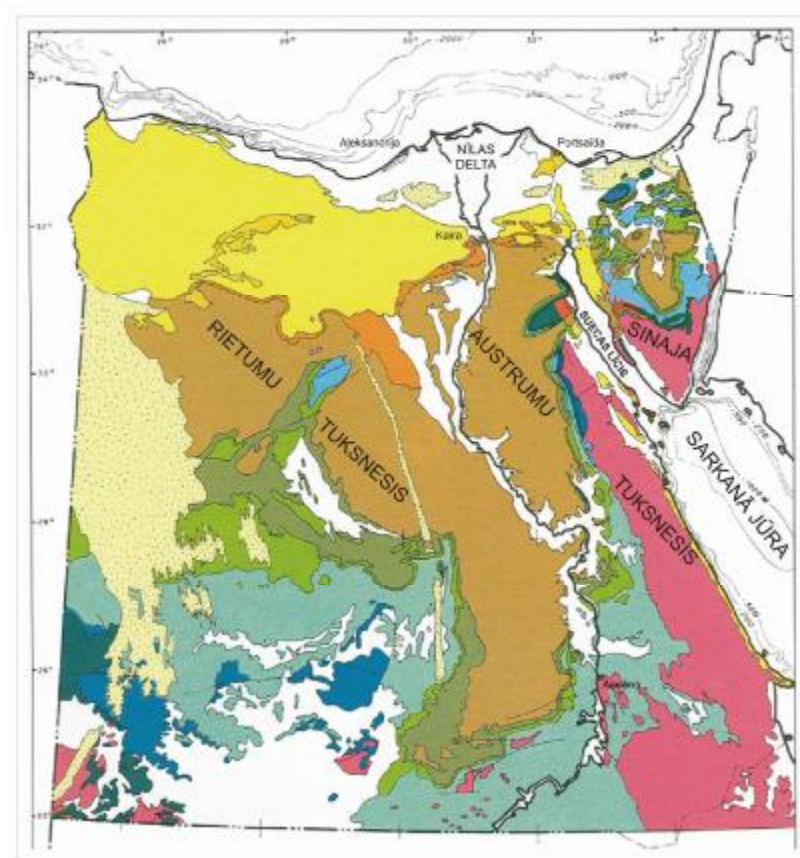
Atsevišķi apskatāmi ir ģeoloģiskie apskata pētījumi, kas adresēti plašākam lietotāju lokam, galvenokārt, ārvalstu studentiem, jo daudzās, it īpaši ASV universitātēs, diezgan populāri ir lauku vai lietišķās ģeoloģijas studiju kursi, kas tiek realizēti Ēģiptē (Sampsell, 2003). Pēdējos gados vairāk ir arī ģeologu un tūristu, kas interesējas par apskatei pieejamiem ģeoloģiskiem objektiem Ēģiptē un to vajadzībām ir pieejami atsevišķi izdevumi, kas pēc kvalitātes un ģeoloģiskās informācijas pamatotības nav būtiski sliktāki par studijām un pētniecībai paredzētajiem.

## 2.1. Ieskats par Ēģiptes ģeoloģisko uzbūvi

Ēģiptes teritorija ir piederīga Āfrikas litosfēras plātnes kontinentālajai daļai, tās ziemeļaustrumu daļai, kur to šķēļ vairāki dziļlūzumi un ir izveidojušās vairākas atšķirīgas tektoniskās struktūras. Tās nodala savā starpā Ēģiptes Arābu Republikas divas galvenās daļas – apm. 1 milj. km<sup>2</sup> plašo teritoriju, kas ir tieši piederīga Āfrikas kontinentam (Nūbijas tektoniskā plātne) un apm. 62 tūkst. km<sup>2</sup> salīdzinoši savrupo Sinajas pussalu (Sinajas tektoniskā plātne). Vairākas paralēlas dziļlūzumu zonas Sarkanās jūras teritorijā nodala Ēģipti no Arābijas pussalas (Arābijas tektoniskā plātne), un paralēli tām ir izvietotas mazāk aktīvi dziļlūzumi, kurus uzskatāmi iezīmē mūsdienu Nīlas tecējums. Sekundāras nozīmes dziļo lūzumu zonas iezīmē Nīlas trīs krāču joslas, kā arī viegli atpazīstamās Nīlas mierīgā tecējuma pēkšņas meandrēšanas zonas. Tikai terciārās nozīmes lūzumi, kuru saistība ar dziļlūzumiem ir nepietiekoši konstatēta, ir dabā atpazīstamas krasas apkārtējā reljefa formu maiņu iemesls, tās tiek apzinātas un kartografētas īpaši, jo tieši šeit visbiežāk tiek konstatētas zemestrīces ar magnitūdu virs 5 ballēm. To novērošanai Ēģiptē ir izveidots nacionālas nozīmes seismisko novērojumu tīkls, tas papildināts ar vietējo novērošanas staciju tīklu Pasaules kultūras mantojuma pieminekļu teritorijās (Gīzā un Sakārā) un tiek plānots to papildināt nākotnē. Ēģiptes Arābu Republikas nacionālais seismisko novērojumu tīkls caur Vidusjūras reģionālo tīklu ir ietverts vienotā pasaules seismisko novērojumu sistēmā.

Ēģiptes ģeoloģiskajā griezumā virs 35-40 km dziļumā esošās Moho robežas, pamatklintāju veido magmatiski plutoniski un efuzīvi, kā arī metamorfi ieži

(2.4.attēls). Tie ir ļoti atšķirīga sastāva un visai mainīgi, kā dēļ tie pat ģeoloģiskās kartēšanas laikā nav tikuši atsevišķi nodalīti. Tie ir izplatīti visā valsts teritorijā, bet zemes virspusē vai zem plānas kvartārnogulumu segas tie atsedzas aptuveni 10% no valsts teritorijas, galvenokārt, Sinajas pussalas dienvidos un Ēģiptes pamata teritorijas austrumos – Sarkanās jūras piekrastes teritorijās (galvenokārt, metamorfie ieži). Detalizētāk ir pētīti tikai atsevišķi plutoni Ēģiptes dienvidos Asuānas apkārtnē, kur tie veido virkni šādu nelielu plutonu perpendikulāri Nīlas tecējumam visā teritorijā līdz pat robežai ar Sudānu. Tie ir granīta plutoni ar visai atšķirīgu petrogrāfisko sastāvu, bet šo plutonu savstarpējā ģenētiskā un telpiskā saistība līdz šim nav zināma. Pamatklintāja ieži ir vairākkārtīgi datēti ar atšķirīgām metodēm, iegūstot visai kontrastainus lielumus, tādēļ kopumā kristāliskā pamatklintāja vecums mūsdienās tiek vērtēts tikai aptuveni, pieņemot, ka tas ir senāks par 2 miljardiem gadu (Tawadros, 2001).



2.4. attēls. Vienkāršota Ēģiptes ģeoloģiskā karte (pēc Schlumberger,1984).  
Figure 2.4. Simplified geological map of Egypt (after Schlumberger,1984).

Pamatklintāja virsma nav līdzena un to daudzos atsevišķos blokos sadala lūzumi, bet kopumā šī virsma no dienvidiem, kur tā atrodas zemes virspusē vai līdz 100-120 m dziļumā, salīdzinoši vienmērīgi pazeminās Vidusjūras virzienā, bet Kairas un Aleksandrijas apkārtnē tā ir apzināta aptuveni 7 km dziļumā.

Pamatklintāja virsmu ar visai ievērojamu ģeoloģisko diskordanci pārsedz paleozoja kontinentālas izcelsmes klastiskie ieži un šo salīdzinoši maz mainīgo sedimentācijas posmu noslēdz ļoti plašā vēlā karbona – agrā perma jūras transgresija. Devona („Nūbijas –C”) slāņkopu raksturo vāji cementēti smilšakmeņi un to maksimālais biezums sasniedz gandrīz 2 km. Tos pārsedz apakšējā karbona alerolītu un argilītu slānis, kas ir marķējošs horizonts visā Ziemeļāfrikā, bet to pārsedz vēlā karbona smilšakmeņi („Nūbijas –B”) sasniedzot 800 m biezumu. Bet, Karbona pašās beigās veidojas transgresīva argilītu un aleirolītu slāņmija līdz pat 100 m biezumā, un tā noslēdz iepriekšējo ģeoloģiskās attīstības posmu.

Jaunu posmu ievada ilgstošs salīdzinoši intensīvas erozijas laiks, kur, īpaši Ēģiptes dienvidos, iepriekšēji izveidojušies ieži tiek denudēti un tie ir saglabājušies tikai fragmentāri. Minētajā erozijas posmā veidojusies virsma ir raksturīga ne tikai Ēģiptē, bet arī kaimiņvalstīs, un arī Saūda Arābijā.

Raksturīgo erozijas virsmu visā Ēģiptes teritorijā pārsedz juras perioda un krīta perioda sākuma nesadalīta, līdz 570 m bieza faciāli mainīga („Nūbijas –A”), slāņkopa, kurā mijas kontinentālos apstākļos veidojušies smilšakmeņi, bet Ēģiptes ziemeļos – vairāku jūras transgresiju laikā veidojušies argilīti un aleirolīti.

Vēlā krīta epohā gandrīz visu Ēģiptes teritoriju sedz jūra, tās attīstībā tiek izdalītas vairākas transgresijas un regresijas, bet to veidotos nogulumus nozīmīgu naftas atradņu dēļ detalizēti iedala vairākās slāņkopās (retāk tās tiek dēvētas par svītām). Ģeoloģiskajā griezumā to ieži secīgi pārsedz juras un krīta stratigrāfiski nesadalītos veidojumus. Tā, Rahas svīta atšķiras ar ritmisku argilītu un aleirolītu slāņu miju ar smilšakmens un dolomīta slāņiem, kuru noslēdz biezs argilītu slānis, un kopā šī svīta sasniedz pat 500 m biezumu.

Rahas svītas nogulumus pārsedz Abukadas svītas smalki smilšainu aleirolītu līdz 85 m bieza slāņkopa, kas ir bagāta ar organisko vielu, un kura ir viena no bagātākajām naftas cilmežu slāņkopām Ēģiptē. Augstāk iegul Vatas un Matulas svītas nogulumi, kas ir ritmiski kārtoti līdzīgi iepriekšēji aprakstītajiem Rahas svītas nogulumiem, un šo svītu summārais biezums var sasniegt pat 650 m. Matulas svītas pašā augšējā daļā ir zināms līdz 30 m biezs kontinentālās klastiskās sedimentācijas apstākļos veidojies dažādgraudaina smilšakmens slānis, kas ir raksturīgs reģionāls marķējošais horizonts.

Augstāk iegulošie Sudras (Čalkas) svītas masīvu kaļķakmeņu un dolomītu slāņi pārklāj Matulas svītas veidojumus ar izteiktu leņķisku diskordanci, kas iezīmē jauna sedimentācijas posma attīstību. Ēģiptes ziemeļaustrumos šīs svītas nogulumu biezums var sasniegt pat 1 km, bet Ēģiptes vidusdaļā tie reti ir biezāki par 70-100 m. Tos pārklāj Esnas (Oveinas un Šareivnas) svītas smalki smilšaini argilīti un aleirolīti līdz pat 500 m biezumā, bet slāņkopai ir raksturīgas divas daļas ar izteiktu diskordanci starp tām. Ar šo diskordances virsmu Ēģiptes centrālajā un ziemeļdaļā ir saistīti evaporītu (akmenssāls) veidojumi, kas var sasniegt pat vairāk kā 100 m biezumu. Pēdējo gadu laikā ir noskaidrots, ka šī raksturīgā diskordances virsma ir veidojusies krīta perioda pašās beigās, kad šajā teritorijā veidojas plaši piekrastes lagūnu ezeri, un ievērojama Ēģiptes dienviddaļa kļūst par sauszemi. Šeit notiek iepriekšēji izveidojušos nogulumu erozija. Evaporītu uzkrāšanās iezīmē paleocēna sākumu un

turpmāk veidojas sāļus saturošu argilītu slāņi. Ēģiptes ziemeļos šo slāņkopu izdala atsevišķi kā Šarveinas svītu (kuras veidošanās laiks šeit daļēji aptver arī apakšējā eocēna laiku), bet Ēģiptes vidusdaļā un dienvidos izdala vien nesadalītu Esnas slāņkopu.

Esnas slāņkopu pārsedz gandrīz tikai no dolomītiem sastāvošas Tēbu svītas nogulumi. Tiem raksturīgs ļoti liels skaits ģipša un anhidrīta ieslēgumu, lēcu un slāņu, it īpaši Ēģiptes ziemeļos un ziemeļaustrumos, kur šīs svītas nogulumu biezums var sasniegt pat 1400 m biezumu. Tos ar ļoti izteiktu diskordanci un raksturīgām izskalojuma pēdām pārsedz „Eocēna LS” dolomītu slāņkopa ar ļoti raksturīgiem senu koraļļu rifu naftas kolektoriem. Šo eocēna ģeoloģisko griezumā daļu turpina raksturīga reģionāla erozijas virsma, virs kuras pēc litoloģiskām pazīmēm tiek izdalīti vairāki raksturīgi slāņi (no apakšās uz augšu): aleirolītu Karditas sērija, ar glaukonītu bagātinātu kaļķakmeņu slāņi (Grīnbedas slāņi), tos pārklāj ar ģipšiem bagātu merģeļu slāņi un šo ģeoloģiskā griezumā daļu noslēdz masīvi Tankas slāņu kaļķakmeņi. Uzskaitītās slāņkopas biezums Ēģiptes ziemeļos var sasniegt pat 2400 m.

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

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

Ģeoloģisko griezumā noslēdz pliocēna un kvartāra veidojumi, kas Vidusjūras piekrastes teritorijā var sasniegt pat 4 km biezumu. Pliocēna ģeoloģiskais griezumā šeit ir analogs miocēna vidējas daļas ģeoloģiskam griezumam, kur dominē kaļķakmeņi un pakļauta nozīme ir vāji cementēta smilšakmens un aleirolīta slāņiem, vietām sastopami arī dolomīti. Raksturīgi kvartāra nogulumi tuksnešu teritorijās ir smiltis, Nīlas ielejā tie ir visai daudzveidīgi aluviālie nogulumi, bet Vidusjūras un Sarkanās jūras piekrastē arī dominē smilšaini nogulumi, lai gan apmēram 15% teritorijas ir zināmi arī mūsdienu koraļļu rifi (Said, 1990).

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

Ēģipte ir ne tikai liela un sena, bet arī ļoti daudzveidīga un ne mazāk kontrastaina valsts. Ēģiptes teritorija mūsdienās ir gandrīz viens miljons kvadrātkilometru - 1,5 reizes lielāka par Franciju vai Ukrainu. Kopš senatnes apdzīvota ir gandrīz tikai Nīlas ieleja (apmēram 0,5% valsts teritorijas), kurā koncentrējas vairāk kā 95% no valsts iedzīvotājiem. Laika gaitā ir mainījušies valsts izmēri, iedzīvotāju skaits un blīvums, tomēr tendence uz ļoti augstu koncentrāciju

ierobežotā telpā ir bijusi raksturīga šeit vismaz pēdējos 5 tūkstošus gadus. Netieši tas norāda, ka iedzīvotājiem (kas Romas impērijas laikā jau sasniedza apmēram 18 miljonus) vienmēr ir bijusi atkarība no dabas resursu pieejamības ārpus šaurās Nīlas ielejas, kas nekad nav bijuši pietiekami ne daudzuma, ne arī kvalitātes ziņā (Wilkinson, 2011).

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.

Senie ēģiptieši ir lauksaimnieki un tieši saimnieciskie panākumi lauksaimniecībā nodrošināja iedzīvotāju labklājību, pārticību un valsts attīstību. Tā ir palu lauksaimniecība, kas balstās uz Nīlas palu ūdens racionālu apsaimniekošanu visā gada garumā, ļaujot iegūt trīs ražas gadā. Tomēr valstī tieši ūdens ir kritiskais resurss un tā pieejamība nosaka apdzīvotību. Tādēļ saprotams, ka jau Senās Ēģiptes valstiskuma sākuma posmā ir izstrādāts ne tikai ļoti precīzs plūdu prognožu kalendārs, bet arī ūdens līmeņu monitoringa sistēma (nilometri ir izvietoti visos tempļos pie Nīlas) un komplicēta Nīlas ūdens patēriņa uzskaites un norēķinu kārtība par ūdens izmantošanu. Šajā nozīmē Ēģiptes Senās valsts jau pašā sākumā ir izveidota ļoti mūsdienīga resursu apsaimniekošanas un pārvaldības sistēma, kas joprojām nav ieviesta daudzās pasaules valstīs.

Atšķirīgi tiek novērtēti artēziskie pazemes ūdeņi - avoti Nīlas ielejas nogāzēs. Tie gandrīz vienmēr tiek uzskatīti par svētiem un šeit tiek ierīkoti dažādi tempļi un lūgšanu vietas. Pazemes ūdeņu atslodzes vietās tuksnesī veidojas oāzes un tās visas jau Senās Ēģiptes laikā ir apdzīvotas. Oāzēs optimālās aku izveides vietas tika noteiktas ar rīkstniecību. Atzīmējams, ka oāžu lauksaimniecības platības un lopu skaits tiek limitēts atkarībā no pieejamā ūdens daudzuma - tas tika noteikts empīriski, un nav zināms neviens gadījums, kad kāda oāze būtu tikusi pamesta ūdens izsīkuma dēļ līdz pat laikam, kad valsti iekaro Grieķija. Tādējādi arī šajā ziņā bilances metožu apgūšana un patēriņa regulēšanas jaunievedumi Senajā Ēģiptē daudzām valstīm būtu jāpārņem arī mūsdienās (Wengrow, 2006).

Kā otrs nozīmīgākais resurss, kas ir tieši saistīts ar Nīlu ir plūdu nestās dūņas, kas kopš vēlā akmens laikmeta šeit tiek izmantotas lauku mēslošanai. Plūdi 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 uzskatāmi par daudz attīstītākām tehnoloģijām kā mūsdienās joprojām plaši izmantoto kūdras un sapropeļa izmantošanu augsnes uzlabošanai, kas ne vienmēr tiek balansēta ar augsnes sastāva īpatnībām un papildus kaļķošanu.

Tomēr Nīlas dūņas jau kopš akmens laikmeta tiek izmantotas arī citiem mērķiem. Tā ir kleķa būvmateriālu izgatavošana un tie nebūt nav tikai saulē kaltēti kleķa ķieģeļi, bet arī saistvielas un apdares materiāli. Tieši pirmo dinastiju laikā Senajā valstī no vienkārša un lēta būvmateriāla kleķa ķieģeļu izgatavošana kļūst par būtisku amatniecības nozari, kas spēja ar atbilstošiem būvmateriāliem nodrošināt valsts pasūtījumus lielu tempļu un valdnieku sakrālo būvju izveidei. Šajā laikā tiek ieviesta izejmateriāla skalošana, kas ļauj iegūt pietiekami tīru no nevēlamiem piemaisījumiem mālaini - aleirītisku masu un atsevišķi arī skalotu aluviālo smilti tālākais izmantošanai par liesinātāju un apmetumiem. Šajā laikā tiek izstrādātas ne tikai tehnoloģijas skalošanas procesu realizācijai, bet arī sieti ar dažādu raupjumu, izstrādāts aprīkojums izejmateriāla sajaukšanai un vidējošanai, tiek ieviestas piedevas struktūras uzturēšanai, noteiktas to proporcijas, tiek izstrādāti vairāki standartizēti



kleķa ķieģeļu izmēri, kā arī prasības žāvēšanas ilgumam un apstākļiem, arī gatavās produkcijas uzglabāšanai un transportēšanai līdz būvobjektam. Par to atbildēja ražotājs un apliecināja ar savu amatnieka zīmogu, kas būtu viens no pirmajiem masveida ražošanas zīmoliem pasaulē (Nicholson, Shaw, 2009).

Palielinoties būvniecības apjomiem, kleķa ķieģeļu tradicionālās ražošanas vietas nav pietiekošas, tās tiek meklētas pēc līdzības un ar daudzām kļūdām un neveiksmēm. Tās joprojām ir konstatējamās pat savā laikā ļoti atbildīgās būvēs (valdnieku kapenēs) kā sabirzuši un izjukuši ķieģeļi, būvju sienu deformācijas. Lai arī mūsdienās daudzās pasaules valstīs, arī mūsdienu Ēģiptē, kleķa ķieģelis ir ļoti izplatīts būvmateriāls, Senajā valstī jaunākās inovācijas ir saistītas ar atbilstošas kvalitātes dūņu meklēšanu. Tās ir ļoti nozīmīgas prasmes, jo novērtētā kvalitāte ir noderīga tikai pusgadu, līdz nākamie upes plūdi vismaz daļēji maina jau novērtēto izejvielu kvalitāti, vai vispār aizskalo visu „atradni”. Tas nozīmēja, ka ģeoloģiskās pētniecība un resursu kvalitātes izvērtēšana ir veicama ļoti īsos termiņos un izpēte tiek apvienota ar ieguvī. Ne vienmēr tas ir izdevies veiksmīgi, par ko liecina daudzie bojājumi senajās celtnēs tieši neatbilstošu izejvielu dēļ. Tomēr pati pieeja joprojām ir visai izplatīts paņēmiens, jo īpaši kļiedņu atradnēs.

Kleķa izstrādājumi nav vienīgais materiāls, kas tiek iegūts no Nīlas mālainajām dūņām. Šis materiāls pēc tā skalošanas (nevajadzīgo piemaisījumu atdalīšanas) ir ļoti labs izejas materiāls keramikas izstrādājumu izgatavošanai Senajā Ēģiptē jau kopš vidējā akmens laikmeta. Šeit ļoti ātri tiek apgūta arī keramikas apdedzināšana un podnieka ripa (Senās valsts laika reliģiskajos priekšstatos tieši uz podnieka ripas dievs Khnums rada cilvēkus). Pirms valsts apvienojas apm. 3 tūkstošus gadus pirms mūsu ēras, Senajā Ēģiptē jau ir visai attīstītas tradīcijas keramikas trauku un māla rotaļlietu izgatavošanā. Dažāda keramikas trauku izgatavošanas kvalitāte, forma un rotājumi mūsdienu arheologiem ir ļoti drošas pazīmes vecuma noteikšanai tajā vai citā apmetnē vai apbedījumā (Midant-Reynes, 2000).

Ja neskaita dažādas kļūdas un neveiksmes vai unikālus izstrādājumus, tad šajā laikā ir zināmi trīs galvenie keramikas izstrādājumu veidi. Tā ir tradicionālā illītu mālu keramika sadzīves vajadzībām, kas tiek dažādota ar formu un dekorējumiem - ņemot vērā visai ievērojamo iedzīvotāju skaitu un vajadzības, gadā šādu saražoto trauku skaits ir mērāms miljonos, kas pat mūsdienās daudzām valstīm ar mūsdienu tehnoloģijām nebūtu pa spēkam. Svarīgs ir arī resursu ieguves un kvalitātes novērtēšanas aspekts, kas šāda produkcijas apjoma saražošanai ir ļoti nozīmīgs. Otrs izplatītākais keramikas veids ir augsti poraina keramika pārtikas uzglabāšanai vēsumā, kas ir ļoti svarīgs katrā mājāsaimniecībā. Tā tiek iegūta, noteiktā proporcijā māliem piejaucot klāt sasmalcinātu kaļķi vai arī sasmalcinātas koksnes gabaliņus. Tas norāda, ka noteiktas kvalitātes viegli drupināmi un smalcināmi kaļķi bija jāatrod un jāpiegādā keramikim tālākai izmantošanai. Trešais keramikas veids tika gatavots tikai Augšēģiptē, kur Nīlas dūņas ir dabiski bagātinātas ar kaolinītu, kas ļāva iegūt porcelānveidīgu māla keramiku ar ļoti cietu un skanīgu garoziņu. Šāda keramika arī ir zināma jau no akmens laikmeta beigām, bet Senās Ēģiptes laikā šo dūņu kvalitāte lielražošanai vairs nav pietiekama, jo ir mainīga. Tādēļ tiek meklētas un arī atrastas balto mālu (kaolinīta) iegulas granītu dēdēšanas garozās un šis māls tiek izmantots Nīlas dūņu illīta māla bagātināšanai, līdz var tikt iegūta noteiktas kvalitātes porcelānveidīga keramika.

Līdzīgi tiek meklētas un arī sekmīgi atrastas dabisko krāsvielu iegulas, sāls un sodas, pusdārgakmeņu un dārgakmeņu kļiedņi un dzīslas, zelta un vara rūdas. Zināms izņēmums ir dzelzs, kuru jau Senajā Ēģiptē prot iegūt un apstrādāt, bet tas ir izcili

rets, jo vienīgā tajā laikā zināmā izejviela ir meteorīti („debesu dzelzs”) (Segliņš, 2011). Šādi jau Senās valsts laikā tiek meklēti un saimnieciskajā dzīvē iekļauti aptuveni 85-90 minerāli un to paveidi. Tas ir vairāk nekā Eiropā XV gadsimtā. Arī rūdu meklēšanas, diagnostikas un izsekošanas veidi (par ko liecina pamestās atradnes) ir tieši tādi paši kā tos pēc vairāk kā 3,5 tūkstošiem gadu apraksta Agrikola savā pazīstamajā darbā *De Re Metallica* (1556) (Agricola, 1950). Vienīgais izņēmums ir visai ierobežotā pazemes vertikālo izstrādņu attīstība kalnrūpniecībā un ļoti attīstīta markšeiderija sarežģītu horizontālo tuneļu sistēmas izveidei. Uzskatāmākie līdz mūsdienām saglabājušies seno zināšanu piemēri ir tuneļu sistēmas zem valdnieku Unis un Džosera kapenēm, kur to kopgarums pārsniedz 7 km, bet sazarojums ir komplicētāks par ogļu ieguves sistēmām vēl pirms 200 gadiem Eiropā.

Par sasniegumiem derīgo izrakteņu resursu novērtēšanā, ieguvē, bagātināšanā, pārstrādē un transportēšanas loģistikā uzskatāmi liecina Jaunās valsts laika Turīnas papirusi, kas atspoguļo pašu senāko ģeoloģisko kalnrūpniecības rajona karti pasaulē un tā būtu neiedomājams sasniegums vēl pirms 200 gadiem kaut kur pasaulē (2.2.attēls).

Iepriekšēji aprakstītais vēsturiskā secībā uzskatāmi parāda ģeoloģisko zināšanu izmaiņas par zemes dziļēm un to kvalitāti, kā arī ļauj izsekot būvniecībai nepieciešamā būvkmens izmantošanas izmaiņām. Iespējams, ka šajā nozīmē Džosera piramīda ir viens no pašiem veiksmīgākajiem piemēriem. Piramīda ir veidota vairākos posmos - sākotnēji kā mastaba, tad tā tiek paplašināta un pārbūvēta un, tad virs tās vairākos posmos tiek izveidota pakāpienveida piramīda kādu mēs to redzam mūsdienās (nav saglabājusies tikai apdare). Pētījumi norāda (Kukela, Seglins, 2012c), ka sākotnēji būvniecībā šeit tiek izmantoti apkārtņē tuksnesī atrodamie plakani akmeņi, vēlāk - tos vienkārši apdarina un piešķir būvniecībā ērti izmantojamu plakānu formu. Tomēr šādiem mūrējumiem ir nepieciešams ļoti daudz saistvielas un tās kvalitātei ir jābūt augstai. Šajā laikā to vēl nav iespējams sasniegt un to ir var konstatēt mastabas kā mēģinājumus uzlabot saistvielu līdz tai tiek pievienots samalts alabastrs. Nākamajā posmā būvniecībai nepieciešamos akmeņos jau iegūst mākslīgos atsegumos, bedrēs un tuneļos zem būves, bet būvmateriāla kvalitāte ir vāja - blokiem tiek piešķirta aptuveni viena forma, bet netiek novērtēts pašu bloku viendabīgums, kas slāņotā iezī ir būtiski. Tikai nākošajā posmā ir tikusi veikta noteiktas kvalitātes būvkmens mērķtiecīga meklēšana, tiek atrasti slāņi akmens ieguvei un, sagatavojot blokus, no tiem tiek atdalīti merģeļu slāņi, dēdējuši gabali un tamlīdzīgi. Tādējādi tiek iegūts augstas kvalitātes būvkmens visas būves izveides vajadzībām un turpmākie uzlabojumi jau saistās ar blokiem piešķirtas formas standartizāciju, kā arī īpašām vajadzībām nepieciešamo akmens materiālu piegādi no tālienes (lielu izmēru alabastra, granīta, masīva monolīta kaļķakmens bloki).

Mūsdienās, tas ir, pēc 5 tūkstošiem gadu pēc aprakstītajiem notikumiem, senās zināšanas par derīgajiem izrakteņiem būtiski papildinās tikai pagājušā gadsimta piecdesmitajos un sešdesmitajos gados, kad Ēģiptē strādā padomju ģeologu misija (līdz 70 ģeologiem vienlaicīgi) un tiek atrastas līdz tam nezināmas naftas, dabas gāzes, urāna, azbesta un fosforītu atradnes. Tomēr arī šie sasniegumi nevar tikt uzskatīti par kādām kļūdām vai nezināšanām Senajā Ēģiptē, jo šādu izejvielu izmantošana rūpniecībā kļūst zināma tikai pagājušajā gadsimtā. Zināms izņēmums ir dzelzs un mangāna rūda, kas mūsdienās ir atklāta un tiek iegūta. Arī šajā gadījumā šīs rūdas senatnē tika tieši šeit arī iegūtas, vienīgi tikai sarkanās un zaļgani melnās krāsas iegūšanai.

Kopumā atzīmējams, ka Senajā Ēģiptē jau tās sākuma posmā ir visai attīstīta dabas zemes dziļu resursu apzināšanas prakse, tiek apzināti meklēti noteiktas kvalitātes derīgie izrakteņi, tiek novērtēta to kvalitāte un daudzumi, bet attiecībā uz ūdens resursiem – tiek izstrādātas un izmantotas arī bilances metodes. Minētais liecina, ka resursi un to novērtēšanas metodes laika posmā no Senās Ēģiptes līdz mūsdienām principiāli nav mainījušās, tomēr svarīgākie jaunievedumi ir pētījumu detalizācijas pakāpe un resursu plānošana, kā arī šādas plānošanas sociālās sekas, kas senajās valstīs saprotamu iemeslu dēļ netika ņemtas vērā.

### 3. PĒTĪJUMA TERITORIJAS RAKSTUROJUMS

Promocijas darbā veikti pētījumi Ziemeļēģiptē, precīzāk Sakāras plato, kas atrodas Kairas pievārtē Nīlas kreisajā krastā. Atsevišķi metodiskas ievirzes pētījumi veikti arī Gīzas plato un pētītas arī būves Kairā, bet šeit izmantotā būvākme izcelsme nav droši zināma, bet, visdrīzāk, tā ir no akmens lauztuvēm Nīlas labajā krastā. Tā ir salīdzinoši ierobežota Ēģiptes valsts teritorija un tādēļ pārskats par plašāku kontekstu tika sniegts jau iepriekšējās nodaļās un turpmāk lielākā uzmanība tiks veltīta tikai Sakāras plato.

Literatūras studijas un speciālistu ieteikumi, kā arī autora personiskā pieredze, kas iegūta 2007. gadā, piedaloties Latvijas Zinātniskās ekspedīcijas arheoloģiskās pētniecības darbos un 2010. - 2011. gadā veiktie kopīgie pētījumi ar Francijas arheoloģisko misiju Ēģiptē norādīja, ka Senās valsts ģeoloģisko zināšanu izmaiņas uzskatāmāk un zinātniski pamatotāk būtu atpazīstamas tieši Sakāras plato izvietotā nekropolē. Vienlaicīgi, par salīdzinājumu pētījumu teritorijām tika noteikta Senās valsts nekropole Gīzas plato un Dašūrā, kā arī senākās mošeju būves Kairas pilsētā.

Promocijas darba mērķa sasniegšanai nav iespējams definēt kādu vienu noteiktu pētījumu vietu un nosacījumus tās izvēlei. Zināmā mērā šo pretrunu atspoguļo arī atšķirīgie pētījumam izvirzītie uzdevumi, kuru daļa ir risināma tikai bibliotēkās, arhīvos un muzejos, kā arī tiešos kontaktos ar pētnieku kolektīviem ēģiptoloģijas pētniecības centros universitātēs (detalizētāk skatīt promocijas darba 4.1. apakšnodaļu). Pētījumu otra daļa risināma tiešā sadarbībā ar datorspeciālistiem, programmu attīstītājiem un ģeodēzistiem. Savukārt, tehniski sarežģītākā lauku pētījumu daļa tika izvēlēta vairāku iepriekšēju apzināšanas un izpētes pētījumu gaitā 2007. un 2008. gadā.

#### 3.1. Teritorijas fiziogēogrāfiskie apstākļi un to mainība

Instrumentāli vides monitoringa sistēmas mērījumi Sakāras plato netika veikti, tomēr šādi pētījumi tika īstenoti Gīzas plato. Šos pētījumus veica Ēģiptes Senlietu Augstākā Padome sadarbībā ar Getti konservācijas institūtu laika periodā no 1990.-1991.gadam (Preusser *et al.*, 2006). Ņemot vērā, ka Gīzas plato atrodas tikai 15 km attālumā no Sakāras plato, mērījumi, kas veikti minētajā pētījumā, tika izmantoti promocijas darbā arī attiecībā uz Sakāras nekropoli.

Balstoties uz vides monitoringa sistēmas mērījumiem, gaisa temperatūra Sakāras plato svārstās no 3° līdz 42° C, vidējā gaisa temperatūra ir 12°-23° C; relatīvais gaisa mitrums svārstās robežās no 10 līdz 100%, bet vidējais relatīvais gaisa mitrums ir 50-68%. Maksimālais vēja ātrums sasniedz 24,6 m/s, bet vidēji tas sasniedz 1,8-7,4 m/s. Gada vidējā akmens materiāla eksponētās virsmas temperatūra svārstās no +5°C līdz +22°C, vasaras mēnešos sasniedzot maksimālo temperatūra apmēram +52°C. Mitruma kondensēšanās temperatūra gada laikā svārstās robežās no apmēram -2°C līdz +13°C (Preusser *et al.*, 2006; Giammarusti, 2003).

Šo mērījumu dati norāda, ka gaisa temperatūra, akmens virsmas temperatūra, relatīvais gaisa mitrums un mitruma kondensēšanās temperatūra būtiski svārstā gan diennakts, gan arī gada laikā. Ņemot vērā akmens materiāla potenciālo jutīgumu pret termālo spiedi un sāls apjomu, kuru satur akmens materiāls, šo mērījumu dati sniedz

būtisku informāciju par akmens materiāla dēdēšanas mehānismiem. Nātrija hlorīds absorbē ūdeni pie relatīvā mitruma rādītāja, kas ir lielāks vai vienāds ar 75%. Nātrija hlorīdam, sajaucoties ar citiem sāļiem, absorbcijas process var sākties jau pie 60% relatīvā mitruma rādītāja. Ņemot vērā, ka vidējais akmens materiāla virsmas mitruma absorbcijas laiks ir 13 stundas pie relatīvā mitruma virs 60% un 8 stundas pie relatīvā mitruma virs 75%, tieši salīdzinoši augsts relatīvais mitrums ir akmens materiāla bojāšanās pamata faktors. Mitruma absorbcijas process praktiski ik dienas aktivizē šķīstošos sāļus (Preusser *et al.*, 2006; Giammarusti, 2003).

Augstākminētie dati norāda uz pastāvošiem nelabvēlīgiem apstākļiem pieminekļu saglabāšanai. Šādi klimatiskie apstākļi sekmē akmens materiāla sabrukšanu un saistvielas sadalīšanos. Šo sabrukuma procesu pastiprina vēja un smilšu erozijas abrazīvā ietekme.

Iepriekšēji minētais netieši norāda uz nepieciešamību detalizētāk apzināt šos pieminekļu saglabātībai nelabvēlīgos vides apstākļus arī senatnē, kas vismaz potenciāli ļautu šādas ievirzes pētījumos atpazīt kādas raksturīgas parādības vai ietekmju intensitātes pazīmes. Iespējams, ka šādā veidā varētu tikt konstatēti kādi notikumi, kas varētu atvieglot relatīvās hronoloģijas izpratni no akmens veidotiem pieminekļiem, par kuriem citas liecības nav saglabājušās.

Promocijas darba izstrādes laikā veiktā literatūras analīze, kā arī konsultācijas ar arheoloģisko misiju vadītājiem Ēģiptē (Dr. A. Zivī, Dr. O. Labrussu, Dr. H. Heisu) norāda uz ierobežotām zināšanām par dabas apstākļu izmaiņām Senās valsts laikā Ēģiptē. Attiecībā uz pētīto vēsturisko laika posmu Ēģiptes ziemeļdaļā dabas apstākļu maiņas ir apzinātas tikai vispārīgi, jo iepriekšēji izklāstītais norāda uz nepietiekamiem novērojumiem un zināšanām arī mūsdienās. Tieši šis apstākļis ir izšķirošais kvantitatīvu paleoģeogrāfisko apstākļu rekonstrukciju novērtēšanai un analīzei. Šādas rekonstrukcijas un pētījumu materiāli norāda uz būtiskām apstākļu maiņām (Nīlas ūdens līmenis un palu regularitātes maiņas, tuksnešu izplešanās, lauksaimniecībā iegūstamās ražas bojā eja utml.) ir pētītas vairākkārt (Phillipps *et al.*, 2012; Newton, 2007; Omran, 2007, Bernhardt *et al.*, 2012 u.c.). Tomēr šie pētījumi ir tikai nosacīti attiecināmi uz disertācijā apskatāmo vēsturisko laika posmu. Plašākā kontekstā to apskata vairāki Senās Ēģiptes pētnieki (Midant-Reynes 2000, Wenke 2009), nepastarpināti saistot senās Ēģiptes civilizācijas uzplaukuma un pagrimuma periodus ar lauksaimnieciskai ražošanai kritisko Nīlas ūdens resursu bagātību un pieejamību. Tomēr Ēģiptes Senās valsts posmu raksturojošo datu ir ļoti maz, tādēļ arī minētie autori cita starpā norāda uz šādu vides apstākļu izmaiņu analītisku augstas detalitātes pētījumu nepieciešamību nākotnē.

### **3.2. Sakāras plato ģeoloģiskā uzbūve**

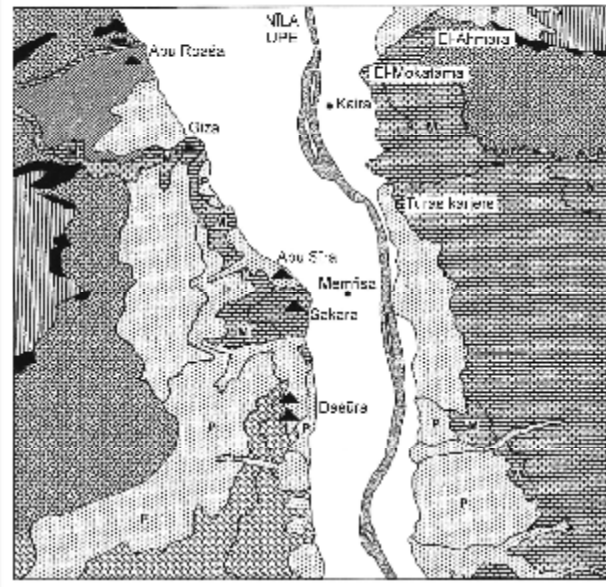
Sakāras plato atrodas apmēram 40 km uz dienvidaustrumiem no Kairas Nīlas kreisajā krastā un ir par 17 - 25 m piepacelts virs upes mūsdienu virspalu terases. Tas kontrastaini izceļas apkārtējā ainavā un šeit kopš pirmās dinastijas laikiem ir ierīkota viena no senākajām nekropolēm, kas ir tikusi izmantota aptuveni 3 tūkstošus gadu. Kapenes šeit ir izveidotas gan kā pazemes būves, gan kā virszemes mastabas un piramīdas, to dažādas kombinācijas un vienkāršas koptu kapsētas. Mūsdienās tā ir tuksneša nomale ar aktīvu smilšu pārvietošanu, kas prasa ikdienā šos pieminekļus kopt un uzturēt. Raksturīgs ir ļoti sauss klimats un biežas smilšu vētras, kas pastiprina seno pieminekļu dēdēšanu.

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 visrpalu un palu terašu josla, kuras kopējais platums ir ap 0,5-0,7 km. Ziemeļu virzienā šīs joslas platums pieaug, daļēji ietverot arī pētījumu objektam piegulošo teritoriju. Kāpu joslas zemāko vietu absolūtais augstums ir ap 10 m v.j.l, augstāko kāpu virsotnes sasniedz 25-30 m v.j.l., bet to relatīvais augstums ir līdz 10-15 m (Lehner, 1985).

Pētījumu objekta un tā apkārtnes ģeoloģisko griezumumu veido dažāda vecuma un sastāva nogulumiežu sega (3.1. attēls). Kvartāra nogulumu ir visjaunākie un to veidošanās turpinās arī mūsdienās. Visā teritorijā kvartāra nogulumu nepārtrauktas (vienlaidu) segas veidā pārklāj dziļāk gulošos Mādi svītas Fajuma slāņu iežus. Kvartārsegas nogulumu biezums ir nevienmērīgs un tā izmaiņas, galvenokārt, ir saistītas ar senāk veidojušos iežu virsmas reljefa īpatnībām. Pētījumu objekta izvietojuma rajonā šo pamatiežu virsmas absolūtās atzīmes atrodas 10-50 m v.j.l.

Sakāras un daļēji arī Gīzas plato pamatni veido eocēna kaļķakmens kuestas formas erozijas paliknis. Senā reljefa formu veidojošie ieži ir piederīgi Mokatamas slāņkopas Mādi (Maadi) svītai, kas šeit var būt pat 75 m bieza (Gauri, 1984). Svītas nogulumu Ēģiptes austrumu daļā, tajā skaitā, netālu esošajā Nīlas labajā krastā ir pārstāvēti ar kaļķakmeņiem, vietām dolomītiem ar visai nozīmīgu anhidrīta lēcu, ieslēgumu un starpslāņu izplatību. Nīlas kreisajā krastā tie ir ritmiski kārtoti kaļķakmens (vietām dolomitizēta), merģeļu, argilītu un aleirolītu un smilšakmens slāņmija ar visai atšķirīgu iežu biezumu savstarpējām proporcijām, kas atspoguļo mijiedarbības zonu starp seklas juras sedimentāciju un paleo-Nīlas deltas attīstību. Šeit ir jāņem vērā, ka eocēna laikā paleo-Nīlas sateces laukums un tās izmēri daudzkārt pārsniedza mūsdienu Nīlas hidroloģiskos parametrus (Klitzsche *et al.*, 1989).

Turpmākās ģeoloģiskās attīstības laikā senie eocēna ieži ir vairākkārtīgi būtiski ietekmēti. Kā pati nozīmīgākā izceļama vidējā miocēna Fajuma slāņkopas Ravidis ridas nogulumu veidošanās. Šie ieži kopumā raksturo Senās Tetisa jūras tālāko atkāpšanos uz ziemeļiem, kuru pavada ievērojams skaits vietējo ingresiju, kā arī paleo-Nīlas senā hidroloģiskā tīkla veidošanās. Pateicoties senās upes intensīvai dziļuma erozijai, mūsdienu Nīlas pirmsdeltas reģionā veidojās sarežģīts erozijas reljefs ar visai ievērojamu senāku krīta, paleocēna un eocēna laika vāji konsolidētu iežu palikšņiem. Tie tiek erodēti, bet vietām arī aizpildīti ar aluviāliem un kontinentāliem tuksneša klastiskiem smilšu nogulumiem, bet jūras transgresijas skartās teritorijās uzkrājas smalkgraudains un ķīmiski izgulsnēts kaļķakmens. Vēlāk – pliocēnā un kvartārā, attīstoties Nīlas hidroloģiskajam tīklam un mainoties Vidusjūras baseina ūdens līmenim, arī šie nogulumu un iežu vēl vairākkārtīgi ir tikuši pārveidoti, ko zem mūsdienu aktīva tuksneša pastāvīgi pārvietotām smiltīm vai Nīlas ielejas līdz 70 m bieziem kvartāra aluviāliem nogulumiem ne vienmēr ir iespējams konstatēt. Atzīmējams, ka Nīlas deltas apkārtnē holocēna smalki dispersie un bagātie ar organiskām atliekām aluviālie nogulumu var sasniegt 30-50 m biezumu.



3.1. attēls. Sakāras plato un tā apkārtējās teritorijas vienkāršota ģeoloģiskā karte (pēc Klitzsch *et al.*, 1986-1987).

Figure 3.1. Map of the ancient Memphis (Saqqara) region, showing sites of pyramid complexes and quarries. Patterns indicate different rock type exposed at the surface (after Klitzsch *et al.*, 1986-1987).

Sakāras plato veido vidējā un vēlā miocēna Mokattamas slāņkopas (Mādi svītas apakšējā daļa) seklas jūras ritmiski kārtoti, slāņoti kaļķieži. Tie slāņkopas apakšējā daļā sastāv no smilšaina un masīva kaļķakmens 30-50 cm bieža slāņa, kuru pārsež 10-15 cm biezi merģeļi, bet ritmu noslēdz līdz 10 cm biezs argilītu un aleirolītu slānis. Nākošais 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 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. Iepriekšēji minētie pelēkie un iedzelteni pelēkie smilšainā kaļķakmens slāņi ir galvenais vietējais būvmateriāls nekropoles būvniecībā un ģeoloģiskā griezuma augšējā daļa vietām atsedzas plato stāvājās nogāzēs.

Teritorija kopumā ir seismiski aktīva un katru gadu šeit tiek reģistrētas vairākas zemestrīces ar magnitūdu lielāku par 4. Rezultātā masīvie kaļķakmens slāņi ir saplaisājuši veidojot savdabīgu bloku struktūru ar izmēriem aptuveni 0.30-0.40 m (3.2. attēls), daudz retāk sastopami lielāki neplaisājuši kaļķakmens dabiskie bloki.



3.2. attēls. Sakāras plato ģeoloģiskā griezuma eksponētā daļa.

Figure 3.2. Exposed part of the geological outcrop of the Saqqara plateau.

Seismiskās aktivitātes ietekmē arī jau izveidotās būves nekropolē, kā rezultātā senie pieminekļi zaudē savu stabilitāti.

Kopumā pētījumu teritorijas un tās apkārtnes ģeoloģiskie apstākļi ir cieši saistīti ar ģeoloģiskās uzbūves īpatnībām un nogulumu sastāva izmaiņām. Tos daļēji ietekmē gan mūsdienu eksogēnie procesi, gan arī šeit veiktā saimnieciskā darbība (Lehner, 1985).

### 3.3. Pētījumu objekta raksturojums

Par pētījuma objektu tika izvēlēta valdnieka Džosera Pakāpju piramīda Sakārā, Ēģiptē. Tā ir būvēta aptuveni 4600 gadus atpakaļ. Džosers (Djoser, Netjerykhet) ir Senās Ēģiptes apvienotās valsts III dinastijas pēdējais un mūsdienās viens no pazīstamākiem valdniekiem, kurš valdīja 19 gadus (2667 -2648 g. p.m.ē.) (Shaw, 2003). Mazāk ir zināmas viņa valdīšanas laikā realizētās valsts administratīvās reformas un pārmaiņas nodokļu sistēmā, tomēr zināms ir valdnieka nekropoles komplekss un tās centrālais elements – pakāpienveida piramīda. Tā ir atzīta kā senākā akmens mākslīgā būve pasaulē (3.3. attēls).

Pirmos pētījumus Džosera piramīdas kompleksā jau 1821.gadā veica Prūsijas ģenerālis Minutoli (Heinrich Menu von Minutoli) un itālis Girolamo Segato (Buongarzone, 2003). Plaša mēroga pētījumi gan šajā piramīdā, gan arī Sakkārā, Gīzā un citās nekropolēs veica angļu inženieris un antropologs Džons Perings (John Shae



Perring) un Sers Ričards Vizs (Sir Richard William Howard Vyse), publicējot pētījumus vairāku sējumu darbā 1839.gadā (Perring, 1839). Īsi pēc Peringa, pētījumus turpināja Prūsijas Ēģiptoloģijas pamatlicējs Karls Ričards Lepsius (Karl Richard Lepsius) (Lepsius, 1849; Lepsius, 1892), bet pirmos plaša mēroga izrakumus Sakārā uzsāka britu Ēģiptologs Sesils Firs (Cecil Mallaby Firth) 1920-tajos gados, publicējot apjomīgu pētījumu par Džosera piramīdas kompleksu (Firth, Quibell, 1935).



3.3.attēls. Valdnieka Džosera pakāpju piramīdas kopskats, DR skats (2007.gada fotouzņēmums).

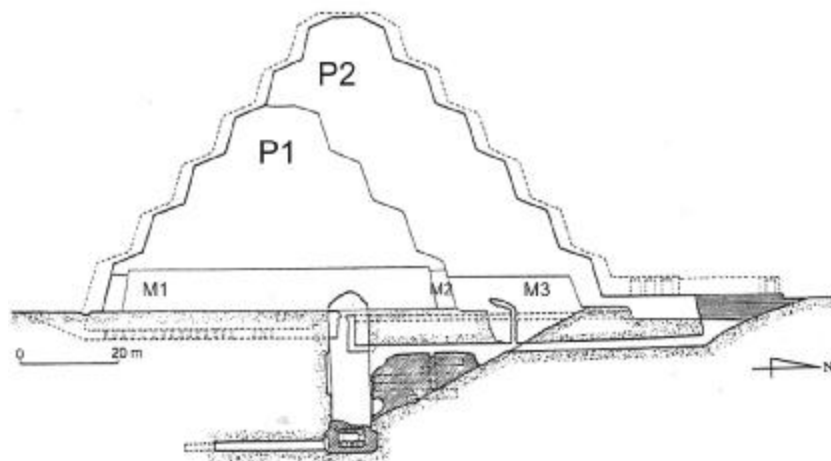
Figure 3.3.General view of the Step Pyramid of Djoser, SW veiw (in 2007).

Piramīda ir sarežģīta būve, kas pašreizējo izskatu ir ieguvusi pakāpenisku pārbūvju rezultātā. Sena un ļoti liela solveida virszemes kapene (mastaba) pārbūves procesā tika paplašināta divos posmos, kurus noslēdz 4-pakāpju piramīdas izbūve virs paplašinātās mastabas. Savukārt, virs 4-pakāpju piramīdas tika izbūvēta vēl lielāka un plašāka 6-pakāpju piramīda. Kopumā ir atpazīstamas sešas piramīdas būvniecības stadijas (Stadelmann, 1991; Lehner, 2004). Daudzas pazīmes norāda, ka vismaz daļēji Džosera piramīda no ārpusē ir tikusi apdarināta ar vietējā kaļķakmens plāksnēm. Pastarpināti tas norāda, ka arī šī piramīda nav īsta pakāpienu jeb pakāpju piramīda, lai gan apdares veids un piramīdas izskats senatnē joprojām nav zināms.

Mūsdienu veidolā piramīdas pamatne ir 121 x 109 metri, un augstums sasniedz 63 metrus (Baud, 2002). Vēl nesen tika uzskatīts, ka piramīdai ir 5-6 pakāpes, bet pēdējos gados ir atsegta vēl viena pakāpe. Mūsdienās noteiktais piramīdas tilpums ir aptuveni 330 400 kubikmetru (Lehner, 2004), tomēr ir jāņem vērā, ka piramīdas iekšienē un zem tās ir vairākas visai ievērojamu izmēru šahtas un pazemē ir izveidots vairāk kā 6 km garš (Baud, 2002) tuneļu un dažādu telpu tīkls, kā arī 28 metrus augsta apbedījuma šahta (Lehner, 2004).

Piramīda tika būvēta aptuveni 20 gadus, kas aptver vismaz mastabas jaunākās pārbūves un divus piramīdas izveides posmus (3.4. attēls). To ir būvējuši vietējie amatnieki, pildot sava laika valdnieka (valsts) pasūtījumu un būvniecības kvalitātes izmaiņas skaidri norāda, ka šo darbu ir veikušas vismaz 2-3 kvalifikācijas un prasmju ziņā visai atšķirīgas būvnieku grupas (brigādes).

Mastabas ir veidotas no uz vietas savākti akmeņiem un tos savstarpēji stiprina Nīlas dūņas ar nesijātas smilts liesinātāju (kleķa saistviela). Šajā būvniecības posmā zināšanas par akmens īpašībām un kvalitatīva būvākmeņa materiāla izvēles pazīmēm nav zināmas, tāpat arī kleķa javas zemā noturība pret vides apstākļiem.



3.4.attēls. Valdnieka Džosera Pakāpju piramīda un tās galvenās būvniecības stadijas (pēc Verner, 2004). Apzīmējumi: M1, M2, M3 – sākotnējās mastabas pārbūves posmi; P1, P2 – piramīdas pārbūves posmi.

Figure 3.4. 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.

Pirmā piramīda virs mastabas tiek būvēta no nedaudz apdarinātiem vietējiem akmeņiem, tie ir iepriekšēji šķiroti un nodalīti līdzīgi. Akmeņu saistīšanai tiek izmantota kleķa java ar maltu gliemežvāku vai smalki drupināta kaļķakmens liesinātāju. Šīs piramīdas konstrukcija un iekšējā uzbūve ir zināma ļoti aptuveni, jo to pilnībā sedz otrās piramīdas būve (Kukela, Seglins, 2012a).

Noslēdzošā jeb otrā piramīda ir tā, pēc kuras ārējā veidola tiek atpazīta Džosera piramīda un viss kapeņu komplekss. Šis būvniecības posms būtiski atšķiras no visiem iepriekšējiem, lai arī to būvniecību šķir tikai daži gadi. Būvniecībā izmantotie kaļķakmens un merģeļa būvākmeņi ir atsevišķi apdarināti, tēsti, tiem ir iepriekšēji piešķirta vēlamā forma jau netālajā akmeņa ieguves vietā. Būvniecības gaitā akmeņi ir saistīti ar dažādi sagatavotu cementa javu, kurā blakus maltam kaļķakmenim ir izmantoti malti gliemežvāki, smilts un Nīlas dūņas tradicionāliem kleķa izstrādājumiem. Daļa no kaļķakmens satur ģipsi un šāds jaukts malts materiāls, reizēm arī iepriekšēji apdedzināts, veido sulfātcementa javas. Tās ir nesalīdzināmi kvalitatīvākas par citām šajā būvniecības posmā izmantotām un apstieidz pasaules būvniecības praksi gandrīz par diviem tūkstošiem gadu (Kukela, Seglins, 2012e).

Diemžēl piramīda un zem tās pazemē izvietotās kapenes tika izlaupītas jau nepilnu simts gadu laikā kopš tās pabeigšanas. Laupītāji raka pazemes tuneļus un izlaupīja pazemes kapenes, bet turpmākos gadsimtos cieta ne tikai kapenes, jo citu kapeņu būvniecībai tika ņemti būvākmeņi no pašas piramīdas un to ietverošajām būvēm. Pēdējās būtiskākās ietekmes zināmas kopš Bizantijas laika beigu posma un

sekojošiem gadsimtiem, kad piramīdas dienvidpusē tika izveidoti vairāki padziļinājumi un šeit tika iekārtotas koptu kapenes un piemiņas vietas. Kapenes tika laupītas arī turpmākos gadsimtus līdz pat pagājušā gadsimta trīsdesmitajiem gadiem, kad šeit tika uzsākti sistemātiski zinātniski pētījumi.

To, ka valdnieka Džosera piramīda nav viendabīga un tās izbūvē ir izmantoti dažādi, tajā skaitā, nepiemēroti materiāli, bija zināms jau senatnē un tādēļ šeit vairākkārtīgi tika veikti visai iespaidīgi rekonstrukcijas un pārbūves darbi. Mūsdienas nav zināmi to apjomi un, nereti, pat mērķi, jo arī tie ir tikuši grauti un postīti. Arī rekonstrukcijās izmantotie būvmateriāli nav droši atpazīstami, jo arī tie visi ir vietējas izcelsmes un darbu kvalitāte ne vienmēr ir drošs indikators, jo īpaši būvdarbiem pazemē.

Pirmie plašākie būves nostiprināšanas un konservācijas darbi tika veikti pagājušā gadsimta sešdesmitajos gados. Tos veica franču pētnieks Ž.F. Lauērs (J.P. Lauer), noslēdzot plašus piramīdas kompleksa izpētes un atjaunošanas darbus. Tieši šajā laikā valdnieka Džosera komplekss iegūst tā pašreizējo izskatu. Lai arī daudzās vietās Lauēra veiktās pārbūves un nostiprināšanas darbi ir atpazīstami, diemžēl šī laika projekta dokumentācija un dokumenti par paveikto būvē diemžēl nav saglabājušies.

Sakāras plato, kur izvietots Pakāpju piramīdas komplekss, atrodas seismiski aktīvā zonā un šeit zemestrīces tiek fiksētas vairākas reizes gadā. Dažas no tām ir postošas un būtiski ietekmē būves kopējo stabilitāti. Zināms, ka 1992. gada zemestrīces rezultātā aizbruka ne tika 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.

Valdnieka Džosera piramīdas komplekss vēl pirms piecpadsmit gadiem bija tikai atsevišķu apmeklētāju un tūristu grupu intereses objekts, bet jau pēc desmit gadiem tas kļuva par vienu no pašiem apmeklētākajiem objektiem Ēģiptē ar desmitiem tūkstošu apmeklētāju ikdienas. Iespējams, ka tā ir pati lielākā pastāvīgā apmeklētāju plūsma, kopš valdnieka Džosera kulta mazināšanās laikiem IV dinastijas sākumā. Tā ir uzskatāma par ļoti augstu antropogēno slodzi, kas šeit koncentrēta ļoti ierobežotā teritorijā (Giammarusti, 2003).

Pat pavirši apskatot Pakāpju piramīdas kompleksu ir viegli pamanīt, ka tas ir bojāts un pat no attāluma ir redzami daudzi draudoši bojājumi kā piramīdas ārpusē, tā arī tās iekšienē atsevišķiem apmeklētājiem pieejamās šahtas griestos. Tādēļ pēdējo gadu laikā ir veikti vairāki pētījumi, ar mērķi novērtēt kompleksa bojājumu pakāpi un ietekmes riskus. Tāpat tika izstrādāts piramīdas kompleksa nostiprināšanas un kompleksas rekonstrukcijas plāns (Hawass, 2005). Diemžēl šie darbi ne vienmēr ir veikti kvalitatīvi un arī izstrādātais rekonstrukcijas plāns ir nepamatoti vienkāršots un nepilnīgs. Diemžēl to uzsāka un realizēja 2008. - 2011. gadā, bet pašlaik tā realizācijas tempi ir mazinājušies uz nezināmu laiku.

## 4. MATERIĀLI UN METODEDES

### 4.1. Pētījuma pamata datu iegūšana

Pētījuma pamata datu iegūšanai tika izmantoti materiāli un dati, kas iegūti apmeklējot dažādu valstu muzejus, bibliotēkas, arhīvus un pieminekļus. Vispārīga iepazīšanās un atsevišķu eksponātu sīkāki pētījumi tika veikti sekojošos muzejos: Latvijas Nacionālā Mākslas Muzejā (bij. Ārzemju mākslas muzejs) Rīgā, Kairas muzejā Ēģiptē, Imhotepa muzejā Sakārā, Ēģiptē, Luvras muzejā Parīzē, Francijā, Berlīnes muzejā Vācijā, Britu muzejā Londonā, Lielbritānijā, Arheoloģiskajā muzejā Rodas salā, Grieķijā, Puškina muzejā Maskavā, Ermitāžā, Sankt-Pēterburgā, Krievijā, Allard Pierson muzejā Amsterdamā un Leidenes muzejā Nīderlandē.

Literatūras studijas tika veiktas Aleksandrijas bibliotēkā Ēģiptē un Vācijas Arheoloģiskā Institūta bibliotēkā Kairā. Papildus, ir studēta bibliogrāfija un arī arhīva dokumenti vairākās Senās Ēģiptes pētniecības iestādēs, tostarp, Francijas arheoloģiskās misijas Ēģiptē bibliotēkā, Leidenes Universitātes arheoloģiskās misijas Ēģiptē bibliotēkā, kā arī Krievijas Zinātņu akadēmijas Ēģiptes izpētes centra bibliotēkā.

Literatūras avotu un arhīvu studijas ietvēra publikācijas, kas iznākušas laika periodā, sākot no 19.gadsmita sākuma līdz pat mūsdienām angļu, vācu, franču un krievu valodās, kā arī dažādu konferenču un semināru materiālus.

Iepriekšēji minētās literatūras studijas ļāva noteikt pētāmo vēsturisko laika posmu – Ēģiptes Seno valsti, kā arī lokalizēt pētāmo teritoriju un objektu – Sakāras plato akmens pieminekļi. Par prototipu tika izvēlēta III dinastijas valdnieka Džosera pakāpju piramīda, kas līdzšinēji tika uzskatīta par vecāko akmens būvi pasaulē. Šī pētījuma ietvaros netiek apskatīts iepriekšējais vēsturiskais posms, kas aptver I un II dinastijas laikā būvētās pazemes kapenes.

Nemot vērā, ka Džosera piramīda, līdz ar citiem Sakāras nekropoles pieminekļiem ir iekļauta UNESCO Pasaules kultūras mantojuma sarakstā, tās pētījumos ir svarīgi pielietot saudzīgas nedestruktīvas metodes, tās pilnveidot un attīstīt pētījuma gaitā.

Šīs piramīdas apmeklējums un pētījumu iespējas ir ļoti ierobežotas, Ēģiptes valsts pieminekļu izpētes un aizsardzības institūcijas īsteno īpatnēju pieminekļu saglabāšanas politiku, kas rada pētījumus neveicinošus apstākļus.

Nemot vērā iepriekšēji minēto pētījuma kontekstu, ir nepieciešams attīstīt tādas netiešās izpētes metodes, kas ļautu izdarīt pamatotus secinājumus par ģeoloģisko zināšanu attīstību Ēģiptē Senās valsts laikā. Lai sasniegtu šo mērķi, tika pētīts valdnieka Džosera piramīdas celtniecībā izmantotais akmens materiāls, kas liecinātu par ģeoloģisko un materiālo zināšanu izmaiņām. Atbilstošās metodikas attīstībai un adoptācijai tika veikti daudzi atsevišķi eksperimenti un pētījumi (skat. 4.6. apakšodaļu), kas ļāva nonākt līdz pētījuma mērķa sasniegšanai nepieciešamajiem secinājumiem.

Pētījuma sākotnējā fāze bija dokumentēšana, kas, iespējams, metodiski ir visdarbietilpīgākā pētījuma daļa.

## 4.2. Pētījuma objekta izvēle un pētījuma realizācijas secīgums

Kā minēts iepriekšējā nodaļā, par pētījumu galveno objektu tika noteikta Sakāras plato III dinastijas valdnieka Džosera pakāpju piramīda. Tas ir UNESCO Pasaules kultūras mantojuma ļoti augstvērtīgs piemineklis un tā tieša pētniecība mūsdienās nav iespējama, vēl jo vairāk tādēļ, ka kopš 2009. gada šeit tiek realizēti piramīdas kompleksa rekonstrukcijas darbi. Vienlaicīgi tas ir piemineklis ar augstāko kultūrvēsturisko un zinātnisko vērtību, jo raksturo pirmo šāda mēroga akmens būvi ne tikai Senajā Ēģiptē, bet visā zināmajā senajā pasaulē.

Džosera piramīdas komplekss, kā arī atsevišķas tā būves un fragmenti tiek pētīti jau vairāk nekā 150 gadus. Šo pētījumu novērojumi ir tikai daļēji saglabājušies un to piesaiste pie konkrētās būves atpazīstamiem elementiem ir visai nosacīta. Tāpat ir jāņem vērā arī šajā laikā veikto rekonstrukciju un fasādes saglabāšanas darbu rezultāti. Iepriekšējas literatūras studijas, darbs muzeju arhīvos un kolekcijās, kā arī iepazīšanās ar situāciju uz vietas skaidri norādīja šī objekta kā pētījuma vietas ļoti augsto potenciālu. Tik pat skaidra ir arī nepieciešamība izveidot galvenās būves, t.i., piramīdas salīdzinoši precīzu modeli, kas ļautu iepriekšēji veiktos mērījumus un novērojumus, kā arī autores veiktos pētījumus savstarpēji saistīt vienotā ģeogrāfiskā telpā.

Par minētā patiesumu promocijas darba autors personiski pārliecinājās, piedaloties vairākās zinātniskās ekspedīcijās Sakāras plato laika posmā no 2006.-2011. gadam, kas norādīja uz nepieciešamību sagatavot šādu funkcionālu modeli, kā arī neatliekami tajā atspoguļots faktisko fasāžu stāvoklis, pirms tās tiek segtas ar celtniecības stalažām un pārveidotas rekonstrukcijas darbos.

Tādējādi par primāriem pētījuma uzdevumiem tika noteikta piramīdas fasāžu fotodokumentēšana ar atbilstošu metodiku adaptāciju un to pielāgošanu konkrētā pētījuma vajadzībām, kā arī piramīdas ģeotelpiskā modeļa izveide un aprobācija. Tikai pēc tam tika realizēti nākamie pētījuma posmi, kuros tika apzināti Senā valstī izmantotie akmens materiāli un īpašības tieši attiecībā uz Sakāras plato, kā arī piramīdas būvniecībā izmantotā būvākmeņi fasādēs eksponētās virsmas dēdēšanas novērtēšana.

Dēdēšanas veidu un to intensitātes novērtēšana tika veikta secīgi vairākās Senās valsts būvēs ar mērķi attīstīt un pilnveidot pētniecības metodi un paaugstināt tās rezultativitāti. Blakus Džosera piramīdas ģeotelpiskā modeļa izveidei un tā aizpildīšanai, dēdēšanas novērtēšanas metodikas izstrāde un papildus salīdzinošie pētījumi metodikas aprobācijai bija paši darbietilpīgākie, kā arī vispiesātinākie ar daudzām novitātēm un netradicionāliem risinājumiem, kas rezultātā ļāva nonākt pie nozīmīgiem zinātniskiem rezultātiem un secinājumiem.

Turpmākajās apakšnodaļās ir detalizēti izklāstītas izmantotās metodes un to pilnveide pētījuma uzdevumu izpildei, kas ir nozīmīga promocijas darba daļa kā norādes citiem pētniekiem tās pielāgot līdzīgiem pētījumiem citos senvēstures objektos.

## 4.3. Pētījuma objekta fotodokumentēšana

Pētījuma objekts, valdnieka Džosera piramīda, ir tikai daļēji pieejams dokumentēšanai zemes līmenī pa perimetru; pakāpienu līmeņi, kas augstāki par otro pakāpienu nav pieejami - tie fotografējami no attāluma tikai no zemes virsmas. Gandrīz nekur netiek atļauta fotografēšana ar statīvu, kā arī ilgstoši novērojumi no

viena skatu punkta. Papildus apgrūtinājumi ir tieši pēdējo gadu laikā, kad ir ierobežota piekļuve Džosera piramīdas ziemeļu un rietumu fasādei, bet piramīdas dienvidu un austrumu fasādes lielāko daļu sedz celtniecības stalažas. Kopš 2009. gada otrās puses šeit tiek veikta arī akmens bloku aizvietošana un papildus tiek apšūtas piramīdas ārsienas. Līdz ar to, veiktajā pētījumā bija nepieciešams izmantot arī citus pieejamos piramīdas attēlus, tādus kā iepriekšējos gados veiktās fotogrāfijas, piramīdas apmeklētāju veiktās neprofesionālas fotogrāfijas, attēlus no dažādiem arhīviem un privātajām kolekcijām.

Nemot vērā pētījuma vajadzības, sistemātiskai pētījuma objekta fotodokumentēšanai izvēlētajam aprīkojumam tika izvirzītas vairākas tehniskās prasības: piemērotība darbam lauka apstākļos (neliels svars un izmēri, ierobežojumi āra temperatūra augstāka par + 30° C, vējainība ar augstu putekļu piesārņojumu gaisā, kā arī drošs enerģijas avots, kuru ir iespējams papildināt no ļoti nedroša vietējā elektroapgādes tīkla). Minētām prasībām atbilst vairāku ražotāju fotokameras, no tām tika izvēlēta SONY DSC-R1 10,3 Mpix.

Turpmākai attēlu apstrādei un interpretācijai bija derīgi attēli, kurus iespējams interpretēt, palielinot kādu no attēla fragmentiem vismaz divas reizes. Līdz ar to, attēliem jābūt iegūtiem ar 72 dpi izšķirtspēju.

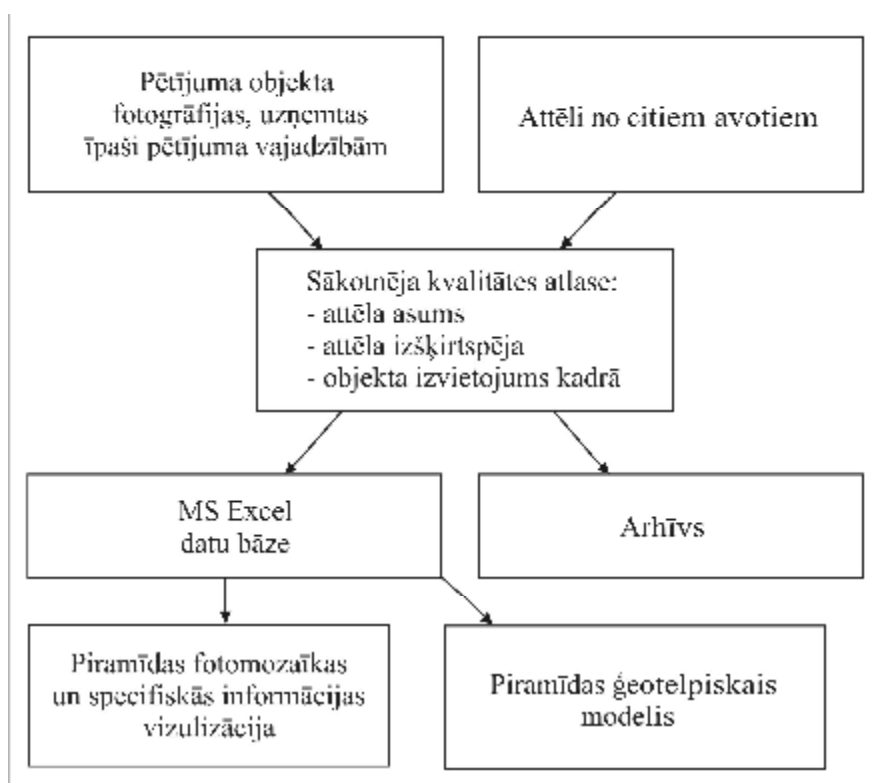
Kvalitātes kontroles nodrošinājumam daļa no fasādēm tika atkārtoti fotodokumentētas ar citām kamerām (Fuji FinePix S602Zoom un SONY DSC-R1 10,3 Mpix). Iepriekšēji minētajos darba apstākļos izvēlētās kameras ļauj iegūt pietiekoši augstas kvalitātes attēlus to tālākajai apstrādei un interpretācijai.

Visas pētījuma vajadzībām pieejamās Džosera piramīdas fasāžu fotogrāfijas (uzņemtas laika periodā kopš 2005. līdz 2011.gadam, kopā apmēram 2300 fotoattēli) tiek klasificētas sākotnēji pēc uzņēmuma iegūšanas laika (gads, mēnesis), pēc tam – piesaistot uzņēmumus piramīdas konkrētām fasādēm un stūriem (šķautnēm), papildus tiek atzīmēti dati par attēla lielumu, kameras specifikācija, kā arī tiek norādītas papildus ziņas par fotografēšanas apstākļiem. Klasifikācija pa gadiem un mēnešiem ir noteikta kā galvenā pazīme, jo tā atvieglo konkrētu fotoattēlu meklēšanu. Tas ir svarīgi, jo kopš 2009.gada gan piramīdas iekšpusē, gan arī ārpusē notiek vērienīgi rekonstrukcijas darbi un fasāžu ārējais izskats vizuāli mainās (tiek pārvietotas stalažas, atklājas rekonstruētie (no jauna pārbūvētie) piramīdas fasāžu fragmenti, un tml. Datu bāzē apkopotās digitālās krāsainās fotogrāfijas veido datu pamatmasīvu. Papildus tiek veidots uzkrājums ārpus datu bāzes no zemas kvalitātes foto uzņēmumiem, vēsturiskām fotogrāfijām, kas pieejamas publiskajā tīklā, kā arī dažādiem vēsturiskiem attēliem, plāniem, shēmām, uzmērījumu datiem. Iepriekšēji minētais fotoattēlu arhīvs tika organizēts īpaši izveidotas datu bāzes veidā Microsoft Excel datorprogrammā, tādējādi, ļaujot piesaistīt un izmantot referencētus fotouzņēmumus vai to daļas kā GIS, tā arī speciālām ģeotelpiskām datu analīzēm.

Sākotnēji visi iegūtie fotoattēli tiek pārbaudīti un fotoattēlu datu bāzē tiek saglabāti tikai attēli ar nevainojumu asumu. Nākamais fotoattēlu pārbaudes kritērijs ir to izšķirtspēja. Oriģinālam attēlam ir jābūt uzņemtam ar vismaz 5 Mpix fotokameru un 72 dpi izšķirtspēju. Gadījumā, ja attēls satur pētījumam nozīmīgu informāciju, bet neatbilst minētajai attēla izšķirtspējas prasībai, tas tiek uzglabāts attēlu arhīvā un izmantots pētījuma vispārējām vajadzībām. Tādēļ fotoattēlu šķirošanai, apkopošanai un izmantošanai tika izstrādāta īpaša šo dokumentu aprites un uzkrāšanas shēma, kas ir parādīta 4.1.attēlā.

Fotoattēli, kuri bija nepietiekoši asi, datu bāzē netika iekļauti, bet uzglabāti arhīvā. Tālāka fotoattēlu kvalitātes pārbaude tika veikta, ņemot vērā konkrēto

pētījuma mērķi, tas ir, datu bāze ļauj mērķtiecīgi atlasīt nepieciešamos attēlus par meklēšanas kritērijiem nosakot ne tikai laiku, vietu, bet arī kvalitāti, datnes izmērus, un tml.



4.1.attēls. Fotoattēlu apkopošanas un izmantošanas shēma.

Figure 4.1. Schematic depiction of management of the photodocumentation.

Ņemot vērā, ka pētījumam tika izvirzīti vairāki uzdevumi, tad katram no tiem tika veidota sava fotodokumentu izlase un tā tika uzglabāta atsevišķā mapē kopējā fotodokumentu datu bāzē.

#### 4.4. Piramīdas ģeotelpiskā modeļa izveide un aprobācija

Ģeotelpiskā modeļa izstrādei tika detāli analizēti iespējamie risinājumi, nosakot vairākus ierobežojumus attiecībā uz datorprogrammu izvēli. Tika noteikts, ka datorprogrammai bija jābūt plaši lietojamai ar attīstītiem rīkiem, tai ir jāspēj integrēt dažādas kvalitātes tiešos un netiešos mērījumu datus, datu formātam ir jābūt savienojamam ar AutoCAD, kā arī tradicionāliem ĢIS formātiem, kas ļautu izstrādāto piramīdas ģeotelpisko modeli izmantot dažādām inženiertehniskām vajadzībām (restaurācija, projektēšana, utml.). Vienlaikus ģeotelpisko modeli ir jāspēj piedāvāt arī analīzei ar brīvi pieejamām datorprogrammām.

Veiktā pieejamo datorprogrammu analīze norādīja uz daudzām atsevišķu programmu priekšrocībām un iespējām, tomēr visas minētās prasības ir iespējams realizēt gandrīz tikai Bentley MicroStation datorprogrammu vidē. Kā blakus apsvērums ir pieminams šī programmnodrošinājuma attīstība un konsultāciju pakalpojumu pieejamība Latvijā.

Objektu detalizēta fotografēšana to dokumentācijas posmā ir plaši izplatīta metode jau kopš 19. gadsimta astoņdesmitajiem gadiem (4.2. attēls).



4.2.attēls. Valdnieka Džosera piramīda 1924.gadā pirms plaša mēroga arheoloģisko izrakumu sākuma (Firth, Quibell, 1935).

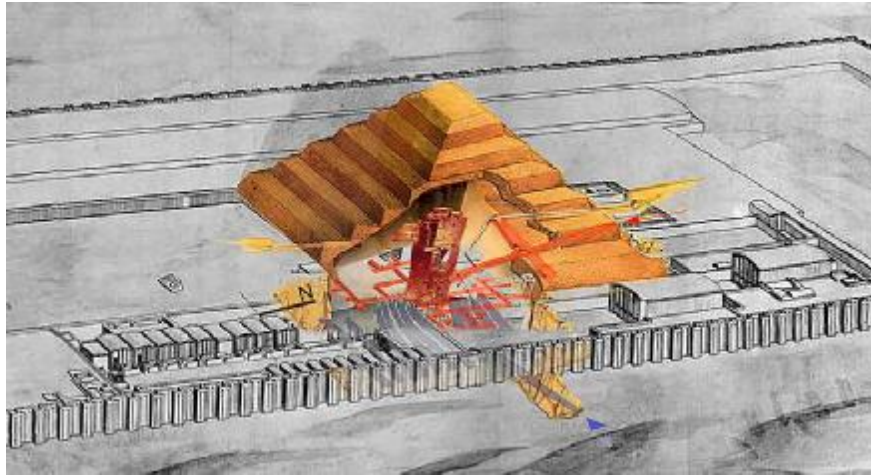
Figure 4.2. The Pyramid of Djoser in 1924 before large archaeological excavations (Firth, Quibell, 1935).

Sākotnēji tie ir atsevišķi attēli vai to grupas, vēlāk tiek ieviestas dažādas foto monitoringa vai secīga uzņēmumu izdarīšana no viena un tā paša skatu punkta ar regulāru laika intervālu, plaši tiek izmantotas dažādas foto attēlu mozaīku un panorāmas attēlu veidošanas metodes, tajā skaitā būvju fasāžu izklātnes utml. (Groat, Wang, 2002). Tomēr minētām metodēm, neatkarīgi no to tehniskā izpildījuma, ir vairāki būtiski trūkumi un galvenais no tiem ir saistīts ar jebkura foto attēla perspektīvo skatījumu, kā arī mērogu deformācijām attēlā. Tie ir galvenie iemesli, kādēļ šie dokumenti tiek ļoti reti izmantoti tehniskajā projektēšanā.

Piramīdas ģeotelpiskā modeļa tehniskai izveidošanai tika izmantoti 2005.-2008.gada Latvijas zinātniskās ekspedīcijas laikā iegūtie 3D lāzerskenēšanas dati Džosera piramīdas pirmajām divām pakāpēm (skaitot uz augšu no pašreizējās zemes virsmas) - tas ir kopā aptuveni 320 miljoni mērvienību (Deslandes, 2007). Sākotnēji, piramīdas attēlošanai telpā tika izveidota aksonometrija, savietojot dažādus piramīdas plānus un šķērs griezumus ar iegūtajiem piramīdas pazemes lāzerskanēšanas datiem. Valdnieka Džosera pakāpienveida piramīdas aksonometrija ir parādīta 4.3.attēlā.

Turpmāk tika veikta 3D lāzerskenēšanas datu apstrāde ar Leica Geosystems programmnodrošinājumu, kas ļāva ģenerēt virsmas modeli ar 3 cm precizitāti piramīdas pirmajai un otrajai pakāpei (Kaļinka, 2008). Piramīdas trešās, ceturtais, piektās un sestās pakāpes izveidei par pamatu tika izmantots jau esošs modelis, kas veidots ar Google SketChup programmu (3d-model for GoogleEarth in Google's 3d-warehouse, 2009) (4.4.attēls), veicot tā koriģēšanu, balstoties uz Džosera piramīdas arhīva dokumentos pieejamiem griezumiem.





4.3. attēls. Valdnieka Džosera piramīdas aksonometrija (Deslandes, 2007).  
Figure 4.3. Axonometry of the Djoser's pyramid (Deslandes, 2007).

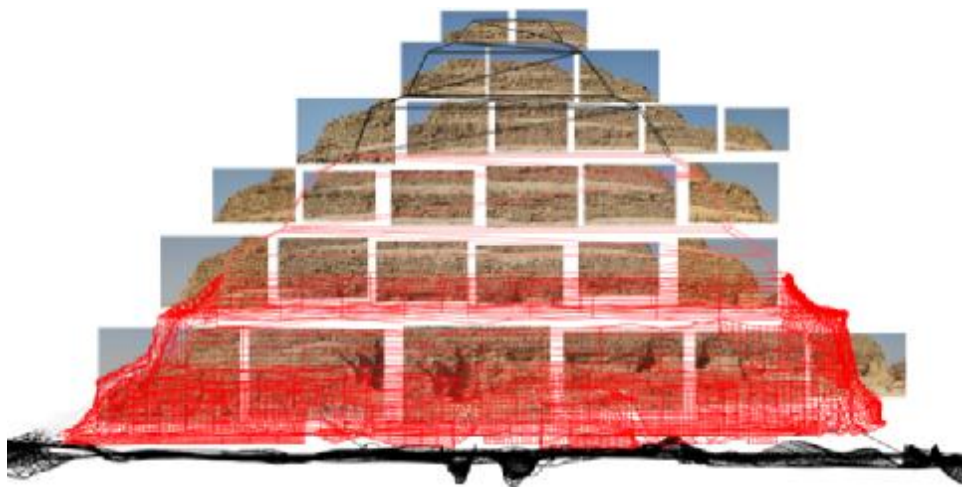
Tādejādi tika iegūts ģeometriski precīzāks modelis, kurā piramīdas trešā, ceturtnā, piektā un sestā pakāpe 3D modelī tika veidota kā plakne, savukārt pirmā un otrā pakāpe - pietuvināta reālai virsmai. Ģeotelpiskā modeļa noslēguma versija veidota, izmantojot MicroStation V8i iestrādāto virsmas veidošanas algoritmu *smartsurface*, kas neaizņem lielu datora operatīvās atmiņas lielumu virsmas vizualizēšanai. Algoritms ļauj uz virsmas plaknēm projicēt augstas izšķirtspējas ortofoto attēlus, papildinot izstrādāto modeli.



4.4. attēls. Pakāpju piramīdas Sakārā 3D modelis (pa kreisi) un šīs piramīdas satelīta fotogrāfija GoogleEarth programmā (pa labi).  
Figure 4.4. 3D model of the Step pyramid at Saqqara (on the left) and aerial photograph of GoogleEarth (on the right).

Piramīdas ģeotelpiskā modeļa izstrādes vajadzībām no iepriekšēji izveidotās datu bāzes tika atlasītas fotogrāfijas, kurās ir attēloti piramīdas fasāžu kopskati. Izlasei ir derīgi arī attēli, kuros fasādes daļēji sedz tai nepiederīgi priekšmeti un konstrukcijas (piemēram, celtniecības stalažas). Šādas fotogrāfijas ļauj iegūt papildus datus par piramīdas konkrētās fasādes dimensijām un proporcijām. Tādēļ šī uzdevuma izpildei būtisks kritērijs ir fasādes pilnīgs atainojums fotogrāfijā (atspoguļota piramīdas fasādes augšējā, daļa, pamatne, iespējami pilnīgi abas sānu malas).

Piramīdas atsevišķu fasāžu foto mozaīkas (foto montāžas) izveidei un tās tālākai integrācijai izstrādātajā 3D modelī no izveidotās datu bāzes tika atlasīti tādi fasāžu fragmentu fotoattēli, kas ļauj iegūt iespējami detalizētu informāciju par fasādes atsevišķiem laukumiem. Šādam mērķim derīgi ir attēli, kuri uzņemti vismaz ar 5 Mpix kameru un izšķirtspēju vismaz 72 dpi (attēla datnes lielums ne mazāks kā 2 Mb) un aptver vismaz dažus kvadrātmetrus laukuma, kas ļauj droši identificēt tā piesaisti telpā. Lai izveidotu piramīdas atbilstošās fasādes foto mozaīku, ir nepieciešams tāds fotoattēlu kopums, lai ar to pilnībā varētu nosegt visu attēlojamās fasādes platību (katru piramīdas pakāpi un starppakāpienu slāni) (4.5. attēls). Tāpat ir nepieciešams, lai šo fasāžu fragmentu blakus pārklājums būtu vismaz par 30%. Šādas prasības ļauj iespējami precīzi fotoattēlus savstarpēji savietot.



4.5. attēls. Pakāpju Piramīdas fasādes fotomozaīkas izveidei nepieciešamo attēlu kopuma shematiskais attēlojums.

Figure 4.5. Schematic depiction of the photomosaic necessary to cover a façade of the Step Pyramid.

Piramīdas fasāžu foto mozaīkas izveidei katrs no datu bāzes atlasītais fotoattēls tiek koriģēts, izmantojot datorprogrammu PT Lens 8.7.8, kas ļauj labot optikas ietekmi uz fotoattēlu (tādu kā objektīva lēcas izliekums, krāsu novirzes un attēla perspektīva). Šī korekcija ir nepieciešama, lai katrs attēls būtu viendabīgs un savstarpēji salīdzināms ar citiem attēliem, kas uzņemti atšķirīgos apstākļos vai iegūti pēc vairākiem gadiem. Veicot attēlu korekciju pētījuma vajadzībām, tika izmantota attēla perspektīvas korekcijas funkcija minētajā datorprogrammā, jo vairums fotoattēlu tika uzņemti apstākļos, kad foto kameras sensori nav precīzi paralēli fotografējamajam objektam. Šādā gadījumā, veicot fotoattēla vertikālās un horizontālās ass korekciju ir iespējams panākt, ka attēlotais objekts vai atbilstošais tā fragments ir izvietots pretstatā. Ir svarīgi ņemt vērā, ka veicot būtiskas vertikālās vai horizontālās ass korekcijas (virs + 20 vai - 20 nosacītām vienībām) sākotnējais attēls tiek būtiski deformēts, kas var ietekmēt attēlā esošo datu piemērotību konkrētu pētījuma mērķu sasniegšanai. Programmā iestrādātais priekšskatījuma logs ļauj vizuāli novērtēt veicamās attēla izmaiņas pirms šo izmaiņu saglabāšanas. Koriģētais attēls tiek saglabāts kā atsevišķa datne mapē, kurā esošos datus turpmāk paredzēts izmantot piramīdas 3D modeļa izstrādē. Sākotnējam datnes nosaukumam automātiski

tiek pievienots „.pt” un datnei tiek saglabāts oriģinālās datnes formāts „.jpg”. Oriģinālais attēls tiek atstāts bez korekcijām tā sākotnējā atrašanās mapē datu bāzē.

Gadījumā, ja foto mozaikas izveides vajadzībām tiek izmantots attēls, kur līdz ar piramīdas atbilstošo fasādi vai tās fragmentu ir redzami arī debess fragmenti, tos ir nepieciešams no fotoattēla dzēst un aizstāt ar baltu fonu. Minētā darbība ir nepieciešama un ļauj izvairīties no kļūdainas attēlu interpretācijas. Korekcija tiek veikta ar datorprogrammas Adobe Photoshop CS5 palīdzību. Šim nolūkam PT Lens datorprogrammā koriģētais fotoattēls tiek apstrādāts ar Adobe Photoshop atbilstošu rīku („*the Magic Wand tool*”), kas ļauj atpazīt vienādas nokrāsas zonas (konkrētā gadījumā – debesis) un dzēst tās no attēla.

Pēc attēlu korekcijas darbību veikšanas, fotoattēli tiek projicēti uz piramīdas 3D modeļa ar projektīvo transformācijas metodi caur projekcijas centrālo punktu. Tādējādi tiek nodrošināta attēla transformācija uz piramīdas plaknēm. Pēc transformācijas veikšanas tiek veidota plakņu mozaika katrai līmeņa plaknei. Šī metode ir detalizēti aprakstīta zemāk.

Atlasīto un iepriekšēji apstrādāto attēlu mozaikas novietošana uz iepriekš izstrādātā piramīdas ģeotelpiskā modeļa tiek īstenota ar datorprogrammas MicroStation V8i moduli „Descartes”, kas ir īpaši piemērots darbam ar foto attēliem un nodrošina divu rastra attēlu apvienošanu vienā. Sākotnēji, no 3D datnes tiek eksportēta objekta pētāmā daļa (fasāde), saglabājot to atsevišķā jaunā darba datnē 2D vidē. Pirms tiek uzsākta foto mozaikas veidošana, visi attēli, kas nepieciešami konkrētas fasādes foto mozaikas izveidei, tiek atlasīti vienā dokumentu mapē, kas ļauj būtiski atvieglot orientēšanos darba datnēs. Katrs fotoattēls, pēc tā korekcijas datorprogrammā PT Lens 8.7.8. tiek ģeoreferencēts, izveidojot tam atbilstošu koordināšu datni ar identisku datnes nosaukumu. Foto mozaikas izveide tiek veikta 2D vidē ar tālāku tās pārnēsi uz izstrādāto 3D modeli. Līdz ar to, katram objektam, ar kuru ir paredzēts strādāt 3D vidē ir jābūt definētam koordinātu sistēmā, kur koordinātu asis ir paralēlas objekta plaknēm, tādējādi iegūstot ģeoreferencētus attēlus ar ierakstītām koordinātēm un atļaujot to turpmāku izmantošanu ĢIS.

Katram piramīdas pakāpienam tiek veidota atsevišķa darba datne 2D vidē. Sākotnēji, kā rasta atbalstdatne tiek pievienots atbilstošās fasādes kopskata attēls, kurš tiek ģeoreferencēts ar funkcijas „*warp raster*” palīdzību 2D fasādes atbilstošās pakāpes modelim, izmantojot saistīto punktu metodi (*affine*). Tā ietver rastra attēla nepieciešamo pārvietošanu, mērogošanu, pagriešanu un sašķiešanu (*skew*). Šī procedūra ir nepieciešama, lai detālos fasādes fragmentu fotoattēlus būtu iespējams pēc iespējas precīzāk piesaistīt iepriekšēji izveidotam fasādes modelim. Pie ģeoreferencēšanas secīgi norāda punktu pārus (punkts, no kura tiek veikta transformēšana un tam atbilstošais punkts, uz kuru tiek veikta transformēšana).

Atsevišķos fasādes fragmenta (laukuma) fotoattēlus nākošajā daba posmā sāk secīgi pievienot vienu pēc otra, sākot no atbilstošās fasādes pakāpiena vienas malas. Šī soļa īstenošanai, tiek izmantota rastra atbalstdatnes reģistrācijas dialoga funkcija (*raster register dialog*) vismaz 4 kontrolpunktu atlikšanas režīmā (*4 points + perspective*). Ar šīs funkcijas palīdzību ar viena pikseļa precizitāti tiek savienoti atbilstošie punkti uz fasādes fragmenta augstas izšķirtspējas fotoattēla un atbilstošam punktam uz 2D datnes (piramīdas atbilstošās fasādes attēla). Vidējais viena pievienojamā fasādes fragmenta fotoattēla punktu skaits ir apm. 20-30, jo tiek atzīmēti ne tikai fotoattēla stūra punkti, bet arī vairāki punkti no fotoattēla vidusdaļas, kas ļauj nodrošināt augstāku attēlu savietojamības precizitāti. Reģistrācijas dialoga logā tiek atspoguļoti visi atzīmētie punkti, kā arī šo punktu koordinātas. Ailē, kur tiek

atspoguļots XY koordināšu kopums, tiek uzrādīta arī iespējamā savietojamo punktu precizitātes nobīde (darba vienībās). Labas attēlu savietojamības kvalitātes nodrošināšanai, šai nobīdei nevajadzētu būt vairāk kā 0.2000 darba vienības (ideālā gadījumā šī nobīde ir vienāda ar 0).

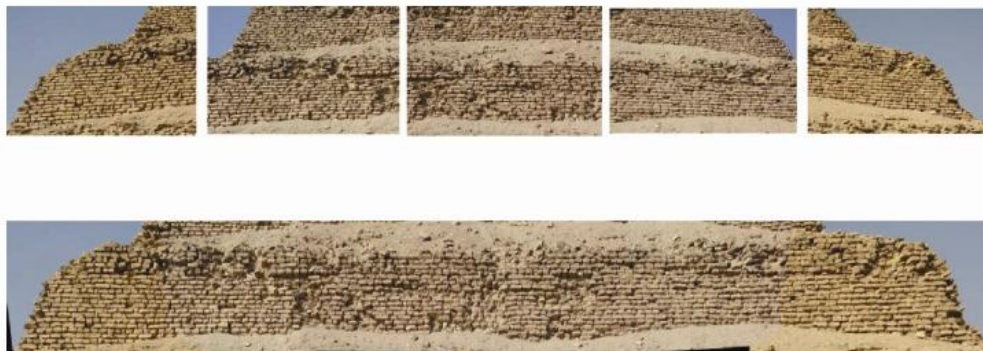
Kad visi nepieciešamie punkti ir atlikti, šo punktu kopuma matricu saglabā atsevišķā datnē, izmantojot funkciju „Save as” un izveidojot datni ar brīvi piešķirto nosaukumu un datnes paplašinājumu (formātu) „.rgr”. Kad punktu matrica ir saglabāta, ar punktu modeļa dialoga (*resampling dialog*) funkcijas palīdzību tiek veidots jauna rastra atbalstdatne, kura, pēc saglabātās punktu matricas, tiek savietota ar atbilstošo piramīdas fasādes fona attēlu precīzi definētā vietā. Punktu modeļa dialoga logā tiek izvēlēts sākotnējās datnes nosaukums (*input image*) – tas ir attēls, kurš tiek šajā darbības brīdī tiek pievienots modelim. Kā modeļa nosaukums (*model*) tiek izvēlēts saglabātā atlikto punktu matricas datne un kā rezultāta datne (*output image*) tiek norādīts jaunās datnes nosaukums „Tag Image File Format - \*.tif.” datu formātā, piešķirot šai datnei brīvi izvēlētu nosaukumu, bet datnes opcijās pie ģeogrāfiskās informācijas izvēlnes norādot „world file”, kas nepieciešams, lai piesaistītu to koordinātu sistēmai. Kvalitatīvai punktu savietošanai, punktu modeļa dialoga logā tiek izvēlēta bilineārās interpolācijas metode (*bilinair interpolation*), saglabājot esošo pikseļu izmēru (*same pixel size*). Darbību pabeidz, aktivizējot „Run all” rīku. Šādi jaunizveidotā fotoattēla datne automātiski tiek atvērta un novietota atbilstoši saglabātajai punktu matricai.

Turpmākajā darbā katrs nākamais fasādes fragmenta (laukuma) fotoattēls tiek pievienots iepriekšēji aprakstītā veidā, līdz visi piramīdas atbilstošās fasādes pakāpienu veidojošie fotoattēli ir savienoti savā starpā. Starp savienotajiem mozaīku veidojošiem attēliem redzamās attēlu robežas tiek izlīdzinātas ar šuvju definēšanas funkcijas (*define seam*) palīdzību. Attēlu robežas vislabāk tiek izlīdzinātas ar „Smart seam type” opcijas palīdzību, kas nodrošina divu blakus esošo attēlu pilnīgu „sapludināšanu”.

Kad visi attiecīgo foto mozaīku veidojošie attēli ir savstarpēji savietoti, šīs datnes ar rastra atbalstdatnes apvienošanas funkcijas (*merge*) palīdzību tiek apvienotas vienotā attēlā, izveidojot datni \*.tif. datu formātā. Arī šajā gadījumā datnei tiek piešķirts brīvi izvēlēts nosaukums, bet datnes opcijās pie ģeogrāfiskās informācijas izvēlnes nepieciešams norādīt opciju „world file”. Viens no foto mozaīkas izveidošanas piemēriem ir parādīts 4.6.attēlā.

Sagatavoto foto mozaīkas datņu pārnese uz izveidoto piramīdas 3D modeli arī tiek īstenota ar datorprogrammas MicroStation V8i moduli „Descartes” palīdzību. Darbam nepieciešamās foto mozaīkas datnes secīgi viena aiz otras tiek pievienotas darba datnei kā rastra atbalstdatnes. Ņemot vērā, ka piramīdas 3D modeli veido trapeces formas taisnstūru kopums, kas ir veidots no atsevišķiem trijstūriem, pirms foto mozaīkas datnes savietošanas ar attiecīgo 3D modeļa fasādes fragmentu, trapeces formas taisnstūrus ir nepieciešams sadalīt to veidojošos trijstūros. Tas tiek realizēts ar „Drop element” funkcijas palīdzību, atzīmējot, ka sadalīts tiek komplekss objekts (*complex*). To turpmākai savietošanai, izmantojot tekstūras rīku (*texture tools*) opciju „assign to area”, konkrētā foto mozaīkas datne tiek attiecināta uz piramīdas 3D modeļa fasādes atbilstošo fragmentu. Tas tiek īstenots ar opcijas „warp to area” palīdzību. Foto mozaīkas datnes savietošana ar piramīdas 3D modeļa fasādes attiecīgo fragmentu tiek realizēta pēc punktu metodes, kura paredz atsevišķu foto mozaīkas datnes punktu (mūsu gadījumā – stūra punktu) savienošanu ar 3D modeļa atbilstoša fragmenta stūra punktiem. Pēc visu nepieciešamo punktu savietošanas, automātiski

tiek veidota jauna foto mozaīkas tekstūras datne *\*tif.* datu formātā ar brīvi piešķirtu nosaukumu.



4.6. attēls. Foto mozaīkas izveidošanas piemērs. Pakāpju piramīdas dienvidu fasādes 3. līmenis no piramīdas pamatnes – darbam atlasītie fotoattēli (augšā) un izveidotā fotomozaīka (apakšā).

Figure 4.6. Example of creation of photo mosaic. The 3<sup>rd</sup> level (from the ground) of the Step pyramid – selection of photographs to be processed (up) and merged photo image (below).

Lai nodrošinātu, ka arī turpmākā darbā ar 3D modeļa datni izveidotās foto mozaīkas tekstūras datnes tiek ievietotas lietotāja noteiktajā koordinātu telpas vietā, šīs datnes rastra atbalstdatņu logā ar funkcijas „Save as” palīdzību papildus ir jāsaglabā arī *\*cot.* datu formātā.

Kad visi piramīdas 3D modeļa attiecīgās fasādes fragmenti ir savietoti ar atbilstošām foto mozaīkas datnēm, tiek veidota kopēja piramīdas fasādes foto mozaīka. Atsevišķi savietotās foto mozaīku datnes ar rastra atbalstdatnes apvienošanas funkcijas (*merge*) palīdzību tiek apvienotas vienotā attēlā, izveidojot datni *\*tif.* datu formātā. Datnei tiek piešķirts brīvi izvēlēts nosaukums, bet datnes opcijās pie ģeogrāfiskās informācijas izvēlnes nepieciešams norādīt opciju „world file”. Arī šajā gadījumā izveidoto kopējo piramīdas 3D modeļa fasādes datni ir ieteicams papildus saglabāt *\*cot.* datu formātā, lai nodrošinātu tās turpmāku precīzu fiksāciju 3D modeļa datnes koordinātu telpas vietā.

Tāpat ģeotelpiskajā modelī ir iespējams integrēt arī punktu kopu, kas iegūta, veicot detaļu objekta 3D skenēšanu. Šajā gadījumā iegūtā 3D punktu kopas datne tiek pievienota datorprogrammas MicroStation V8i moduļa „Descartes” vidē, šim nolūkam izmantojot punktu kopas darbības funkciju „Point Cloud”. Ar punktu kopas datnes pievienošanas opciju „Attach” palīdzību izvēlētajā punktu kopas datne tiek pievienota ģeotelpiskajam modelim.

Lai iegūtos 3D skenēšanas datus varētu pielietot kā vizuālo materiālu, sākotnējo objekta 3D skenēšanu būtu jāveic ar augstas precizitātes soli (5-15 mm) (Kalinka, 2008). Valdnieka Džosera piramīdas 3D skenēšanas punktu kopa tika iegūta, izmantojot 3-5 cm skenēšanas soli, kas diemžēl ir nepietiekams, lai analizētu piramīdas akmens bloku struktūru, bet tomēr piemērots objekta vispārējās struktūras izmaiņu analīzei. Šī iemesla dēļ piramīdas 3D punktu kopa netika izmantota kā pamats speciālās informācijas integrācijai.

Vēl labākus rezultātus varētu iegūt, izmantot tehnoloģiskās iespējas, ko piedāvā fotogrammetriskās programmas 3D modeļu veidošanai vai 3D lāzerskeneru programmas (Neubauer *et al.*, 2005; Kaļinka, Rutkovska, 2007; Kaļinka, 2007). Diemžēl šīs programmas nav pieejamas, bet nākotnē tās būtu nepieciešams attīstīt.

Kā speciālās informācijas līmeņi integrācijai izstrādātajā piramīdas 3D modelī tika izvēlēta piramīdas fasādes eksponēto akmens bloku virsmas saglabātības pakāpes analīze – diagnosticēto dēdēšanas veidu un to intensitātes atspoguļošana, kā arī būves plaisainības analīze, identificējot būves fasādēs konstatējamās plaisas un pārrāvumus.

Dēdēšanas veidu un to intensitātes attēlošana uz iepriekš izstrādātā piramīdas ģeotelpiskā modeļa tiek īstenota ar datorprogrammas MicroStation V8i moduli „Descartes”. Šim nolūkam katrai piramīdas fasādei tiek veidoti atsevišķi dēdēšanas veidu un to intensitātes slāņi (līmeņi). Šāda slāņu izveide atvieglo turpmāko datu analīzi, nodrošinot iespēju vizuāli attēlot gan atsevišķus dēdēšanas veidus, gan arī atsevišķas dēdēšanas intensitātes un to kombinācijas. Darbības ar slāņiem tiek veiktas ar slāņu ietvaru (*Level Display*), savukārt, slāņu pārlikā (*Lever Manager*) tiek veidoti jauni līmeņi un mainīti esošie.

Pētījuma vajadzībām, balsoties uz izstrādāto dēdēšanas veidu un intensitātes piemēru katalogu (5.15. attēls), katrai piramīdas fasādei tika izveidoti 17 jauni slāņi (5 intensitāti apzīmējoši slāņi katram no 3 dēdēšanas veidiem, kā arī slāņi, kuros tiek attēloti piramīdas attiecīgās fasādes neinterpretējamie un no jauna pārbūvētie (restaurētie) laukumi. Visiem vienu dēdēšanas veidu un vienu intensitāti apzīmējošiem slāņiem tiek piešķirti vienādi krāsu un līniju biezuma parametri.

Pirms dēdēšanas laukumu analīzes un izzīmēšanas, slāņu ietvara dialoglogā tiek aktivizēti tikai tie slāņi, kas attiecas uz analizējamo fasādi. Tas būtiski atvieglo izzīmēšanas procesu, kā arī novērš iespēju, ka izzīmējamie laukumi tiks projecēti neatbilstošā plaknē. Ar darba logā esošā skata rotācijas funkcijas palīdzību (*View Rotation*), tiek definēts laukums – attiecīgās fasādes pakāpiens, kurā tālāk tiks izzīmēti atsevišķie dēdēšanas laukumi. Šim nolūkam tiek izvēlēta „3 punktu” (*3 Points*) skata rotācijas metode, tādējādi pagriežot atbilstošo fasādes pakāpiena plakni iespējami pretstatā. Ar „aktīvā dziļuma uzstādīšanas” (*Set Active Depth*) funkcijas palīdzību tiek nodrošināta visu izzīmēto elementu projekcija tikai uz izvēlētajā fasādes pakāpiena iepriekš definētās plaknes.

Atbilstoša dēdēšanas veida un intensitātes laukuma izzīmēšana uz attiecīgās piramīdas fasādes pakāpiena tiek veikta, izmantojot zīmēšanas (*Drawing*) izvēlnes daudzstūru apakšpaletes poligonālā daudzstūra rīku (*Place Shape*). Šim rīkam, atšķirībā no lauztām līnijām vektoru grafikā ir virkne unikālu priekšrocību, tostarp, iespēja noteikt daudzstūra laukumu, kā arī iespēja to aizpildīt (aizliet) ar krāsu vai šķērsvītrojumu. Pirms atbilstošā akmens bloku laukuma izzīmēšanas ir nepieciešams pārliedzināties, ka darba loga augšējā izvēlnē ir aktivizēts atbilstoša dēdēšanas veida un intensitātes līmeņiem.

Pēc augstāk aprakstītās metodes tiek izzīmēti dažādu dēdēšanas veidu un to intensitātes laukumi visu piramīdas fasāžu pakāpēs. Precīzi pēc tās pašas metodes tiek izzīmētas arī plaisas un pārrāvumi, kas konstatējami piramīdas fasādēs (skat. 5.4. un 5.5. attēlu). To izzīmēšanai tiek izmantota daudzfunkciju līnijas (*Place Smartline*) rīks.

Datorprogramma MicroStation V8i paredz iespēju aprēķināt izzīmēto dēdēšanas laukumu platības. Par cik 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). Šo laukumu aprēķināšana tiek veikta, izmantojot šim nolūkam datorprogrammā paredzēto laukuma aprēķināšanas funkciju (*Measure Area*). Laukumu platība tika aprēķināta katrai no sešām piramīdas pakāpēm, katrā piramīdas fasādē, iegūstot platības mērījumus gan atsevišķiem dēdēšanas veidiem, gan arī to dažādām intensitātēm. Minētie aprēķini turpmāk tika grupēti atbilstoši pētījuma ietvaros veicamajam piramīdas būvniecības materiāla un piramīdas kopējās stabilitātes novērtējumam (skat. 5.3. un 5.4. tabulas).

#### 4.5. Senajā valstī izmantotais akmens materiāls

Jau kopš Pirmsdinastiju perioda (Midant-Reynes, 2000; Nicholson, Shaw, 2009) saimnieciskajā aprītē ir visai atšķirīgi akmens materiāli un mākslīgi iegūtas to kompozīcijas, ko izmanto būvniecībā un teritoriju labiekārtošanā (galvenokārt dažādi kleķa materiāli), sadzīves priekšmetu izgatavošanā (daudzveidīga māla keramika). Tiek skalotas upes smiltis un nodalīti aleirīti un māli. Rituālām vajadzībām tiek iegūta soda un sāls, kā arī vairāki citi derīgie izrakteņi. Tomēr akmens materiāls tālākai apstrādei tiek izmantots salīdzinoši reti. Plašāk pazīstamas atsevišķas rotaslietas, kosmētikas trauciņi, kā arī salīdzinoši liels rituālo plākšņu (palešu) skaits (Grimal, 1994; Shaw, 2003).

Neparasti ir tas, ka Ēģiptes senajā kultūrā sākotnēji tiek apgūtas mākslīgu kompozītu materiālu izgatavošanas prasmes un tehnoloģijas un tikai pēc tam akmens apstrāde. To varētu skaidrot ar to, ka akmens apstrādei nepieciešamie instrumenti pilnveidojas ļoti lēni un arī pašā Nīlas ielejā klintssienu atsegumi nav sastopami pietiekoši bieži. Arī senās apdzīvotās vietas vienmēr ir bijušas izvietotas pietiekami tālu no šādām atradnēm. Tādējādi akmens materiāls pats par sevi nav viegli pieejams apstrādei Nīlas plašajā ielejā un pieredze tā izmantošanā ievērojami atpaliek no citu materiālu izmantošanas.

Senākās liecības mērķtiecīgai akmens materiāla izmantošanai saistās ar Pirmsdinastiju perioda senajām Dienvidu valstīm mūsdienu Luksoras, Kinas un Ahmīnas apkārtnē. Tās ir senās pilsētvalstis un to valdnieki, kā arī citas ietekmīgas personas tiek apglabātas zemē raktās, vietām daļēji klintī iekaltās kapu bedrēs, bet virs tām tiek izveidoti akmens krāvumi, nereti arī no ļoti vienkāršas akmens darinātas stēlas.

Pēc Senās Ēģiptes apvienošanas pirmo divu dinastiju laikā Senajā Ēģiptē (3100 –2675 g. p.m.ē.) kā pastāvīgas fiksētas būves virs apbedījumu bedrēm sāka veidot īpašas kapenes. Tās tiek sauktas par mastabām. Sākotnēji mastabas tiek veidotas tikai no māla kleķa saulē žāvētiem ķieģeļiem, tad pakāpeniski to apdarē izmanto akmeni. Vēlāk no akmens tiek veidotas arī nesošās konstrukcijas un pamata sienas, bet vēl vēlāk – jau pilnībā viss ir no akmens. Tomēr arī šajā laikā un sekojošos gadsimtos tiek būvētas arī kleķa mastabas, stingri sekojot senajām tradīcijām līdz par mūsu ēras trešajam gadsimtam. Pirmās dinastijas laikā valdnieku mastabas tiek dekorētas tikai no ārpuses. Kleķa siena tiek noklāta ar kaļķu javu, un uz tās attēlo valdnieka pils apveidus un atsevišķas iedomātas ainas – tāda varētu būt mirušā valdnieka pils aizsaulē. Mastabā blakus apbedīšanas telpai (kamerai) atradās dažādas telpas sadzīves priekšmetu un turpmākai aizkapa dzīvei nepieciešamo lietu izvietošanai. Tomēr raksturīgi, ka tikai šajā laikā mantu glabātuves tiek izvietotas pazemē zem pašas mastabas. Tās tiek ierīkotas sazarotā pazemes tuneļu un telpu sistēmā un ar stāvām kāpnēm tieši savienotas ar mastabas apbedīšanas telpu.

Pakāpeniski otrās dinastijas laikā mastabas sienas tiek nostiprinātas ar akmens blokiem, bet centrālā daļa tiek veidota no akmens mūra (Segliņš, 2011).

Diemžēl līdzīgu akmens materiāla pakāpenisku iekļaušanu saimnieciskā aprīvē un tā apstrādes veidu attīstību nav iespējams izsekot citos pieminekļos kā tikai kapenēs un iespējams, ka šajā posmā ir bijuši arī citi mums pagaidām nezināmi akmens materiālu izmantošanas veidi.

Būvniecībā izmantotais akmens materiāls gandrīz vienmēr ir vietējais kaļķakmens. Iespējams, ka tieši zemās kvalitātes dēļ ilgstoši šis materiāls netiek izmantots, jo viegli pieejami ir tikai dēdējušas klints atlūzas un bluķi, kuru mehāniskā izturība un ilgmūžība būvēs ir ievērojami zemāka nekā plaši izmantotam kļeķa materiālam. Dabiskā akmens materiāla īpašību apzināšana, kā arī kvalitatīva materiāla atrašana prasa noteiktu laiku, jo šādam materiālam pēc kvalitātes ir jābūt labākam kā salīdzinoši lētajam kļeķa ķieģelim. Ir loģiski pieņemt, ka šajā laikā nebija vienkārši artrast līdzsvaru starp ieguvumiem un zaudējumiem attiecībā uz akmens materiāla izmantošanu sakrālajās būvēs, kur kvalitāte, ilgmūžība, vizuālais izskats un izmaksas ne vienmēr bija ieguvumi attiecībā pret jauno – akmens materiāla izmantošanu (Kukela, Seglins, 2012a).

Tomēr pārmaiņas notiek un tās labi ir izsekojamas I-II dinastijas valdnieku un galminieku kapenēs - to pazemes tuneļos. Tiek apgūta ne tikai akmens materiālu kvalitātes apzināšana un īpašību prognoze (izvairoties no plaisainām zonām un vāji cementētām smilšakmens lēcām), bet arī akmens apstrādes paņēmieni un dažādojas darba rīki. Tomēr šajos pazemes tuneļos aizvien plašāk tiek izkalti atsevišķi akmens bloki, kuri turpmāk tiek iestrādāti kā kapenu telpu griestu balsti, tiek izmantoti starpsienu izveidei un izkaltās telpas pārplānošanai (Firth, Quibell, 1935; Labrousse, 1996).

#### **4.6. Būvakmens virsmas dēdēšanas novērtēšana**

Jebkura akmens būve, neatkarīgi no izmantotā akmens materiāla veida un tā kvalitātes ir pakļauta ārējo apstākļu ietekmei. Būvakmens un ar laiku zaudē savas īpašības, tādējādi apdraudot arī visas būves stabilitāti. Šādu procesu, kurā fiziskas vai ķīmiskas iedarbības rezultātā notiek iežu īpašību maiņa un to pakāpeniska sairšana, visbiežāk sauc par dēdēšanu. Dēdēšanai ir zināmi vairāki desmiti visai atšķirīgu definīciju, kurās tiek akcentēti jeb izcelti tie vai citi ietekmējošie faktori, vietējie fizioģeogrāfiskie apstākļi, akmens materiāla mineraloģiskais un ķīmiskais sastāvs, ietekmes intensitāte un ilgums, kā arī daudzi citi (Arnold *et al.*, 1980; Franke *et al.*, 1998; Grassegger, 1999; Verges-Belmin, 2008). Tomēr pētījuma vajadzībām ir lietderīgi pieturēties pie iepriekšēji norādītās vienkāršotās definīcijas, jo vairums no nepieciešamajām ziņām un datiem detalizētākas definīcijas piemērošanai mūsu rīcībā nav, vai arī šie dati ir mazskaitliski.

Mūsdienās, pētot akmens būves, jo īpaši kultūrvēsturiskā mantojuma arhitektūras pieminekļus, galvenokārt, tiek novērtēta to saglabātības pakāpe ar mērķi identificēt potenciālos draudus būves stabilitātei un izstrādāt atbilstošus būves konservācijas plānus (Grimmer, 1984; Alvarez de Buergo, 2002). Ir izstrādātas vairākas nedestruktīvas dēdēšanas intensitātes novērtēšanas metodes (Svahn, 2006; Sass, Viles, 2010), bet to pielietošanai ir nepieciešams tiešs kontakts ar pētāmo objektu (objekta fragmentu vai fasādi), tādēļ šīs metodes nevar tikt izmantotas Ēģiptes pieminekļu pētījumos. Šādu pētījumu pamatā ir izplatītāko akmens materiālu dēdēšanas veidu identifikācija un klasifikācija, kas tiek piemērota un adaptēta



konkrētā pētījuma veikšanas apstākļiem un šāda pētījuma mērķiem. Tādēļ ir likumsakarīgi, ka akmens materiāla dēdēšanas novērtēšanas vajadzībām ir izstrādātas ļoti daudzas shēmas un klasifikācijas, to skaits tikai kultūrvēstures pieminekļu pētījumu vajadzībām ir mērāms daudzos desmitos (Verges-Belmin, 2008; Doehne, Price, 2010).

Pētījumi vēsturisko akmens būvju un to elementu saglabāšanā tiek veikti daudzās pasaules valstīs (Bacharach, 1995; Siegesmund, *et.al.*, 2003; Del Monte, Sabbioni, 1986; El-Gohary, 2011), tomēr tām ir daudzi trūkumi un līdzšinēji izstrādātas būvkmens virsmas dēdēšanas diagnostikas metodes ir dārgas un darbietilpīgas, tādēļ kultūrvēstures pieminekļu izpēti un rekonstrukcijas darbu praksē tās tiek izmantotas reti vai tām tiek atvēlēti tikai ļoti ierobežoti parauglaukumi dažādu akmens materiāla paraugu detalizētiem pētījumiem (Klemm, Klemm, 2010).

Tomēr starp daudzajām klasifikācijām un novērtēšanas shēmām ir pazīstamas vairākas tādas dēdēšanas veidu klasifikācijas, kuras ir piemērojamas gan akmens būvēs izmantotā būvniecības materiāla un tā virsmu, gan arī, piemēram, akmeņi kalto attēlu un zīmju, tai skaitā, petroglifu, saglabātības novērtēšanai. Dažas no minētajām ir lietderīgi detalizētāki apskatīt. Tā, piemēram, pēc Deivida Haniborna (Davide B. Honeyborne) izstrādātās dēdēšanas veidu klasifikācijas (Honeyborne, 2006), akmens būvēs izmantotā materiāla sabrukšana tiek klasificēta, nosakot iemeslus, kas šo sabrukšanu izraisa. D. Haniborns klasifikāciju balsta, nosakot materiāla dēdēšanas pamata cēloņus un par tādiem tas uzskata sekojošus faktorus:

- 1) akmens materiāla sairums (vielās zudums) (decay), tostarp, sāļu kristalizācija, sairums gaisā esošā piesārņojuma dēļ un sala izraisīti bojājumi;
- 2) korozija (staining), tostarp, darvainas piesārņojuma pēdas un kārtiņas, lietus izskalojumi, mitrums no ēkas pamatiem, saistvielas, kas satur portlandcementu, kā arī metāla elementi būvēs - varš un tā sakausējumi, dzelzs, arī no tērauda izgatavoti elementi;
- 3) citi dēdēšanas iemesli, kas neietilpst augstāk minētajās kategorijās (neskaitot bioloģisko organismu darbības pēdas un ietekmes), tostarp, vēja erozija, sakaršana un atdzišana, mitrums un izžūšana, uguns un ķīmiskā iedarbība;
- 4) dažādi organismi, tostarp, koki un vītenaugi, papardes, sūnas, alģes, sēnītes, ķērpji, baktērijas, putni un kukaiņi;
- 5) kļūdas, kas pieļautas projektēšanas un būvniecības procesā;
- 6) iemītnieku un apmeklētāju izraisīti bojājumi, tostarp, tiešs kontakts ar akmens materiālu, piemēram, akmens grīdu nodilums un netiešs kontakts ar būves materiālu, piemēram, smēķētāju cigarešu dūmu nosēdumi uz akmens sienām utml.

Šī D. Haniborna izstrādātā klasifikācija palīdz apzināt un identificēt iespējamus faktorus, kas izraisījuši akmens materiāla dēdēšanu, tādējādi palīdzot noteikt pētāmajam piemineklim atbilstošu konservācijas stratēģiju un turpmāk arī mazināt nelabvēlīgo faktoru ietekmi. Vienlaicīgi, šāda pieeja ļauj vērtēt faktorus to dažādībā, retāk – mijiedarbībā, bet neļauj noteikt dominējošo un arī bīstamāko. Vienlaicīgi autors (Honeyborne, 2006) nepiedāvā arī kādu metodiku šo iepriekšēji norādīto dēdēšanu ietekmējošo procesu diagnostikai.

Savukārt, pētnieks Ronalds Dorns (Ronald Dorn) no Arizonas Universitātes, ASV ir veicis tuksneša garozas (*desert rock coatings*) izpēti. Termins „tuksneša garoza” apzīmē plānas garozas, kas veidojas gandrīz uz visām iežu eksponētām virsmām tuksneša apstākļos. Savā pētījumā (Dorn, 2009) R. Dorns ir aprakstījis 14

dažādus iežu garozas paveidus, tādus kā karbonātu slānis, nosēdumu kārtiņas, dzelzs oksīdu kārtiņas, nitrātu garozas, oksīdu garozas, fosfātu slānis, dažādi pigmenti, sāļu garozas, sulfātu garozas, u.c. Tuksneša garozas interpretācijai R. Dorns piedāvā piecu pakāpju hierarhisko ģeoķīmiskās kontroles pieeju, kuras ietvaros tiek apskatīti pieci dažādi tuksneša garozas veidošanās nosacījumu un apstākļu veidi.

Tāpat, šajā pētījumā ir sniegts detalizēts tuksneša garozas izveidošanās mehānisms. Tiek apskatīti trīs vai pat četri galvenie tuksneša garozas veidošanās modeļi:

- 1) abiotisks modelis, kur tuksneša garozas veidojas pastāvīgas putekļu kārtanoblīvēšanās rezultātā, ko ietekmē ārējie laika apstākļi;
- 2) modelis, kas apskata dažādu organismu, tādu kā putekšņi, sporas, ķērpji, baktērijas, un tml., lomu tuksneša garozas veidošanās mehānismā;
- 3) silikātu saistvielas modelis (*silica binding model*), kura pamatā ir pieņēmums, ka silikātu garoziņas veidojas pārkristalizējoties no citu silikātu minerālu putekļu izmēru daļiņām – sākumā sabiezējot un pēc tam veidojot cietu garozu;
- 4) poliģenētisks modelis (*polygenetic model*), kur tuksneša garozas veidojas vairāku procesu mijiedarbības rezultātā.

Pēc R. Dorna secinājumiem, tieši poliģenētiskais modelis ir vienīgais, kas spēj izskaidrot komplekso tuksneša garozas veidošanās mehānismu. Tas tiek raksturots kā process, kurā lēni augošas baktērijas fiksē mangāna un dzelzs daļiņas, kuras tad tiek abiotiski cementētas māla minerālos. Tāpat R. Dorns piedāvā vairākus kritērijus tuksneša garozas veidošanās mehānisma izskaidrošanai, kā arī metodes, kas palīdz novērtēt tuksneša garozas veidošanās secīgumu, ko potenciāli varētu izmantot arī pieminekļu vecuma datēšanā.

R. Dorns, kopā ar pētnieku Nikola Servenī (Niccole V. Cerveny) no Arizonas Universitātes ASV, veica apjomīgu pētījumu, kura objekts bija ne tikai akmens materiāla virsmas dēdēšanas novērtēšana, bet arī akmenī (iezī) iekalto zīmju (petroglifu) identificēšana un saglabāšanas iespēju izvērtēšana. Šāda pētījuma rezultātā tika sagatavots uzskatāms izplatītāko iežu, kuros ir sastopami petroglifi Centrālamerikā, dēdēšanas veidu atlants (Cerveny *et al.*, 2007). Minēto pētnieku izstrādātās dēdēšanas veidu klasifikācijas mērķis bija noteikt klinšu zīmējumu stabilitāti (to izsaka ar īpašu indeksu) un saglabātības pakāpi (nosakot dažādu dēdēšanas veidu intensitātes pakāpi), kā rezultātā tika izveidota īpaša vienkāršotas un ātras dēdēšanas novērtēšanas matrica (tabula jeb lapa). Tiek izdalītas piecas dēdēšanas veidu un galveno ietekmējošo faktoru kategorijas:

- 1) ģeoloģisko faktoru izraisīti bojājumi (klints plaisas, kas ir vai arī nav saistītas ar litifikāciju un izmaiņām pašā akmens struktūrā);
- 2) dažādi faktori, kas potenciāli ietekmē klints stabilitāti (nestabili klints fragmenti, koku saknes, akmens materiāla atslāņošanās, klints pamatnes bojājumi, klints virskārtas sairums un tml.);
- 3) būtiska akmens materiāla zuduma intensitāte (antropogēnās aktivitātes, nozīmīgs virskārtas fragmentu zudums vai izmaiņas, uguns, būtiski klints pamatnes bojājumi, citi dabiski cēloņi);
- 4) neliela akmens materiāla zuduma intensitāte - erozija no nogulumu pārvietošanās, antropogēno faktoru ietekme (ložu pēdas, nelieli skrāpējumi, utml.), alveolizācija, drupšana, akmens materiāla zudums paralēli akmens

virsmas, atslāņošanās, sīkas atlūzas, dažādas intensitātes virsējās kārtas zudumi, noapaļošana, akmens struktūras izmaiņas un citas ar virsmas eroziju saistītas formas);

- 5) nosēdumi un vielas ķīmiska piesaiste uz akmens virsmas - antropogēnie faktori (grafīti, ogles), virskārtas sacietēšana un garoziņu veidošanās, sāls nogulumi uz virsmas vai sāls izgulsnēšanās zem virsslāņa, bioloģiska kolonizācija, dažādu virsslāņa bojājumu veidu kombinācija, dzelzs kārtiņas, oksīdu garozas, virskārtas citi pārklājumi, silikātu glazūras utml.

Šīs klasifikācijas mērķis ir sekmēt novērojumus senu kultūrvēstures pieminekļu sākumizpētes posmā, lai atvieglotu šo pieminekļu saglabāšanu nākotnē. Metode ir vienkārša un nepieciešamos novērojumus ir iespējams veikt, neņemot paraugus detalizētām laboratoriskām pārbaudēm. Tomēr šī metode ir maz piemērota objekta turpmākajā pētniecības posmā, jo piedāvātās shēmas sīkāka detalizācija nav iespējama. Tā atspoguļo tikai dēdēšanas iemeslus, apstākļus, sekas un riskus, tomēr tā ir ļoti efektīga tieši objekta sākotnējam novērtējumam. Iepriekšēji raksturoto klasifikāciju ilustrē autora izdalītie dēdēšanas veidu raksturīgie piemēri (4.7. attēls).





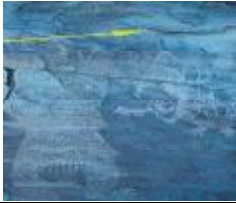






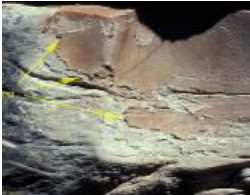



Ļoti nozīmīgs darbs dažādo dēdēšanas veidu klasifikācijas jomā tika paveikts Starptautiskās pieminekļu un vietu padomes starptautiskās zinātniskās akmens izpētes komitejas (*angl. ICOMOS – ISCS*) pētījumu rezultātā. Piesaistot vairāk nekā trīsdesmit speciālistus akmens dēdēšanas, pieminekļu aizsardzības, konservēšanas un restaurācijas jomā no dažādām valstīm, tika izstrādāts akmens dēdēšanas veidu ilustrētais glosārijs (Verges-Belmin, 2008). Šajā glosārijā informācija ir apkopota sešās pamata kopās, kurās sīkāk tiek izdalītas no divām līdz vienpadsmit dažādām dēdēšanas veidu grupām. Glosārijā ir sniegts detalizēts katra apkopotā dēdēšanas veida apraksts angļu un franču valodās, kā arī ievietota konkrēta dēdēšanas veida piemēru ilustrācija.

Šis glosārijs pašreiz tiek uzskatīts par vienu no pilnīgākajiem dēdēšanas veidu katalogiem. Tas aptver dažāda rakstura akmens materiāla bojājumu aprakstu un piemēru ilustrāciju, apskatot dažādus akmens materiālus un dēdēšanas formas, kas ir identificējamas dažādos apstākļos, dažādās klimatiskajās zonās. Tomēr lietišķas ievirzes pētījumos šo glosāriju ir grūti izmantot, par cik tas ir pārāk vispārināts un tā pamata mērķis ir izveidot salīdzinošu sistēmu dažādiem bojājumiem un pieminekļu apdraudējumiem, kas ļautu vienkāršoti novērtēt saglabāšanas pasākumu neatliekamību.

Ļoti izvērstu akmens pieminekļu virsmas dēdēšanas klasifikatoru daudzu gadu gaitā ir izstrādājis vācu zinātnieks Berndts Ficners (Bernd Fitzner), kurš tāpat veica lielu ieguldījumu ICOMOS-ISCS akmens dēdēšanas veidu ilustrētā glosārija izveidē.

Pēc B. Ficnera izstrādātā klasifikatora (Fitzner, Heinrichs, 2002; Fitzner, 2004), sākotnēji tā ir bojājumu pakāpes un laukumu diagnostika, kas turpmāk tiek papildināta ar dažādiem dēdēšanas veidiem un to intensitātes novērtējumiem, kā arī plašiem laboratoriskiem pētījumiem, nosakot dēdēšanas skarto akmens virsmu dažādas mehāniskās, fiziskās un ķīmiskās īpašības. Vairāk kā 10 gadus ilgušo pētījumu rezultāti ir publicēti un apkopotā veidā pieejami to izstrādājušas darba grupas „Dabīgie akmeņi un dēdēšana” interneta vietnē (Fitzner *et al.*, 1995).

Mūsdienās tā joprojām tiek uzskatīta par pašu izvērstāko akmens materiāla izvērtēšanas metodiku darbam kultūrvēstures pieminekļos un tās atsevišķi elementi tiek izmantoti visplašāk jaunāko laiku kapu pieminekļu saglabāšanas un rekonstrukciju pētījumos (Smith, Warke, 1996; O'Brien, 2011)

Bojājumi, neatkarīgi no akmens materiāla petrogrāfiskā sastāva		
		
Augu sakņu izraisīti bojājumi	Izlūzumi	Plaisāšana (sadališanās gabalos)
		
Antropogēnās ietekmes	Uguns ietekme	Iekalumi, švīkājumi un citi mehāniski bojājumi
		
Alveolu veidošanās	Sadrupšana (ar vai bez cementa zaudēšanas) Plīsumi un lūzumi	Izdrupumi
		
Sekundārā cementa veidošanās	Dzelzs sāļu kārtiņa	Sāls ietekme un pārveidojumi
		

4.7. attēls. Petroglifus saturošu iežu dēdēšanas veidu klasifikācijas daži piemēri (Cervený *et al.*, 2007).  
 Figure 4.7. Some examples of petroglyph rock weathering forms (Cervený *et al.*, 2007).

B. Ficnera izstrādātās klasifikācijas vispārējā struktūrā ir izdalīti četri dēdēšanas veidu līmeņi. Pirmais līmenis ietver četras pamata dēdēšanas veidu grupas, tādas kā akmens materiāla zudums, krāsas maiņa un nosēdumi, fragmentu zudums un plaisas/deformācijas. Šīs četras pamata dēdēšanas veidu grupas otrajā līmenī tiek klasificētas, izdalot 25 pamata dēdēšanas formas, no kurām trešajā līmenī tiek izdalītas individuāli dēdēšanas veidi. Ceturtais klasifikācijas līmenis paredz izdalīto parametru intensitātes sadalījumu, kas tiek noteikts, par pamatu ņemot skaitliskas izteiksmes skalu (mm, cm, m,  $\text{cm}^3$ ,  $\text{dm}^3$ ). Tā 1. pamata dēdēšanas veidu grupas, kas raksturo akmens materiāla zudumu intensitātes, parametri ir akmens materiāla zuduma (paralēli akmens virsmai) dziļums (mm, cm); reljefa morfoloģisko izmaiņu raksturošanai izmantotais rādītājs ir reljefa dziļums (mm, cm); akmens fragmentu atlūšanas raksturošanai tiek noteikts atlūzas apjoms ( $\text{cm}^3$ ,  $\text{dm}^3$ ) vai atlūzas dziļums (cm).

Raksturojot 2. pamata dēdēšanas veidu grupas individuālās dēdēšanas formas, kas ietver akmens materiāla krāsas maiņas un nosēdumu identifikāciju, kā intensitātes novērtēšanas parametri tiek noteikta krāsu izmaiņu pakāpe vai attiecīgi nosēdumu apjoms uz akmens virsmas un šo nosēdumu kārtas biezums (mm).











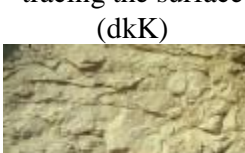

Raksturojot 3. pamata dēdēšanas veidu grupas individuālās dēdēšanas formas, kas apskata akmens materiāla fragmentu zuduma veidus, intensitātes noteikšanai kā parametrs tiek izmantots atdalītā akmens materiāla masas apjoms, kā arī atsevišķu atlūzušo gabalu apjoms ( $\text{cm}^3$ ,  $\text{dm}^3$ ).

4. pamata dēdēšanas veidu grupas individuālās dēdēšanas formas ietver sevī divus dēdēšanas veidus – plaisas un deformācijas. Nosakot plaisu intensitāti, tiek novērtēts plaisu skaits un to dimensijas - garums, platums (mm, cm). Nosakot deformāciju intensitāti, tiek noteikta akmens plāksnes vai atdalītā fragmenta izliekuma amplitūda.

Veicot kompleksu būves saglabātības pakāpes novērtējumu pēc B. Ficnera izstrādātās metodes, ar plašā dēdēšanas veidu kataloga palīdzību identificētās individuālās dēdēšanas formas tālāk tiek novērtētas un raksturotas ar bojājuma kategoriju palīdzību. B. Ficners nosaka sešas bojājuma kategorijas: 0 – redzamo bojājumu nav konstatējami vizuāli (tie var būt slēpti), 1 – pavisam nelieli bojājumi (bojājumi nav dziļāki par 2 mm, vai ir zaudēts ne vairāk par  $10 \text{ cm}^3$ ), 2 – nelieli bojājumi, 3 – mēreni bojājumi, 4 – spēcīgi bojājumi; 5 – ļoti spēcīgi bojājumi. Nosakot konkrētu bojājuma kategoriju, tiek ņemta vērā atbilstošā dēdēšanas veida intensitāte, tā proporcija skartā akmens platībā, akmens struktūras elementa funkcionalitāte, kā arī šī elementa mākslinieciskā un vēsturiskā vērtība.

Pētot kādu konkrētu objektu, bojājuma pakāpes tiek noteiktas, izvērtējot katru no četrām pamata dēdēšanas veidu grupām, kuras identificētas objektā. Tālāk šīs bojājumu pakāpes tiek attīstītas, lai iegūtu kopējo bojājuma pakāpes rādītāju, izejot no visu dēdēšanas veidu grupu novērtējuma. Šī kopējā bojājumu pakāpes noteikšana ir sarežģīta, subjektīva, un tajā nekonsekventi tiek ievērotas atsevišķo elementu lomas (nozīmīgums), novērtējot dēdēšanas rezultātus kopumā. Lai objektus savstarpēji salīdzinātu tiek ieviests īpašs bojājuma indekss (Fitzner, Heinrichs, 2002), bet tā aprēķina rezultātu izmantošanai ir nepieciešami sākotnējie dati, kuru skaitliskās vērtības netiek pievienotas. Līdz ar to, no iepriekšēji minētās metodikas ir vairāki svarīgi elementi, kas ir pārņemami un ieviešami, bet arī vairāki tādi, kuru izmantošana nav lietderīga.

Daži no klasifikācijā izdalītajiem dēdēšanas veidu piemēriem ir parādīti 4.8. attēlā.

<p>1. Akmens materiāla zudums</p> 	<p>2. Krāsas maiņa un nosēdumi</p> 	<p>3. Fragmentu zudums</p> 	<p>4. Plaisas/deformācijas</p> 
<p>Back weathering due to loss of scales (sW)</p>	<p>Soiling by particles from the atmosphere (pI)</p>	<p>Crumbling (Pu)</p>	<p>Fissures independent of stone structure (vL)</p>
			
<p>Rounding / notching (Ro)</p>	<p>Light-colored crust changing the surface (hiC)</p>	<p>Multiple flakes (mF)</p>	<p>Fissures dependent on stone structure (tL)</p>
			
<p>Back weathering due to loss of crusts (cW)</p>	<p>Efflorescences (Ee)</p>	<p>Detachment of a dark-colored crust tracing the surface (dkK)</p>	<p>Deformation, concave (rV) –</p>
			
<p>Clearing out of stone components (Rh)</p>	<p>Subflorescences (Ef)</p>	<p>Crumbling to single scale (Pu-eS)</p>	<p>Deformation, convex (IV)</p>

4.8. attēls. B. Ficnera izstrādātās dēdēšanas veidu klasifikācijas raksturīgākie piemēri, saglabājot autora dotos nosaukumus un simbolu apzīmējumus (Classification scheme of weathering forms, 2002).

Figure 4.8. Some examples of the classification scheme elaborated by B. Fitzner (Classification scheme of weathering forms, 2002).

Balstoties uz izstrādāto klasifikāciju, B. Ficners ir veicis akmens materiāla dēdēšanas novērtēšanas pētījumus vairākos objektos, tostarp, Petrā (Jordānija),

Karnakas Templī Luksorā, Hufu piramīdā Gīzā, El-Merdani mošejā Kairā (Ēģipte). Šo pētījumu rezultātā, analizējot konkrētā akmens pieminekļa fasādes fragmentu, tika identificēti atbilstošas grupas dēdēšanas veidi un noteikta to intensitāte dažādās pakāpes. Bojājumu intensitātes apzīmēšanai, tika izdalītas bojājumu kategorijas no 0 līdz 6, apzīmējot bojājuma intensitāti pieaugošā secībā. Konkrētas bojājumu kategorijas noteikšanai Ficners ir veicis atbilstošā akmens bloka fragmenta instrumentālus mērījumus, nosakot attiecīgi bojājuma dziļumu (mm) vai materiāla zuduma apjomu (cm<sup>3</sup>) – atbilstoši identificētā dēdēšanas veida specifikai. Nākamajā pētījuma solī fasādes fragments un katrā akmens blokā identificētie dēdēšanas veidi un to intensitāte tika shematiski attēloti, veidojot vienotu konkrētā fasādes fragmenta dēdēšanas karti.

### Salīdzinošā diagnostika Snofru (Lauztās jeb Rombveida) piramīdas fasādes akmens materiāla dēdēšanas novērtēšanai Dašūrā

Pētījuma sākuma fāzē salīdzinošā diagnostika tika veikta lauka apstākļos Dašūrā, IV dinastijas valdnieka Snofru Lauztās jeb Rombveida piramīdas ziemeļu fasādē. Šī pētījuma mērķis bija mēģināt atpazīt iespējami plašu dēdēšanas paveidu skaitu, īpašu uzmanību pievēršot B.Ficnera izstrādātajā klasifikācijā (4.8. attēls) neietvertiem dēdēšanas paveidiem.

Iegūtie rezultāti (4.9. attēls) apliecina, ka izstrādātā fotodokumentēšanas un dēdēšanas paveidu diagnostikas metodika ir efektīva un fotodokumentos konstatētais tika atkārtoti pārbaudīts dabā un šīs pārbaudes apstiprināja diagnostikas patiesumu. Šie rezultāti un izstrādātā metodika tika apbēta 2010. gada oktobrī konferencē „Mūsdienu ēģiptoloģijas sasniegumi un problēmas” Maskavā un guva speciālistu atsaucību.



4.9. attēls. Dēdēšanas paveidu diagnostika Rombveida piramīdas (Dašūra) ziemeļu fasādes parauglaukumā.

Figure 4.9. Diagnostic of weathering of the fragment of northern façade of the Bent pyramid at Dashur.

Nemot vērā, ka vienlaicīgi līdzās pastāv daudzas dēdēšanas veidu klasifikācijas un neviena no tām nav universāla un piemērojama visiem objektiem (pieminekļiem) un dabas apstākļiem, ir nepieciešams atrast iespējami piemērotāko no esošajām pamata klasifikācijām, kas varētu kalpot par pamatu to turpmākām adaptācijām salīdzinošo pētījumu gaitā, tādējādi sekmējot mūsu pētījuma vajadzībām piemērotas novērtēšanas sistēmas izstrādi.

### Salīdzinošie pētījumi El-Merdani mošejas sienas parauglaukumā

Pētījuma vajadzībām un metodikas attīstībai sākuma posmā tika izvēlēta tieši B. Ficnera izstrādātā dēdēšanas veidu un to intensitātes klasifikācija (Fitzner, Heinrichs, 2002), par cik šīs klasifikācijas pamatā ir ne tikai pētāmā objekta vizuāls novērtējums, bet arī instrumentāli mērījumi. Minētais ir svarīgi, jo tikai šī klasifikācijas pamatotība un izvēlētas pazīmes ir tikušas vairākkārtīgi pārbaudītas un apstiprinātas ar detalizētām instrumentālām pārbaudēm tieši pašā objektā un laboratorijas apstākļos.

Sākotnēji sagatavotās klasifikācijas aprobācijas un adoptācijas mērķiem tika izvēlēts B. Ficnera veiktais pētījums El-Merdani mošejā Kairas vēsturiskajā centrā (Ēģipte) (Fitzner *et al.*, 2002).

Prinča Altinbugha 1340.gadā uzceltā El-Merdani mošeja ir viens no izcilākajiem 14. gadsimta vēsturiskajiem pieminekļiem pasaulē. Šī celtnē, līdz ar citiem Kairas vecpilsētas Islāma kultūrvēsturiskiem objektiem 1979.gadā tika iekļauta UNESCO Pasaules kultūrvēsturiskā mantojuma sarakstā (4.10. attēls) un mūsdienās ir pieejama apmeklētājiem. Mošejas fasādes sienas ir būvētas no vidējā eocēna kaļķakmens blokiem.

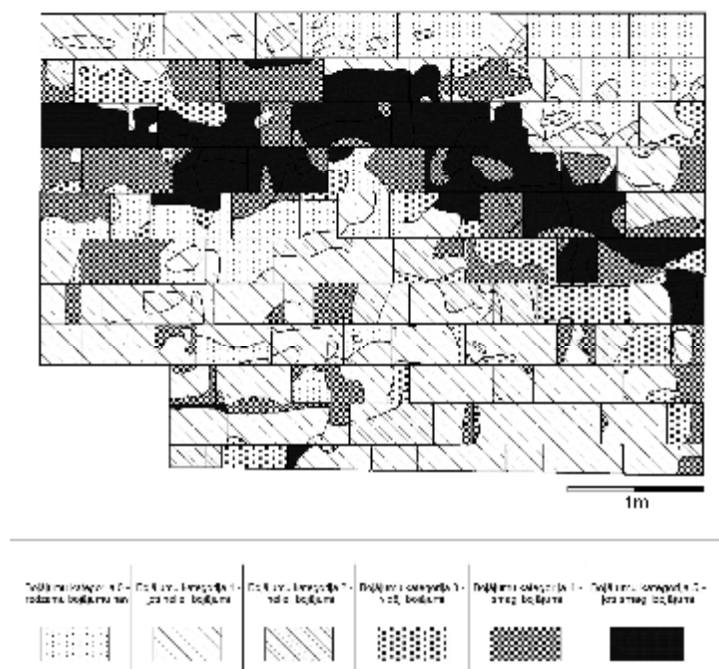


4.10. attēls. El-Merdani mošeja Kairā  
Figure 4.10. El-Merdani Mosque, Cairo.

Savā 2002. gadā veiktajā pētījumā B. Ficners (Fitzner *et al.*, 2002) raksturoja objektu dabā, kā arī ar laboratorijas metodēm veica El-Merdani mošejas fasādes analīzi, kā rezultātā tika izpētīts mošejas celtniecībā izmantotā kaļķakmens minerālais sastāvs un veikta kaļķakmens klasifikācija, balstoties uz kaļķakmens paraugu



mikroskopisko analīzi. Tāpat tika noteiktas arī kaļķakmens dēdēšanas formas un dēdēšanas intensitāte mošejas dienvidaustrumu fasādes apakšējā daļā. Savā El-Merdani mošejas fasādes pētījumā B. Ficners aptuveni 11,7 m<sup>2</sup> lielā laukumā ir izdalījis trīs dēdēšanas rezultātā veidojušās formas un 7 dēdēšanas intensitātes klases, kas rezultātā ļauj izdalīt visas sešas bojājuma kategorijas (4.11. attēls).



4.11. attēls. Bojājumu pakāpes kategoriju karte. El-Merdani mošejas DA fasādes apakšējā daļa pēc B. Ficnera (Fitzner *et al.*, 2002, 18.att.).

Figure 4.11. Map of damage categories. El-Merdani mosque, lower part of the SE facade after B. Fitzner (Fitzner *et al.*, 2002, Fig.18).

Šīs kategorijas ir apstiprinātas ar laboratoriskām pārbaudēm, nosakot kaļķakmens paraugu poru daudzumu, vidējo poru izmēru, pētāmā kaļķakmens blīvumu un ultraskaņas izplatības ātrumu pētītajā materiālā, kā arī kaļķakmens minerālo sastāvu (Fitzner *et al.*, 2002).

Mūsu veiktā būvākmeņu virsmas dēdēšanas pētījuma mērķis bija novērtēt izmaiņas mošejas ārsienas daļā, kuru savulaik pētīja B. Ficners, kā arī veicot salīdzinošu pētījumu, noteikt piemērotu metodi kvalitatīvai dēdēšanas veidu diagnostikai šī reģiona kultūrvēsturiskos objektos ar ierobežotu pieejamību. Šāds risinājums ļāva attīstīt dēdēšanas kvalitatīvas novērtēšanas metodes, kas balstījās uz distancēti veiktiem salīdzinājumiem un novērtējumiem.

Sākotnēji, bija nepieciešams dabā atrast pētāmo objektu. Ņemot vērā, ka El-Merdani mošeja nav atrodama populārāko tūrisma apskates objektu sarakstā, bija jāpieliek ievērojamas pūles, lai noskaidrotu tās precīzu atrašanās vietu lielajā senās Kairas pilsētas daļā. Atrodot El-Merdani mošeju, ar rokas kompasa palīdzību tika noteiktas debess puses ar mērķi identificēt B. Ficnera savulaik pētīto akmens sienas fragmentu mošejas dienvidaustrumu fasādē (4.12. attēls).

Pētījuma gaitā tika veikta detalizēta iepazīšanās ar pētāmo vietu, B. Ficnera pētītā laukuma atpazīšana, kā arī mošejas sienas un tās būvniecībā izmantotā būvakmens apraksts. Tāpat dabā tika atpazīti un identificēti B. Ficnera noteiktie atbilstošā fasādes fragmenta konkrēto akmens bloku dēdēšanas veidi un to intensitāte.



4.12. attēls. B. Ficnera pētītais El-Merdani mošejas sienas laukums (Fitzner *et al.*, 2002, 16.att.) papildināts ar autora iezīmēto pētītā laukuma ierobežojošo līniju.

Figure 4.12. Area studied by B. Fitzner. Photograph taken from the original publication un (Fitzner *et al.*, 2002, Fig.16).

Pētījuma laukuma fotodokumentēšanai tika izmantota digitālā fotokamera SONY DSC-R1 10.3 Mpix ar 72 Dpi izšķirtspēju. Uz vietas tika veikta noteiktās mošejas fasādes fragmenta iepriekšēja dēdēšanas pazīmju novērtēšana, tās tika dokumentētas, iespējami precīzi mēģinot piemērot B. Ficnera izstrādāto fasādes bojājumu identifikācijas skalu. Tika veikti atkārtoti novērojumi uz vietas un modificēta B. Ficnera izstrādātā dēdēšanas pazīmju klasifikācijas sistēma, līdz pazīmes bija iespējams konstatēt uz vietas un arī to noteikšana fotoattēlos kļuva iespējama. Tika novērtēta iegūto fotoattēlu kvalitāte (kontrastainums, iespējas palielināt, apgaismojums, ēnas, krāsu kvalitāte), no attēliem tika veidota pārskata fotomontāža Adobe Photoshop CS5 un turpmāk tika analizēti atsevišķi to veidojošie attēli. Tika veikta datu apstrāde un B.Ficnera piedāvātās klasifikācijas vienkāršošana, kā arī izdalīto dēdēšanas tipu un apakštipu raksturošanas ar digitālajos fotouzņēmumos nosakāmās krāsu kompozīcijas (RGB) vērtībām. Tālāk ar vienkāršotas dēdēšanas klasifikācijas palīdzību tika veikta to diagnostika, pārinterpretējot B. Ficnera publicētos pētījumu rezultātus un jaunus fotodokumentācijas datus. Iegūtās dēdēšanas un tās intensitātes kartes savstarpēji tika korelētas atsevišķu bloku līmenī, izmantojot datorprogrammu Statistica 8.0.

Pētījums tika veikts vairākos posmos, pakāpeniski pilnveidojot izvēlēto pētniecības metodi un to adaptējot dēdēšanas novērtēšanai konkrētajā objektā.

Veicot El-Merdani mošejas Kairā akmens būvmateriāla dēdēšanas veidu diagnostiku, novērojumi norādīja, ka dabā nav iespējams konstatēt visas B.Ficnera izdalītās dēdēšanas grupas, tās nav iespējams konstatēt arī fotodokumentos un tādēļ analīzes veikšanai bija nepieciešams veikt B. Ficnera izmantotās klasifikācijas

vienkāršošanu, tas ir, tās adaptāciju līdz vizuāli konstatējamām un nekļūdīgi atkārtoti diagnosticējam pazīmēm. Tā balstījās uz dabā veiktiem novērojumiem un fotomozaikā atpazīstamiem dēdēšanas veidiem, nosakot, ka izdalāmajam apakštipam visā laukumā ir jābūt konstatētiem vismaz divos atsevišķos fasādes blokos un izdalītajam dēdēšanas apakštipam ir jābūt atpazīstamam atsevišķos foto uzņēmumos un tā kontūrām - nosakāmām (iezīmējamās slēgtā kontūrā). Tika izdalītas trīs dominējošās akmens materiāla dēdēšanas formas (tipi) un kopā 10 dēdēšanas intensitātes apakštipi (Kukela, Seglins, 2011b).

Iegūto datu salīdzināšanas posmā tika veiktas papildus pārbaudes. Ar datorprogrammu Adobe Photoshop CS5 noteiktie RGB lielumi tika salīdzināti ar RGB vērtībām tiem pašiem fotoattēliem datorprogrammā Corel Draw 11 un iegūtās atšķirības nepārsniedza  $\pm 2$  vienības konkrētā dēdēšanas apakštipa laukuma robežās. Otra veida pārbaudes tika veiktas viena un tā paša akmens bloka dažādu dēdēšanas apakštipu krāsas salīdzināšanai divos dažādos fotouzņēmumos un arī šajā gadījumā konstatētās atšķirības nepārsniedza  $\pm 2$  vienības. Norādītā augstā mērījumu sakritība ļauj sagatavot konkrētā pētījuma objekta vajadzībām vienkāršotu dēdēšanas veidu un intensitātes apakštipu klasifikāciju un konstatētās pazīmes raksturot ar tipiskām RGB vērtībām. Iegūtie krāsu novērtējuma rezultāti tika iestrādāti adaptētā dēdēšanas pazīmju klasifikācijā kā papildus rādītājs (4.1. tabula). Atzīmējams, ka RGB krāsu skala ģeoloģiskos pētījumos jau tika izmantot arī iepriekš, veidojot Ēģiptes akmens materiāla atradņu (iespējamo karjeru būvmateriālu ieguvei Vidējās un Jaunās valsts laikā) paraugu plānslīpējumu digitālos attēlus, tādējādi atvieglojot šo materiālu identificēšanu un dokumentēšanu nākotnē (Harrell, Storemyr, 2009). Tomēr šie eksperimenti netika atzīti par sekmīgiem nepietiekoši kvalitatīva izmantotā tehniskā nodrošinājuma dēļ, uz ko norādīja arī paši šī pētījuma autori.

4.1. tabula. Dēdēšanas pazīmju klasifikācija El-Merdani mošejas fasādes pētījumam  
Table 4.1. Classification of weathering features for the study of El-Merdani mosque

<i>Dominējošā dēdēšanas forma un tās skaidrojums (dēdēšanas tips)</i>	<i>Novērotā dēdēšanas intensitāte (apakštips)</i>	<i>Intensitātes vizuālai noteikšanai izmantotie kritēriji</i>	<i>Raksturīgais RGB rādītājs</i>
<b>Virsmas atslāpošanās (W)</b> Akmens materiāla zudums paralēli akmens sākotnējai virsmai.	W1	- akmens bloka virsmas garozas virsējā slāņa eksfoliācija	R:154, G:137; B:115
	W2	- akmens bloka virsmas garozas virsējā slāņa eksfoliācija ar tam sekojošu akmens materiālu	R:152, G:135, B:115
	W3	- akmens bloka virsmas garozas virsējā slāņa eksfoliācija ar tam sekojošu akmens materiālu lielākā dziļumā no virsmas, salīdzinot ar W2	R:145, G:129, B:110

## 4.1. tabulas turpinājums

<i>Dominējošā dēdēšanas forma un tās skaidrojums (dēdēšanas tips)</i>	<i>Novērotā dēdēšanas intensitāte (apakštips)</i>	<i>Intensitātes vizuālai noteikšanai izmantotie kritēriji</i>	<i>Raksturīgais RGB rādītājs</i>
<b>Virsmas reljefa izmaiņas (R)</b> Akmens virsmas morfoloģiskās izmaiņas daļējas vai selektīvas dēdēšanas rezultātā	R1	- akmens bloka virsmas nelielas izmaiņas	R:117, G:104, B:62
	R2	- akmens bloka virsmas izmaiņas, zaudējot nelielu akmens virsējā slāņa daļu	R:154, G:136, B:114
	R3	- akmens bloku virsmas lielas izmaiņas, zaudējot lielu akmens virsējā slāņa daļu, salīdzinot ar R2	R:163, G:143, B:120
	R4	- akmens bloku virsmas būtiskas izmaiņas, zaudējot ievērojamu akmens virsējā slāņa daļu, salīdzinot ar R3	R:182, G:164, B:136
<b>Fragmentu zudums (O)</b> Kompakto akmens fragmentu zudums	O1	- neliela akmens fragmenta zudums	R:125, G:107, B:91
	O2	- vidēja akmens fragmenta zudums	R:103, G:83, B:59
	O3	- liela akmens fragmenta zudums, salīdzinot ar O1 un O2.	R:87, G:65, B:51

Dēdēšanas formu un to intensitātes diagnostika un kartografēšana tika veikta pēc 2010. gada septembrī uzņemtām fotogrāfijām, analizējot mošejas dienvidaustrumu fasādes fragmenta katru akmens bloka virsmu.

Konstatētie dēdēšanas veidi un to intensitāte tika novērtēta pēc iepriekšēji izstrādātās vienkāršotās dēdēšanas tipu klasifikācijas shēmas (4.1. tabula). Ņemot vērā, ka fizisku ierobežojumu dēļ nebija iespējams atkārtoti precīzi izpētīt visu B. Ficnera sākotnēji pētīto laukumu, analīzei tika izvēlēts mazāks laukums aptuveni 3,7 m<sup>2</sup> platībā, kuru neaizsedza neviens nepiederošs objekts.

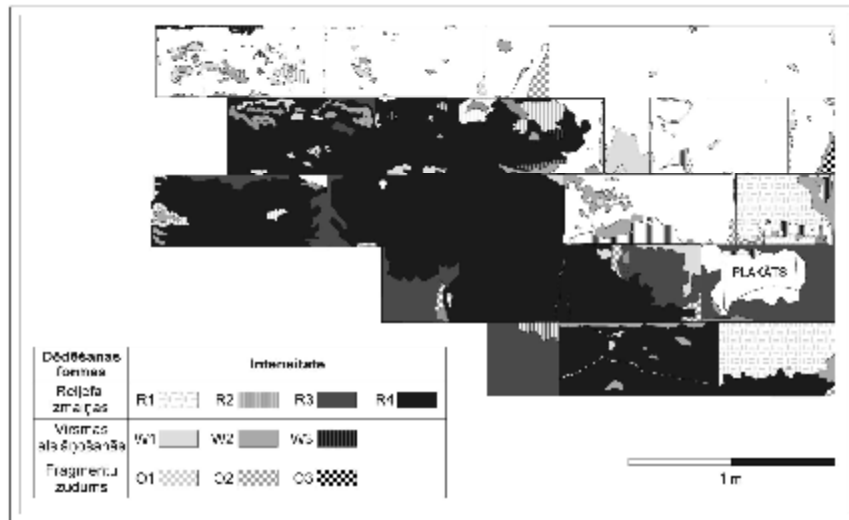
Pētījumā ar iepriekšēji raksturotās metodes un vienkāršotas dēdēšanas veidu klasifikācijas palīdzību (4.1. tabula) El-Merdani mošejas dienvidaustrumu fasādes vienam un tam pašam fragmentam tika iegūtas divas analizētās dēdēšanas veidu un to intensitātes kartes.



4.13. attēls. El-Merdani mošejas DA fasādes apakšējā daļa ar shematiski atzīmēto pētījuma laukumu.

Figure 4.13. Lower part of the SA facade of El-Merdani mosque studied by author.

Viena no tām tika iegūta analizējot 2010.gadā autora uzņemto fasādes fragmenta (4.13. attēls) fotogrāfijas, bet otra – analizējot B. Ficnera publikācijā (Fitzner *et al.*, 2002) pieejamo fasādes fragmenta fotogrāfiju. Pētījumu rezultātā iegūto fasādes dēdēšanas veidu kartes ir parādītas 4.14. un 4.15. attēlā.

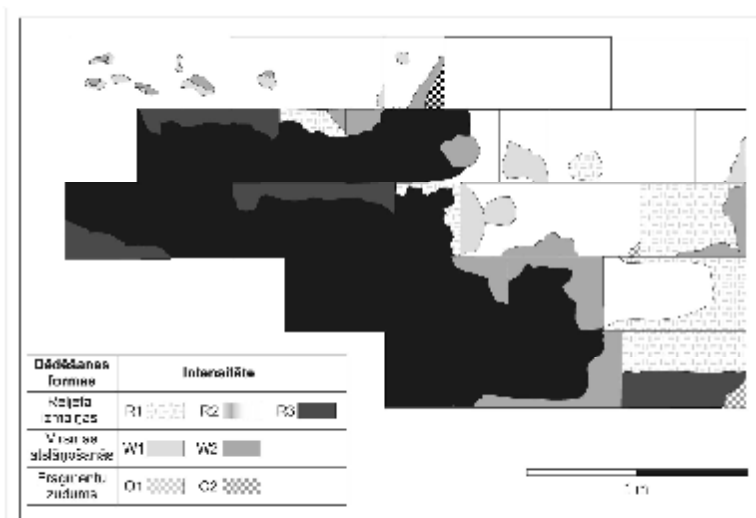


4.14. attēls. Pēc autora pētījuma metodes un dēdēšanas pazīmju klasifikācijas (4.1. tabula) iegūtā mošejas fasādes fragmenta dēdēšanas veidu un to intensitātes karte.

Figure 4.14. Map of weathering forms and weathering intensities resulting from the analysis of the photograph made by the authors in the year 2010.

Iegūtie rezultāti vizuāli ir līdzīgi (4.14. un 4.15. attēls), lai arī ir konstatējamas noteiktas atšķirības. Pārbaudot dabā tika konstatēts, ka tās attiecas tikai uz dēdēšanas intensitātes novērtēšanas atšķirībām. Lai korekti veiktu iegūto datu savstarpējo salīdzināšanu, papildus autora iegūtajām fasādes fragmenta dēdēšanas veidu un to intensitātes kartēm, tika izmantota arī B. Ficnera pētījuma rezultātā iegūtā fasādes fragmenta dēdēšanas karte (Fitzner, et al., 2002) (4.16. attēls).

Tomēr šādu salīdzināšanu mehāniski nav iespējams veikt, pat neņemot vērā, ka minētos novērojumus šķir 10 gadu periods. Galvenais iemesls ir izdalīto dēdēšanas apakštipu (intensitātes) dažāda skaits.



4.15. attēls. Modificētās metodikas realizācijas piemērs: akmens materiāla virsmas dēdēšanas veidu un to intensitātes karte. Mošejas fasādes fragments (4.13. attēls).

Figure 4.15. Map of weathering forms and weathering intensities resulting from the analysis of the photograph published by B. Fitzner applying methodology elaborated by the authors.

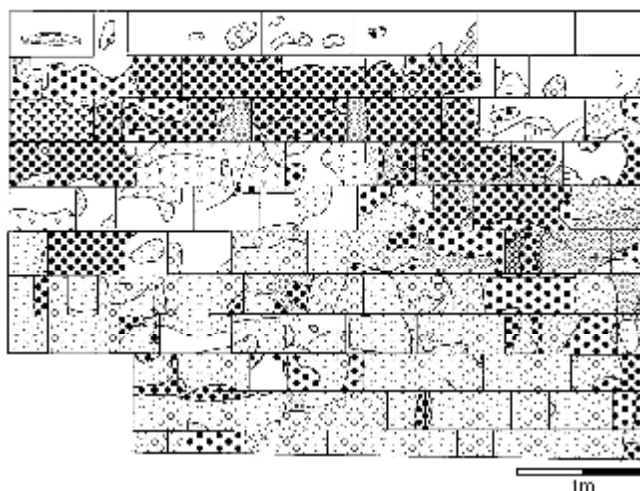
Tā B. Ficnera pētījumā summāri ir izdalīti 16 dažādas dēdēšanas tipu intensitātes, bet autora pētījumā, analizējot 2010. gadā uzņemto mošejas fasādes fotogrāfiju izdalītas 10 tipu intensitātes.

Savukārt, ar autora izstrādāto metodi, analizējot B. Ficnera pētījumā izmantoto fotogrāfiju, ņemot vērā publicētās fotogrāfijas zemo izšķirtspēju, bija iespējams izdalīt tikai 7 dēdēšanas intensitātes apakštipus. Tādēļ šo atšķirīgo datu savstarpējam salīdzinājumam bija nepieciešams veikt pētījuma rezultātā iegūto dēdēšanas tipu intensitāšu vienkāršošanu un vienādošanu, lai būtu iespējama to savstarpēja korelācija.

Šim nolūkam, vadoties pēc dēdēšanas tipu intensitātes vizuālās atpazīstamības, B. Ficnera pētījumā izdalīto 16 dažādo dēdēšanas tipu intensitāšu skaits tika reducēts līdz 10, lai varētu salīdzināt ar 2010. gadā veiktā mošejas fasādes fotouzņēmuma dēdēšanas analīzes rezultātiem un līdz 7, lai attiecīgi varētu salīdzināt ar 2002. gadā publicētās fotogrāfijas analīzes rezultātiem pēc autora izstrādātās dēdēšanas novērtēšanas metodes. Tādējādi tika iegūtas trīs dažādas vienas un tā paša pētītā laukuma dēdēšanas veidu un intensitātes izplatības kartes - divas no tām pēc minētās procedūras veikšanas ir sagatavotas pēc vienotas klasifikācijas (4.14. un 4.15. attēls) un trešā – ir B. Ficnera pētījuma oriģināls (4.16. attēls).

Datu korelācijas novērtēšanai tika salīdzināta katra analizētā mošejas fasādes fragmenta akmens bloka virsma, atzīmējot redzamo dēdēšanas tipu un tā intensitāti – kopā 24 akmens bloku eksponētās virsmas. No šīs analīzes tika izslēgts viens parametrs, t.i., 2002. gadā publicētajā fotogrāfijā uz viena no akmens bloka virsmām

fiksētais vidējās intensitātes virsmas atslāpošanās dēdēšanas veida laukums (dēdējuma fragments), kas uzsākot pētījumu 2010. gadā bija jau ir nolūzis.



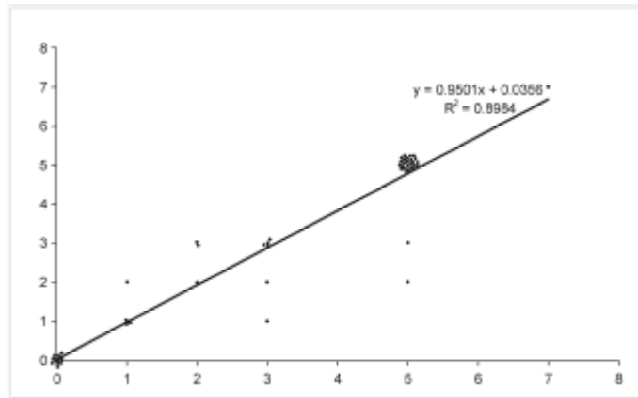
DĒDĒŠANAS FORMAS	INTENSITĀTE						
Virsmas atslāpošanas (W)	Intensitāte, pamatojoties uz virsmas atslāpošanas parametra "d" dziļumu (cm)						
	Intensitāte 1 d ≤ 0,2	Intensitāte 2 0,2 < d ≤ 0,5	Intensitāte 3 0,5 < d ≤ 1	Intensitāte 4 1 < d ≤ 3	Intensitāte 5 3 < d ≤ 5	Intensitāte 6 5 < d ≤ 10	Intensitāte 7 d > 10
	sW	[Symbol]	[Symbol]	[Symbol]	[Symbol]	[Symbol]	[Symbol]
	cW	[Symbol]	[Symbol]	[Symbol]	[Symbol]	[Symbol]	[Symbol]
zW	[Symbol]	[Symbol]	[Symbol]	[Symbol]	[Symbol]	[Symbol]	[Symbol]
Reljefa izmaiņas (R)	Intensitāte, pamatojoties uz reljefa izmaiņu parametra "d" dziļumu (cm)						
	Intensitāte 1 d ≤ 0,2	Intensitāte 2 0,2 < d ≤ 0,5	Intensitāte 3 0,5 < d ≤ 1	Intensitāte 4 1 < d ≤ 3	Intensitāte 5 3 < d ≤ 5	Intensitāte 6 5 < d ≤ 10	Intensitāte 7 d > 10
	R <sub>0</sub>	[Symbol]	[Symbol]	[Symbol]	[Symbol]	[Symbol]	[Symbol]
	[Symbol]	[Symbol]	[Symbol]	[Symbol]	[Symbol]	[Symbol]	[Symbol]
Fragmenta zudums (O)	Intensitāte, pamatojoties uz zudušā fragmenta apjoma parametra "v" lielumu (dm <sup>3</sup> )						
	Intensitāte 1 v ≤ 0,01	Intensitāte 2 0,01 < v ≤ 0,125	Intensitāte 3 0,125 < v ≤ 0,5	Intensitāte 4 0,5 < v ≤ 1	Intensitāte 5 v > 1		
	[Symbol]	[Symbol]	[Symbol]	[Symbol]	[Symbol]		
	[Symbol]	[Symbol]	[Symbol]	[Symbol]	[Symbol]		

4.16. attēls. B. Ficnera pētījumu rezultātā iegūtā mošejas fasādes dēdēšanas veidu un to intensitātes karte (pēc Fitzner *et al.*, 2002, 17.att.).

Figure 4.16. Map of weathering forms and their intensities resulting from initial investigation by B. Fitzner (after Fitzner *et al.*, 2002, Fig.17).

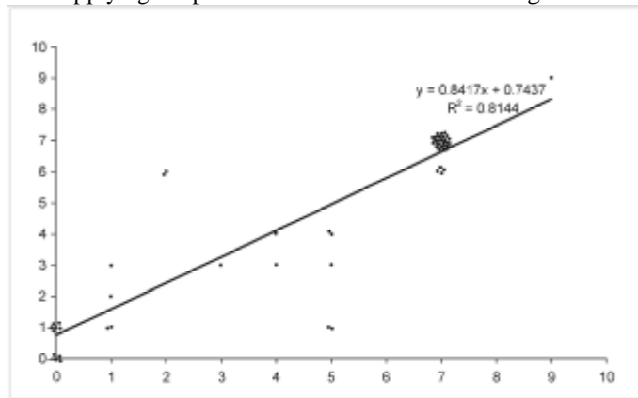
Veiktais pētījums norāda, ka pirms 10 gadiem veikto novērojumu vieta ir atpazīstama dabā un iepriekšējo pētījumu dati ir salīdzināmi ar jaunajiem, vienkāršojot dēdēšanas veidu un intensitātes klasifikāciju. Iegūto datu savstarpējai salīdzināšanai tika veikta pāru korelācijas analīze (4.17. attēls)

Iegūtie dati norāda, ka korelācija starp analizētiem dēdēšanas veidiem un to intensitāti dažādos izejas materiālos ir augsta (Geske, 2001). Salīdzinoši zemākā ( $R^2=0.8144$ ) tā ir starp B. Ficnera oriģinālā pētījuma rezultātiem un autora 2010. gada veikto pētījumu, bet augstākā – starp B. Ficnera pētījumu rezultātu pārklasificēšanu pēc vienkāršotas shēmas un autora 2010. gada pētījumu rezultātiem ( $R^2=0,8834$ ).



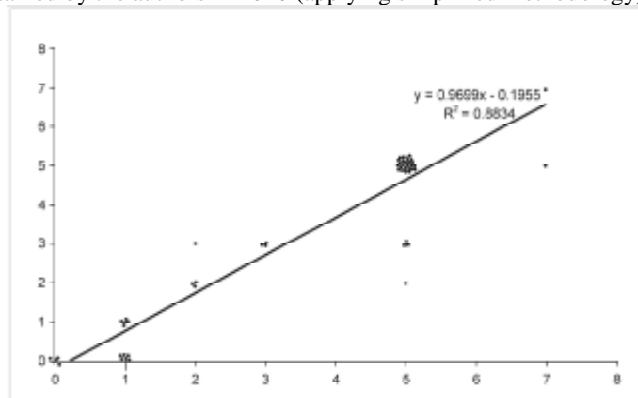
A. B. Ficnera 2002.gadā publicētās fasādes fragmenta dēdēšanas novērtējuma oriģināla (Fitzner *et al.*, 2002) un šo novērtējumu datu pārinterpretācijas pēc vienkāršotas dēdēšanas veidu un intensitātes shēmas savstarpēja korelācija (n=53).

A. Correlation between the data of initial study of B. Fitzner published in 2002 and re-interpretation of this data applying simplified classification of weathering forms and their intensities, (n=53).



B. B. Ficnera veiktās un 2002. gadā publicētās fasādes fragmenta fotogrāfijas analīzes rezultātu korelācija ar autora 2010. gadā veikto pētījumu rezultātiem (pēc izstrādātās vienkāršotas metodikas) (n=53).

B. Correlation between the data of initial study of B. Fitzner published in 2002 and the study results obtained by the authors in 2010 (applying simplified methodology), (n=53).



C. B. Ficnera 2002.gadā publicētās un pārinterpretētās pēc vienkāršotas shēmas un autora 2010. gada pētījumu rezultātu savstarpēja korelācija (n=53).

C. Correlation between re-interpreted data of the initial study of B. Fitzner published in 2002 applying simplified classification scheme and the study results obtained by the authors in 2010, (n=53).

4.17. attēls. Pētījumu rezultātu korelācijas līknes.  
Figure 4.17. Correlation lines of the study results.







Minētais norāda ne tikai uz piedāvātās vienkāršotās klasifikācijas pamatotību, bet arī tās korektumu attiecībā uz iepriekšēji veiktajiem pētījumiem. Šie rezultāti ir ar augstu ticamību. Minēto apstiprina augsta korelācijas vērtība ( $R^2 = 0,8984$ ), kas iegūta starp B. Ficnera oriģinālo pētījumu un tā atkārtotu izvērtējumu pēc vienkāršotas klasifikācijas shēmas, kas balstās uz dabā konstatējamiem dēdējumu veidiem un to intensitātes vizuālo novērtējumu.

Iegūtie dati potenciāli ļauj nedaudz vienkāršot B. Ficnera dēdēšanas veidu un intensitātes klasifikāciju līdz vizuāli atpazīstamiem kritērijiem un iegūt augstas kvalitātes datus par akmens materiālu dēdēšanu salīdzinoši operatīvi un pašus objektus novērtēt no attāluma, tas ir tā būtu patiešām nedestruktīva pētniecības metode.











Iepriekšēji minētais ļāva atkārtot realizētos pētījumus El-Merdani mošejas parauglaukumā un izstrādāt akmens materiāla virsmu dēdēšanas pazīmju vienkāršotu klasifikāciju un tās vizuālās diagnostikas pazīmju katalogu (4.2. tabula)

4.2. tabula. Akmens materiāla virsmu dēdēšanas pazīmju vienkāršota klasifikācija un tās vizuālās diagnostikas pazīmju katalogs

Table 4.2. Simplified classification and catalogue of visual diagnostics of the weathering traits on stone surfaces

<i>Dominējošā dēdēšanas forma un tās skaidrojums (dēdēšanas tips)</i>	<i>Novērotā dēdēšanas intensitāte (apakštīps)</i>	<i>Intensitātes vizuālai noteikšanai izmantotie kritēriji</i>	<i>Dēdēšanas formas un tās intensitātes piemēri</i>
<b>Virsmas atslāņošanās (W)</b> Akmens materiāla zudums paralēli akmens sākotnējai virsmai.	W1 	- akmens bloka virsmas garozas virsējā slāņa eksfoliācija ar tam sekojošu akmens materiālu	
	W2 	- akmens bloka virsmas garozas virsējā slāņa eksfoliācija ar tam sekojošu akmens materiālu lielākā dziļumā no virsmas, salīdzinot ar W2	

4.2. tabulas turpinājums

<i>Dominējošā dēdēšanas forma un tās skaidrojums (dēdēšanas tips)</i>	<i>Novērotā dēdēšanas intensitāte (apakštīps)</i>	<i>Intensitātes vizuālai noteikšanai izmantotie kritēriji</i>	<i>Dēdēšanas formas un tās intensitātes piemēri</i>
<b>Virsmas reljefa izmaiņas (R)</b> Akmens virsmas morfoloģiskās izmaiņas daļējas vai selektīvas dēdēšanas rezultātā	R1 	- akmens bloka virsmas izmaiņas, zaudējot nelielu akmens virsējā slāņa daļu	
	R2 	- akmens bloku virsmas lielas izmaiņas, zaudējot lielu akmens virsējā slāņa daļu, salīdzinot ar R1	
	R3 	- akmens bloku virsmas būtiskas izmaiņas, zaudējot ievērojamu akmens virsējā slāņa daļu, salīdzinot ar R2	
<b>Fragmentu zudums (O)</b> Kompakto akmens fragmentu zudums	O1 	- neliela un vidēja akmens fragmenta zudums	
	O2 	- liela akmens fragmenta zudums, salīdzinot ar O1	

### Ekspimentālās pārbaudes Hufu piramīdas fasādes parauglaukumā

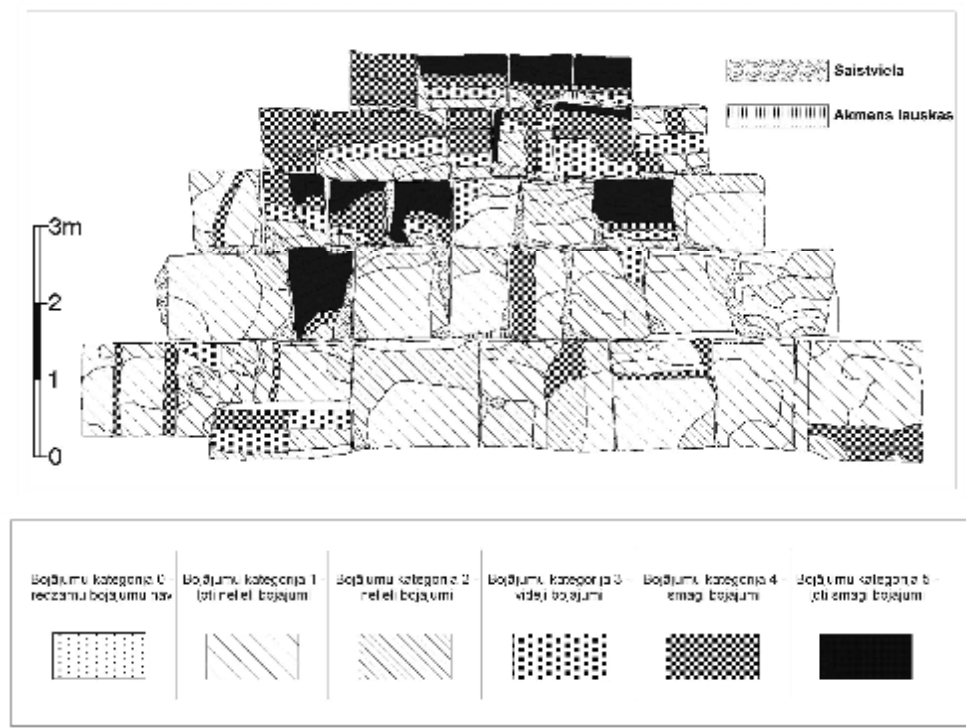
Lai pārlicinātos par izstrādātās pieejas pamatotību un izstrādātās metodikas efektivitāti, tika veikts papildus salīdzinājums citā B. Ficnera pētījumu objektā Ēģiptē – tas ir neliels fasādes fragments Senās valsts IV dinastijas valdnieka Hufu piramīdas Gīzā dienvidu fasādes pamatnes daļā (4.18. attēls).



4.18. attēls. Hufu piramīda Gīzā un salīdzinošā pētījuma laukums piramīdas dienvidu fasādē.

Figure 4.18. Schematic depiction of the study area. Southern façade of the Pyramid of Khufu at Gīza.

Arī šajā pētījumā B. Ficners (Fitzner *et al.*, 2002) ir izdalījis visas sešas akmens materiāla virsmas bojājumu kategorijas (4.19. attēls).










4.19. attēls. Hufu piramīdas parauglaukuma novērtējuma rezultāti, (pēc Fitzner *et al.*, 2002, 21. att.).

Figure 4.19. Map of damage categories. Great Pyramid of Cheops, lower part of the southern side (after Fitzner *et al.*, 2002, Fig. 21).

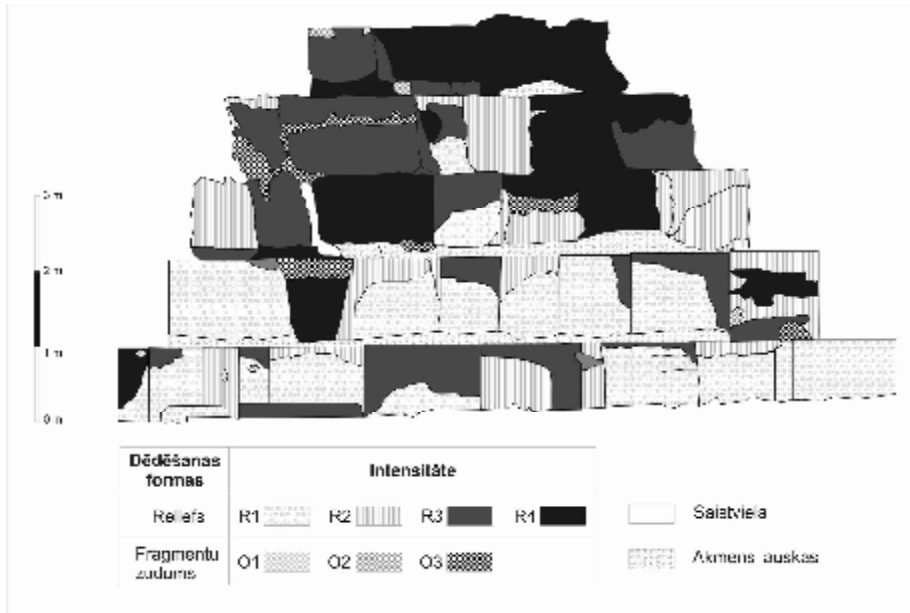
Autora veiktās fotodokumentācijas pētījums 2010. gada septembrī tika veikts no vairāk kā 100 metru attāluma, piramīdas fasādes akmens materiāla virsmas dēdēšana arī šeit tika novērtēta pēc vienkāršotas klasifikācijas shēmas (4.3. tabula) un tās rezultāti ir atspoguļoti 4.20. attēlā.

4.3.tabula. Dēdēšanas pazīmju klasifikācija valdnieka Hufu piramīdas fasādes fragmenta pētījumam

Table 4.3. Classification of the weathering traits for the studies of the Khufu pyramid's fragment

<i>Dominējošā dēdēšanas forma un tās skaidrojums (dēdēšanas tips)</i>	<i>Novērotā dēdēšanas intensitāte (apakštīps)</i>	<i>Intensitātes vizuālai noteikšanai izmantotie kritēriji</i>
<b>Reljefa izmaiņas (R)</b> Akmens virsmas morfoloģiskās izmaiņas daļējas vai selektīvas dēdēšanas rezultātā	R1 	- akmens bloka virsmas nelielas izmaiņas
	R2 	- akmens bloka virsmas izmaiņas, zaudējot nelielu akmens virsējā slāņa daļu
	R3 	- akmens bloku virsmas lielas izmaiņas, zaudējot lielu akmens virsējā slāņa daļu, salīdzinot ar R2
	R4 	- akmens bloku virsmas būtiskas izmaiņas, zaudējot ievērojamu akmens virsējā slāņa daļu, salīdzinot ar R3
<b>Fragmentu zudums (O)</b> Kompakto akmens fragmentu zudums	O1 	- neliela akmens fragmenta zudums
	O2 	- vidēja akmens fragmenta zudums
	O3 	- liela akmens fragmenta zudums, salīdzinot ar O1 un O2.

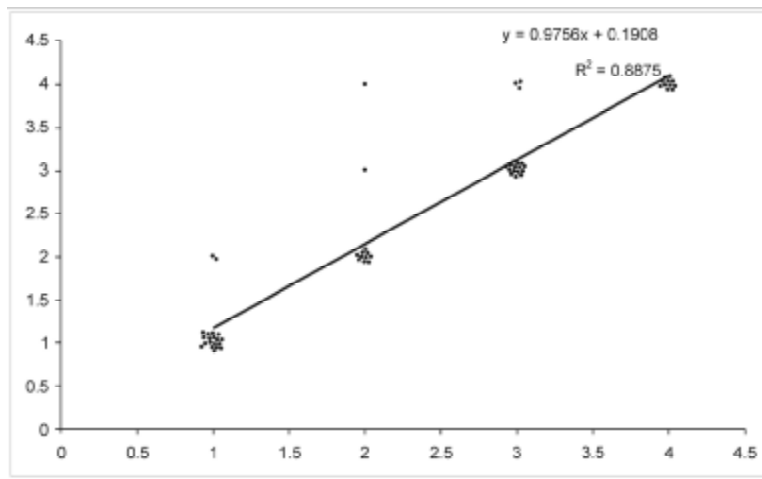
Pēc vienkāršotās klasifikācijas shēmas (4.3. tabula) Hufu piramīdas parauglaukuma dēdēšanas veidu un to intensitātes analīzes rezultāti ir atspoguļoti 4.20. attēlā.



4.20. attēls. B. Ficnera izvēlētā parauglaukuma analīze pēc autora izstrādātās metodikas.

Figure 4.20. Sample area studied by B. Fitzner analysed applying methodology elaborated by the author.

Jau vienkāršots B. Ficnera (4.19. attēls) un autora veiktā (4.20. attēls) pētījumu salīdzinājums norāda uz to ļoti augsto līdzību, bet iegūto datu savstarpējā korelācija (Geske, 2001) arī šajā gadījumā bija augsta ( $R^2=0.8875$ ) un vizuāli tas ir atspoguļots 4.21. attēlā.



4.21. attēls. B. Ficnera veiktās un 2002. gadā publicētās fasādes fragmenta (Gīza) analīzes rezultātu korelācija ar autora 2010. gadā veikto pētījumu rezultātiem (pēc izstrādātās vienkāršotas metodikas) (n=59).

Figure 4.21. Correlation between the results of initial study of B. Fitzner in 2002 at Gīza and our investigations carried out in 2010 applying simplified classification scheme, (n=59).

Tādējādi arī šie dati apstiprina izvēlētas metodikas pamatotību un pielietojamību plašākiem pētījumiem līdzīgos fizioģeogrāfiskos apstākļos un līdzīga akmens materiāla virsmas dēdēšanas novērtēšanai.

Iepriekšēji apskatītie metodiskas ievirzes salīdzinošie pētījumi ļāva pilnveidot izpratni par vizuāli novērtējamo izplatītāko dēdēšanas formu izplatību, nereti arī novērtēt salīdzinošās kategorijās izsakāmu dēdēšanas intensitāti. Izvēlēta pieeja ļāva tās tieši saistīt ar B. Ficnera veiktajiem instrumentāliem mērījumiem lauka apstākļos un laboratorisko pētījumu rezultātiem, tādējādi, izdalītie dēdēšanas veidi un to intensitāte ir analītiski pamatoti. Jāņem vērā, ka instrumentāli var izdalīt ievērojami vairāk dēdēšanas paveidus un jo īpaši dēdēšanas intensitātes pakāpes, nekā to ir iespējams konstatēt vizuāli. Tādēļ sistēmas un klasifikācijas vienkāršošana ir pamatota lietišķu pētījumu vajadzībām.

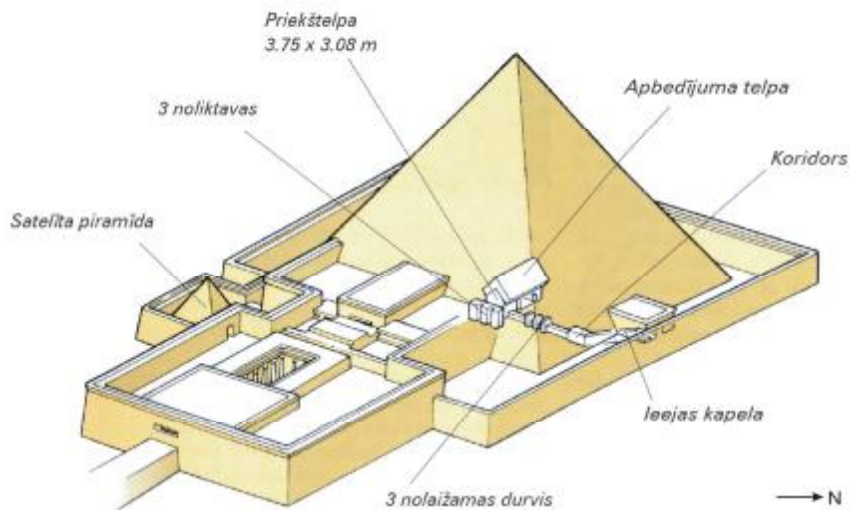
Tajā pašā laikā mūsu piedāvātā novērtēšanas sistēma ir vienkāršota un tādēļ ir potenciāli augsti riski kādu no dēdēšanas paveidiem tajā neiekļaut un vizuālos novērojumos nepamatoti ignorēt, ar ko būtu jāreķinās, veicot pētījumus citos objektos un atšķirīgos apstākļos.

#### **4.7. Raksturīgas akmens materiāla dēdēšanas formas un pazīmju grupēšana Unis piramīdas fāsādēs**

Adoptētā un vienkāršotā akmens materiāla dēdēšanas novērtēšanas metodika (skat. 4.6. apakšnodaļu) tika aprobēta vēl vienā objektā – V dinastijas valdnieka Unis piramīdā, kas atrodas Sakāras plato tiešā valdnieka Džosera piramīdas kompleksa tuvumā. Šis valdnieks ir pazīstams ar savu valsts pārvaldības un reliģijas pieejamības reformu, kā arī kapenēm zem piramīdas, kur zināmi senākie reliģiskie teksti pasaulē – Piramīdu teksti. Piramīdas komplekss ir bijis svētvieta un lūgšanu objekts vairāk nekā 2 tūkst. gadu laikā, līdz tas tika aizmirsts.

Piramīda ir būvēta no kaļķakmens apm. 2340. gadā p.m.ē. un būvniecībā ir izmantoti zemas kvalitātes materiāli ar plašu, tomēr nepietiekošas kvalitātes saistvielu pielietojumu. Būvi no ārpuses sargā un faktiski satur kopā vienā veselumā ļoti masīva un kvalitatīvi sagatavota apdares akmens bloku kārta. Tomēr arī šie bloki ir pakļauti dažādām ietekmēm, t.sk., regulārām zemestrīcēm. Daudzi bloki jau senatnē ir tikuši nomainīti vairākkārtēju rekonstrukciju gaitā, papildus stiprināta un pārveidota šī piramīda ir arī pēdējo 40 gadu laikā. Unis piramīdas būves struktūra ir parādīta 4.22. attēlā.

Diemžēl minētās rekonstrukcijas, galvenokārt, gādāja par būves noturību un drošību, tomēr visai neliela uzmanība tika pievērsta izvēlētiem materiāliem un to kvalitātei, kā rezultātā būvei ir nepieciešams jauns rekonstrukcijas projekts. Jāņem vērā, ka pat rekonstrukcijas projekta izstrādes gaitā nav iespējams fiziski skart objektu un visi pētījumi ir veicami tikai ar nedestruktīvām metodēm. Diemžēl šādu metožu nav daudz un tās visas tieši vai pastarpināti interpretācijas posmā ir nepieciešams balstīt uz fiziskām materiālu pārbaudēm. Tās, galvenokārt, ir akmens materiāla dēdēšanas veidu un intensitātes novērtēšanas metodes, kuras ļauj pietiekami precīzi noteikt nepieciešamo rekonstrukcijas darbu apjomu, laiku un finanšu līdzekļus.



4.22. attēls. Unis piramīdas būves struktūra (pēc Lehner, 2004)  
 Figure 4.22. The structure of the pyramid of Unis (after Lehner, 2004)

Pateicoties Unis piramīdas novietojumam Sakāras plato tiešā Džosera pirmaīdas tuvumā un izmantotajam būvmateriālam, šeit tika realizēti vairāki eksperimentālie pētījumi.

Vispirms, tika atrasti vēlākajās rekonstrukcijās nepārveidoti piramīdas fasāžu laukumi. Laukumi tika fotodokumentēti un izraudzītajos laukumos tika noteikti dominējošie dēdēšanas veidi un to intensitātes pēc B. Ficnera izstrādātās metodes (Fitzner *et al.*, 2002). Pēc tam tika veikta to atkārtota pārbaude dabā. Nākošajā pētījumu posmā novērojumu metodika tika pilnveidota un adaptēta konkrēto novērojumu veikšanai, līdz tika konstatēts, ka šeit ir nepieciešams izstrādāt jaunu un visai atšķirīgu dēdēšanas veidu un to intensitātes klasifikāciju. Pēc šādas klasifikācijas izstrādes un tās vairākkārtīgām pārbaudēm tika izveidots atbilstošs dēdēšanas veidu un intensitātes tipveida piemēru attēlu katalogs.

Noslēguma posmā Unis piramīdas fasādēs izvēlētajos laukumos tika izdalīti testa laukumi jaunizveidotā kataloga aprobācijai un pilnveidei, kas tādējādi ļāva metodiski sagatavoties pētījumu uzsākšanai Džosera piramīda kompleksā.

### **Salīdzinošais pētījums pēc B. Ficnera metodikas**

Unis piramīdas akmens materiāla dēdēšanas veidu un intensitātes detalizēti pētījumi tika veikti, izvēloties parauglaukumu dienviņu fasādē, kura ir vismazāk cietusi no daudzām rekonstrukcijām un nostiprināšanas darbiem (Kukela, Seglins, 2012b). Tajā izmantotais akmens materiāls ir ļoti tuvs materiālam, kas izmantots citās Dienvidsakāras piramīdās, kurām pieeja ir vēl vairāk ierobežota. Piramīdas fasādes pētītais fragments ir shematiski attēlots 4.23. attēlā.

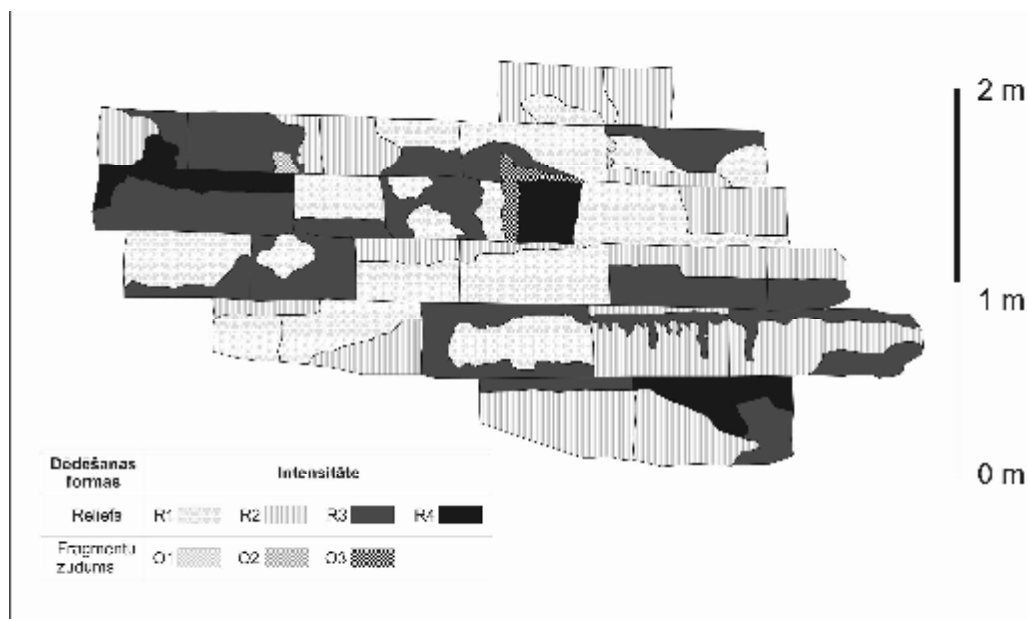


4.23. attēls. Shematiski iezīmēta pētītā laukumu atrašanās vieta Unis piramīdas Sakārā dienvidu fasādē.

Figure 4.23. Schematic depiction of the study area of southern facade of the Pyramid of Unis at Saqqara.

Arī šajā pētījuma daļā pielietotā metode balstījās uz dabā veiktiem novērojumiem un fotodokumentācijas rezultātā iegūto digitālo attēlu novērtēšanu un analīzi, pielietojot dēdēšanas pazīmju klasifikācijas sistēmu (4.3. tabula), kura paredz dažādu dēdēšanas veidu un to intensitāšu diagnostiku un identifikāciju objektos ar ierobežotu pieejamību detalizētiem pētījumiem.

Pētījuma rezultātā no augstas izšķirtspējas fotodokumentācijas un tās apstrādes un interpretācijas tika iegūta Unis piramīdas dienvidu fasādes akmens materiāla fragmenta dēdēšanas un tās intensitātes karte (4.24. attēls).



4.24. attēls. Unis piramīdu fasādes fragmenta dēdēšanas intensitātes karte.

Figure 4.24. Weathering map and weathering intensities of the Unis Pyramid facades fragment.



Šī pētījuma rezultātā ir konstatēts, ka tieši vizuāli novērojumi dabā praktiski sakrīt ar rezultātiem, kas iegūti analizējot fotodokumentāciju un tādā veidā ir iespējams noteikt daudzus dēdēšanas tipus un apakštipus, kā arī to intensitāti. Atšķirības ir vērojamas tikai dēdēšanas intensitātes novērtējumos – vairākiem dēdēšanas apakštipiem intensitāte kļūdaini var tikt novērtēta kā mazāk nozīmīga, nekā tas ir patiesībā. Detalizētāk to būtu iespējams noteikt tikai veicot fiziskus pētījumus un mērījumus eksponētā virsmā. Bet, neskatoties uz to, izstrādātā metode turpmāk var tikt sekmīgi izmantota dēdēšanas novērtēšanai arī citos Sakāras plato izvietotos objektos.

### **Jaunas klasifikācijas sistēmas izveide un aprobācija**

Papildus veiktajam Unis piramīdas dienvidu fasādes fragmenta dēdēšanas novērtējumam, pielietojot adaptēto dēdēšanas pazīmju klasifikācijas sistēmu (4.3. tabula), tika veikts vēl viens pētījums, kas apskatīja akmens materiāla dēdēšanu un balstījās uz vairākiem pieņēmumiem. Vispirms – Unis piramīdai līdzīgu objektu rekonstrukcija veicama tādējādi, lai tie nebūtu jārekonstruē vairākus simtus gadu. Tas ir, izvēlētai metodei ir jābūt pietiekoši jūtīgai un izdalītām vienībām (kategorijām) un ir jāsaturo drošas ilgtermiņa prognozes. Otra pieņēmumu daļa attiecas uz iespējām izstrādāt šādu metodi kā nedestruktīvu, attālinātu un balstītu uz dabas procesu un materiālu īpašību zināšanām.

Šī pētījuma gaitā 2007. - 2011. gadā tika sistemātiski apzināti un pētīti būvniecībā izmantotie materiāli to dabiskā sagulumā, novērtēti dēdēšanas rezultāti citās sakrālās būvēs Gīzas un Sakāras plato, apzināti dēdēšanu nosakošie dabas procesi un to izmaiņas gada laikapstākļu maiņas ciklā. Vienlaicīgi tika izstrādātas metodes digitālas fotodokumentācijas sagatavošanai, apstrādei un datu interpretācijai, tās telpiskai vizualizācijai, kas tika aprobētas vairāku seno piramīdu būvēs (skat. 4.6. apakšnodaļu). Šāda pieeja ļauj izvēlēties pazīmes, kas ir dešifrējamas fotouzņēmumos, tālāk matemātiski apstrādāt, analizēt un vizualizēt. Tādēļ dēdēšanas veidu un intensitātes novērtēšanas metodei bija jābalstās uz procesa norises posmu izdalīšanu, pie tam, ar vizuāli dabā un arī fotodokumentācijā konstatējamām pazīmēm. Tādējādi tika izstrādāts katalogs, kurā ietverti tieši Sakāras plato raksturīgākie dēdēšanas veidi un to dažāda intensitāte, izvēloties piemēru attēlus no dažādiem Sakāras plato esošajiem objektiem. Tika izdalīti sekojošie dēdēšanas veidi: bloku noapaļošanās, bloku virsmas kārtu atslāņošanās, akmens materiāla masas zudums, plaisas un pārrāvumi, kavernas, virsmas reljefa un ķīmiskās izmaiņas. Katrā no šiem dēdēšanas veidiem tika izdalītas četras to intensitātes pakāpes (4.25. attēls).

### Bloku noapaļošanās

Intensitāte "1"



Intensitāte "2"



Intensitāte "3"



Intensitāte "4"



### Virsmas kārtu atslāpošanās

Intensitāte "1"



Intensitāte "2"



Intensitāte "3"



Intensitāte "4"



### Akmens materiāla masas zudums

Intensitāte "1"



Intensitāte "2"



Intensitāte "3"



Intensitāte "4"



### Plaisas, pārrāvumi

Intensitāte "1"



Intensitāte "2"



Intensitāte "3"



Intensitāte "4"



### Kavernas

Intensitāte "1"



Intensitāte "2"



Intensitāte "3"



Intensitāte "4"



### Virsmas reljefa un ķīmiskās izmaiņas

Intensitāte "1"



Intensitāte "2"



Intensitāte "3"



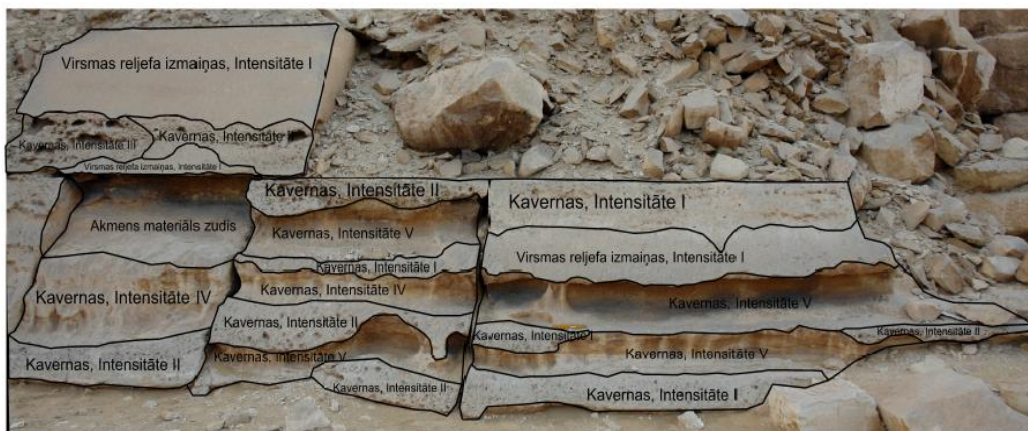
Intensitāte "4"



4.25. attēls. Sakāras plato raksturīgāko dēdēšanas veidu un to intensitātes piemēru katalogs.

Figure 4.25. Catalogue of Saqqara plateau sample weathering types and their intensities.

Turpmāk tika veikta izstrādātā klasifikatora un kataloga aprobācija, analizējot Unis piramīdas ziemeļu fasādes fragmentu. Šīs analīzes rezultātā konstatētie dēdēšanas veidi un to intensitātes ir parādītas 4.26. attēlā.



4.26. attēls. Unis piramīdas ziemeļu fasādes parauglukumā konstatētie dēdēšanas veidi un to intensitātes.

Figure 4.26. Weathering types and intensities identified on the north facade of Unis pyramid.

Izdalītie dēdēšanas veidi un to atšķirības izpausmes intensitātē tika verificēti vairākkārtīgās pārbaudēs dabā, kas ļauj uz veiktā pētījuma pamata gatavot atbilstošu dēdēšanas veidu diagnosticēšanas katalogu ar aprakstiem, kas ļautu šādu pieeju plašāk izmantot restaurācijas projektu izstrādei vismaz Sakāras plato teritorijā, kur ietekmējošie faktori, kā arī izmantotie dabiskie būvmateriāli ir ļoti līdzīgi. Izstrādātajā Sakāras raksturīgāko dēdēšanas veidu un to intensitātes piemēru katalogā (4.25. attēls), kā arī Unis piramīdas fasādes parauglukumā parādītā dēdēšanas veidu intensitāte (4.26. attēls) ir indikatīva un tika noteikta salīdzinoši, izvērtējot konkrētā akmens bloka dēdēšanas skartā laukuma platību attiecībā pret bloka kopējo masu, kā arī būtiskuma līmeni, kādā dēdēšana ietekmē bloka izturību un stabilitāti.

#### 4.8. Pētījumu komplekss Džosera piramīdas fasādēs

Turpmākie akmens materiāla dēdēšanas pētījumi tika veikti valdnieka Džosera pakāpju piramīdā. Šī būve ir veidota no visai atšķirīgu izmēru kaļķakmens blokiem, tiem ir dažāda kvalitāte un saglabātības pakāpe. Mūsdienās ir konstatējami nozīmīgi akmens materiāla bojājumi un būve ir tikusi vairākkārt remontēta un rekonstruēta kā senajos laikos, tā arī pagājušajā gadsimtā. Izceļama ir tieši fiziskās dēdēšanas nozīme un akmens materiāla masas un kvalitātes zudums. Netieši šos rādītājus var novērtēt pēc dēdēšanas veidu izpausmēm un to intensitātes.

Sākotnēji, katras Džosera pakāpju piramīdas fasādes fragments, tika novērtēts, pielietojot B. Ficnera izstrādāto metodiku (Fitzner *et al.*, 2002) un pētījumam izstrādāto dēdēšanas pazīmju klasifikāciju (4.1. tabula), kas ļāva konstatēt visus šajā klasifikācijā izdalītos dēdēšanas veidus arī Sakārā, valdnieka Džosera piramīdā. Šī pētījuma rezultātā iegūtās akmens materiāla dēdēšanas veidu un to intensitātes kartes ir parādītas 4.27. A, B.attēlā.



Austrumu fasādes parauglaukums.  
Sample area of the eastern facade.



Rietumu fasādes parauglaukums.  
Sample area of the western facade.

Dēdēšanas formas	Dēdēšanas intensitāte
Reljefa izmaiņas (R)	R1, R2, R3, R4
Virsmas atslāņošanās (W)	W1, W2, W3
Fragmentu zudums (O)	O1, O2
Plaisa	—

4.27. attēls A. Valdnieka Džosera piramīdas fasāžu fragmentu akmens materiāla dēdēšanas veidu un to intensitātes kartes.

Figure 4.27 A. Weathering intensity maps of the fragments of Djoser's Pyramids facades. Weathering types – Relief (R), Back weathering (W), Break out (O), Fissure; designation of intensities from 1 to 4.



Dienvīdus fasādes parauglaukums.  
Sample area of the southern facade.



Ziemeļu fasādes parauglaukums.  
Sample area of the northern facade.

Dēvēšanas formas	Dēvēšanas intensitāte
Reljefa izmaiņas (R)	R1, R2, R3, R4
Virsmas atslāņošanās (W)	W1, W2, W3
Fragmentu zudums (O)	O1, O2
Plaisa	—

4.27. attēls B. Valdnieka Džosera piramīdas fasāžu fragmentu akmens materiāla dēvēšanas veidu un to intensitātes kartes.

Figure 4.27 B. Weathering intensity maps of the fragments of Djoser's Pyramids facades. Weathering types – Relief (R), Back weathering (W), Break out (O), Fissure; designation of intensities from 1 to 4.

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, kas kopumā ļāva sākotnēji iegūt vairāk kā 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 (5.15. attēls) (Kukela, Segliņš, 2012d).

Šāda kataloga piemērošana ne vienmēr ir viennozīmīga, it īpaši, ja fotodokumentācijas kvalitāte nav ļoti augsta un nav iespējams dabā pārliecināties par dēdēšanas veidu un tās intensitāti. Tādēļ tikai izstrādāti vairāki papildus klasifikatori un modeļi, un arī tiem tika izveidoti atbilstoši parauglaukumi un veikta to analīze. Viena šāda parauglaukuma analīzes rezultāti ir parādīti 4.28. attēlā.



Dēdēšanas formas	Apzīmējumi; Intensitāte
Ķīmiskās izmaiņas	CH
Reljefa izmaiņas	R / R1, R2, R3
Kārtu noslāņošanās	D
Fragmentu atlūzas	O / O1, O2
Materiāla izdrupšana	CR
Noapaļošanās	RO

Dēdēšanas formas	Apzīmējums
Kavernas	
Pārrāvumi	
Plaisas	

4.28. attēls. Dēdēšanas veidu un intensitātes karte. Džosera piramīdas dienvidu fasādes fragments.

Figure 4.28. Weathering intensity maps of the fragments of Djoser's Pyramid south facades. Weathering types – Chemical changes (CH), Relief (R), Layer detachment (D), Break out (O), Crumbling (CR), Rounding (RO); Caverns, Splits, Fissures.

Turpmākajos pētījumos šie risinājumi tika atmesti kā raksturīgi tikai kādai ierobežotai fasādes daļai vai iepriekšējos gados kādas fasādes daļā veiktai nekvalitatīvai rekonstrukcijai. Līdzīgi tika pārbaudīti un noraidīti arī citi risinājumi, līdz tika konstatēts, ka izstrādātais katalogs ir pietiekoši kvalitatīvs un var tikt izmantots turpmākajā pētnieciskajā darbā.

Autora pieredze norāda, ka šāda konkrētam objektam adaptēta kataloga izveide pētījuma gaitā ir ļoti svarīga, jo ļauj būtiski samazināt subjektīvo vērtējumu un atvieglo uz dažādām fasādēm iegūto rezultātu savstarpēju salīdzināšanu.

### **Džosera piramīdas būvniecībā izmantotās saistvielas**

Būvbloku saistīšanai Senajā Ēģiptē visbiežāk izmantoja kleķa cementējošo vielu, kas tika iegūta no Nīlas dūņām. Tā bija viegli iegūstama, pietiekami plastiska un ērta lietošanai un pilnībā apmierināja tās prasības, kuras tika izvirzītas attiecībā uz iedzīvotājiem tradicionālām pagaidu būvēm Nīlas ielejā. Augstākas prasības tiek izvirzītas dažādām sakrālām būvēm un valdnieku kapenēm. Šeit kleķa ķieģeļi tika saistīti ar īpašu saistvielu, kur Nīlas dūņas tika jauktas ar dažāda rupjuma smiltīm, nereti pievienojot arī citus liesinātājus līdzīgi kleķa ķieģeļiem. Pirmo dinastiju valdnieku un bagātnieku kapenu būves tiek veidotas tuksnešu malā ārpus pašas Nīlas ielejas liecina, ka šāds cements tika lietots ierobežoti un galvenokārt kā mūrējamās virsmas izlīdzinošais materiāls. Tas ir racionāli, jo tik sausā gaisā un karstumā kleķa ķieģeļi maina formu un pēc pusgada nostāvēšanas visai būvei ir nepieciešama papildus apdare žūšanas tukšumu, plaisu aizpildīšanai un virsmas izlīdzināšanai. Šādam mērķim tradicionālā kleķa java tika jaukta ar smiltīm un tai tika pievienots visai nozīmīgs apdedzināta un malta ģipša daudzums (Nicholson, Shaw, 2009).

Otrās un trešās dinastijas valdnieku kapenes (mastabas) kļūst pēc saviem izmēriem grandiozas un to izbūvei nepieciešamos kleķa ķieģeļus savlaicīgi sagādāt kļūst aizvien grūtāk un daudzās vietās tiek ieviesti jauninājumi – tiek izgatavoti uz vietas lieli lieti kleķa javas bloki ar smalcinātu salmu liesinātāju, dubulti mūrētās kleķa ķieģeļu sienu starpa tiek pildīta ar būvgružiem vai zemi, sienu stabilizācijai tiek izmantoti koka brusas vai režģi. Tomēr būves nav pietiekoši stabilas un ilglaicīgi noturīgas pret dēdēšanu. To vājākā vieta ir paši būvbloki, nevis cements (Kukela, Seglins, 2012a).

Valdnieka Džosera pakāpju piramīdā par saistvielu ir izmantoti dažādi mākslīgi veidoti maisījumi – Nīlas dūņas (māli un aleirīti ar augstu organiskās vielas saturu), dūņas ar smiltis un drupinātu gliemežvāku liesinātāju, mālains aleirīts ar drupināta un malta vietējā kaļķakmens piemaisījumu dažādās proporcijās, drupināta un saberzta ģipsi saturoša kaļķakmens piedeva māliem vai atsevišķi veidota masa. Dažos gadījumos saistvielas izgatavošanai ir izmantots ģipsi saturoša kaļķakmens iepriekšēji apdedzināts maisījums, tomēr raksturīga piedeva gandrīz vienmēr ir tieši apdedzināts un malts ģipsis. Mūsdienās joprojām par Džosera piramīdas būvniecībā izmantotā cementa sastāvu analītisku pētījumu ir ļoti nedaudz un plašākie no tiem (Lucas, 1948; Salmoni, 1933) apskata tikai dažu, jau dēdējušu cementa paraugu analīzes un tāpēc tās ir uzskatāmas tikai par orientējošām.

Minēto saistvielu izmantojums dažādās piramīdas fasādes daļās nav vienmērīgs un no attāluma nav vizuāli atšķirams detaļās. Šī iemesla dēļ ir iespējams novērtēt tikai pakāpienveida piramīdā izmantotās saistvielas saglabāšanās pakāpi, vērtējot to kā dēdēšanu. Tomēr atsevišķos parauglaukumos ir iespējams veikt ievērojami detalizētāku analīzi.

Pētījuma vajadzībām kopš 2005. gada tika veikta sistemātiska Džosera piramīdas fasāžu fotodokumentēšana, kas ļāva turpmāk izstrādāt visas piramīdas augstas izšķirtspējas 3D ģeotelpisko modeli (Kukela, Seglins, 2011a). Iegūtā modeļa būtiskā priekšrocība ir iespējas MicroStation V8i programmas vidē veidot papildus

informācijas slāņus. Mūsu gadījumā blakus akmens materiāla dēdēšanas un deformāciju slānim, tika iegūta bagātīga informācija par būvniecības gaitā izmantotām saistvielu galvenajiem veidiem un to noturību pret fizisko dēdēšanu.

Pētījums ļauj vizuāli diagnosticēt būvbloku saistīšanai izmantoto saistvielu (cementu) 5 - 6 veidus. Nav pārsteidzoši, ka to lielākā daļa ir tieši saistīta ar dažādiem cementējošās vielas veidiem, kas tika izmantoti dažādos piramīdas būvniecības posmos no plašas mastabas, tad to pārklājot ar nelielu piramīdu līdz otrās – mūsdienās redzamās sešu pakāpienu piramīdas izveidei (4.29. attēls).



4.29. attēls. Dažādie saistvielu tipi, kas izmantoti Džosera piramīdas celtniecībā, austrumu fasādē. Apzīmējumi: A- mastabas daļa (AO); B- saistviela senākās piramīdas daļā (ALR); C- jaunākās piramīdas apdares bloku saistviela (ALR-SL); D- jaunākās piramīdas iekšējā aizpildījuma saistviela (SL). Apzīmējumus skatīt 5.2. tabulā.

Figure 4.29. Different types of mortar used in construction of Djoser's Pyramid, eastern fasādē. Apzīmējumi: A- mastabas daļa (AO); B- saistviela senākās piramīdas daļā (ALR); C- jaunākās piramīdas apdares bloku saistviela (ALR-SL); D- jaunākās piramīdas iekšējā aizpildījuma saistviela (SL). For abbreviations see Table 5.2.

Pētījumi plašākā austrumu fasādes teritorijā ļāva izstrādāt vizuāli atpazīstamu cementa veidu tipoloģiju. Minētā tipoloģija ir izstrādāta vairākos parauglaukumos, kur tā tika diagnosticēta un pārbaudīta uz vietas (piramīdas tikai pirmā pakāpiena līmenī). Turpmāk tā tika papildināta un noslēguma posmā vienkāršota līdz tā var tikt piemērota arī augstākiem piramīdas pakāpieniem, par kuriem ir pieejama tikai fotodokumentācija, jo tiešas pārbaudes uz vietas nav iespējams veikt pieminekļa apmeklēšanas ierobežojumu dēļ.

Būvniecībā izmantotās saistvielas saglabāšanās pakāpe vairāk kā četru tūkstošu gadu laikā ir ļoti atšķirīga, kas ir konstatējams ne tikai starp dažādiem



saistvielu tipiem, bet arī viena cementa tipa robežās. Pieņemot, ka būvē cementu ietekmējošie faktori vismaz vienas piramīdas fasādes robežās ir bijuši līdzīgi, tad izteikti dominējošai fiziskai dēdēšanai, tās ietekmes atšķirības pamatā ir saistītas ar izvēlētajās saistvielas izgatavošanas un iekļāšanas kvalitāti. Tāpēc ir lietderīgi detalizēti izvērtēt cementa saglabāšanās pakāpi vismaz savstarpēji salīdzināmās klasēs, kas būtu neatsverami vērtīga informācija restaurācijas darbu projektētājiem. Iepriekšēji minētā piramīdas fotodokumentācija tika izvērtēta, manuāli pārbaudot pieejamo datu kvalitāti un novērtējot iespējas to izmantot šādas cementa dēdēšanas klasifikācijas izstrādāšanai. Arī šajā gadījumā tika izvēlēti vairāki parauglaukumi piramīdas pirmā un otrā pakāpiena līmenī, bet turpmāk iegūtais klasifikators tika vienkāršots, lai tas kļūtu izmantojams arī attēlu apstrādei par piramīdas augšējiem pakāpieniem.

### **Būves plaisainība un stabilitāte mūsdienās**

Analizējot kultūrvēstures pieminekļa dimensijas un formas detaļas ģeotelpiskā modeļa izstrādei, tika konstatētas vairākas būtiskas novirzes no ģeometriski pareiza un proporcionāla modeļa. Pie tam, daļa no šīm neatbilstībām nav skaidrojamas ar piramīdas būvniecības vairākiem etapiem un būvniecības kļūdām. Pētījumā turpmāk tika izvērtētas šīs neatbilstības un tika konstatēts, ka nozīmīga to daļa ir saistīta ar būves deformācijām. Tās tika konstatētas piramīdas fotodokumentācijā un pārbaudēs dabā. Turpmāk tika veikta lielāko plaisu un pārrāvumu (lūzumu) atpazīšana un atspoguļošana uz piramīdas fasādēm.

Plaisu un lūzumu diagnostika tika veikta uz atsevišķiem fotodokumentiem pēc tradicionālas metodikas kādu izmanto lineāro struktūru noteikšanā tālīzpētē. (Gupta, 2003; Jensen, 1995).

Tas ļāva izdalīt visai ievērojamu skaitu salīdzinoši nelielu lūzumu skaitu, kas apver vienu akmens bloku. Ievērojami mazāks ir tādu lūzumu skaits, kas izkonstatējams vairākos vai pat desmitos akmens bloku, bet lūzums nav izsekojams ārpus vienas piramīdas pakāpes robežām. Un tikai salīdzinoši neliels plaisu un lūzumu skaits ir izsekojams vairākās piramīdas pakāpēs. Tieši šīs lūzumi un plaisas visbiežāk ir atvērti līdz vairākiem centimetriem, lūzumi zarojas un nereti veido lūzumu zonas līdz pat metra platumam. Vairāki lūzumu zonu posmi ir izdrupuši un būtiski paaugstina visas būves viengabalainību. Daži šādi posmi senatnē un arī J.P. Lauera rekonstrukcijas laikā ir tikuši aizpildīti un bojātie akmens bloki ir tikuši aizvietoti. Tomēr mūsu pētījums norāda, ka visās šajās vietās lūzumi ir atjaunojušies un to attīstība ir tikai bremsēta.

Diemžēl pēdējā gada laikā notikušās pārmaiņas objektā nav apzinātas, jo piramīdas visas fasādes tiek rekonstruētas – selektīvi tiek nomainīti akmens bloki, plaisas un izdēdējušais cementa slānis tiek aizvietots ar mūsdienīgu cementa masu. Tas maskē fasādēs apzināto plaisu un lūzumu sistēmu. Tādēļ mūsu veiktā analīze aprobežojas ar plaisu apzināšanu, kartografēšanu un ievietošanu uz 3D ģeotelpiskā modeļa, bet analīzē pagaidām atturamies veikt kādu šo lūzumu virzienu vai intensitātes statistisko vai galveno komponentu analīzi.

#### 4.9. Datu integrācija un sagatavošana analīzei

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

Atsevišķo datu kopu izejas dati tika uzglabāti īpaši veidotajās datu bāzēs, kas klasificētas atbilstoši datu kopu specifikai. Katrai datu kopai tika izveidota atsevišķa darba mape, kurā glabājas gan izejas informācijas datu bāzes, gan arī datu kopas apstrādes un analīzes rezultāti. Atbilstoši datu kopas specifikai, to apstrādes rezultāti, kā arī izejas dati tika klasificēti vai nu atbilstoši piramīdas fasāžu orientācijai attiecībā pret debespusēm, vai arī atbilstoši datu kopu specifiskiem indikatoriem, piemēram, pēc dēdēšanas veidiem vai arī pēc dēdēšanas intensitātēm.

Analizējot katru datu kopu, tika iegūti dažādi rezultāti un secinājumi. Mēģinājumi iegūt vidējos korelētos rādītājus netika veikti, jo katra analizētā datu kopa ir atšķirīgs indikators, kas sniedz dažādas nozīmes informāciju.

Kopumā, sistematizējot un analizējot iegūtos datus, bija iespējams iegūt rezultātu, kurš ļāva izdarīt secinājumus attiecībā uz ģeoloģisko zināšanu attīstību Ēģiptes Senajā valstī.

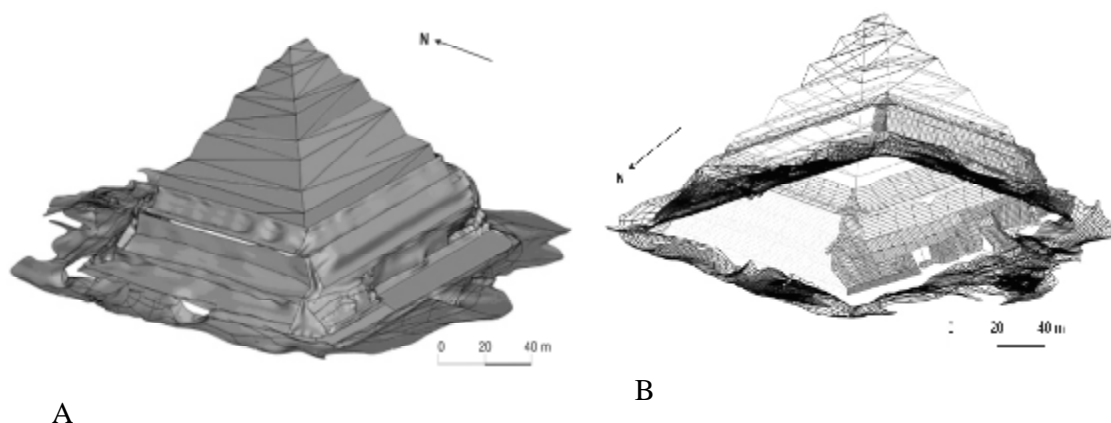
## 5. REZULTĀTI

Promocijas darba pētījumu gaitā tikai iegūti daudzi jauni faktiskie materiāli un dati, sekmīgi tika izstrādāti metodiskas ievirzes risinājumi, novitātes un ievērojamai to daļai ir lietišķa nozīme. Visi minētie ir uzskatāmi par darba rezultātiem un tie zemāk 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.

### 5.1. Ģeotelpiskā modeļa izveide

Vadoties pēc iepriekšējā nodaļā aprakstītās piramīdas ģeotelpiskā modeļa izveides metodikas (skat. 4.4. apakšnodaļu) iegūtais 3D modelis turpmāk tika izmantots par pamatu speciālo informācijas slāņu vizualizācijai. Veiktajā pētījuma objektā šāda specifiskā informācija ir Džosera piramīdas fasāžu akmens materiāla dēdēšanas veidi un dēdēšanas intensitātes novērtējums, kā arī būvē konstatētās plaisas un pārrāvumi. Šajā nozīmē tehnoloģiskās iespējas izveidot 3D modeli un tajā atspoguļot izmaiņas kopējā būves stabilitātē un piramīdas apdraudējumus ir viens no piemērotākajiem risinājumiem.

Piramīdas ģeotelpiskais modelis (5.1. attēls) tika veidots pēc iespējas precīzs, pamatojoties uz datiem, kurus bija iespējams iegūt par objektu ar ierobežotu pieejamību pētījumiem un dokumentācijai. Papildus apgrūtinājums ir būtiska Pakāpju piramīdas pārbūve, kuras rezultātā tiek pilnībā liegta iespēja iegūt atjaunotus vai papildinātus datus.

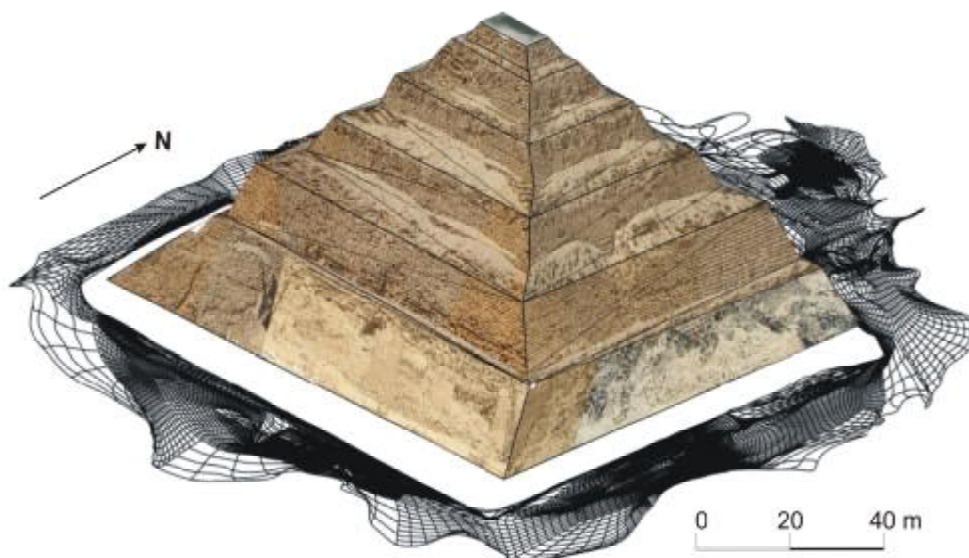


5.1. attēls. Valdnieka Džosera pakāpju piramīdas vienkāršots ģeotelpiskais modelis. A: RA stūra attēlojums ilustratīvā vizuālā režīmā; B: DA stūra attēlojums režģa vizuālā režīmā.

Figure 5.1. Simplified visualization of the geospatial model of the Step Pyramid of Djoser. A: SW “Illustration” display style view of the pyramid; B: SE “Wireframe” display style view of the pyramid.

Svarīgi, ka pētījuma vajadzībām izveidoto piramīdas 3D modeli ir iespējams integrēt ĢIS aplikācijās, kas ļauj nodrošināt virsmas (arī dažu vai atsevišķu raksturlielumu) analīzes iespējas ilglaicīgā posmā, kā arī veikt telpiskos krustojumus un veidot dažādas izšķirtspējas speciālās tematiskas kartes (Wang *et al.*, 2004).

Izveidotajā piramīdas ģeotelpiskajā modelī tika iestrādāta pēc 4.4. apakšnodaļā aprakstītās metodes izveidotā piramīdas fasāžu mozaīka (5.2. attēls), tādējādi veidojot pamata bāzi specifiskās informācijas slāņu integrācijai.



5.2. attēls. Piramīdas ģeotelpiskais modelis ar integrēto piramīdas fasāžu fotomozaīku (DA stūris).

Figure.5.2. Geospatial model of the pyramid with integrated photo mosaic of the facades (SA corner).

Turpmāk pētījuma ietvaros izstrādātajā piramīdas 3D modelī tika integrēti specifiskās informācijas slāņi – dēdēšanas veidi un to intensitāte, kā arī būvē konstatētās plaisas un pārrāvumi. Tas radīja iespēja veikt telpisku tematisku analīzi un aprēķinus vienkopus, vienlaikus nodrošinot datu analīzi kopā ar citiem pētījuma virzieniem (Meyer *et al.*, 2006). Kā piemērojamākais veids datu integrēšanai būtu mobilās aplikācijas, tādas kā, piemēram, Arcpad Mobile Mapping, kas nodrošina iespēju veikt apsekošanu lauka apstākļos. Tomēr 3D ĢIS aplikāciju izstrāde joprojām attīstās un uz doto brīdi darba gatavībā ir tikai risinājumi 2D vidē.

Pētījumu rezultātu aprobācija tika veikta vairākos posmos. Šādas pārbaudes un aprobācija manuāli tika veikta attiecībā uz fotodokumentācijas kvalitāti – atsevišķu pikseļu līmenī tika pārbaudīta dažādos laika posmos un ar atšķirīgām kamerām veikto fotouzņēmumu savstarpējā atbilstība un savienojamība. Arī izstrādātais piramīdas ģeotelpiskais modelis tika pārbaudīts ar vēsturiskiem datiem (Lauer, 1962) par modeļa formas un izmēru atbilstību, kā arī veicot nepieciešamo detalizāciju un korekcijas.

Vienlaicīgi modeļa funkcionalitātes aprobācijai tika izstrādāti divi speciālās informācijas slāņi, kas klāj visu piramīdas ārējo virsmu. Par šādu informācijas slāni

tika izvēlēta piramīdas akmens materiāla bojājuma (dēdēšanas) pakāpe ar augstu detalizācijas līmeni, kā arī būvē konstatētās plaisas un lūzumi. Dēdēšanas speciālā slāņa izveidei tika analizēts katrs akmens bloks, kas eksponējas piramīdas ārējā virsmā. Katram no tiem tika noteikts dominējošais dēdēšanas veids un dēdēšanas intensitāte, kas tika manuāli izzīmēta pirms iestrādāšanas vienotā 3D modelī (Kukela, Seglins, 2011a; Seglins, Kukela, 2012).

Izstrādātais piramīdas ģeotelpiskais modelis kā instruments ir piemērots dažāda veida informācijas vizualizācijai. Tomēr mērījumu iespējas, kuras paver 3D modelis, ir nepietiekošas, lai izdarītu secinājumu par zināšanu izmaiņām piramīdas būvniecības gaitā.

## 5.2. Pakāpju piramīdas stabilitāte

Valdnieka Džosera Pakāpju piramīdas komplekss ir izcila vērtība un ir noteikti īpaši noteikumi ne tikai tā apmeklēšanai, bet arī pētniecības darbiem. Pēdējo gadu laikā tiem tika pievienoti vēl vairāki papildus ierobežojumi, kas faktiski nozīmē šādu pētījumu neiespējamību un ir jārēķinās, ka veikt tiešus mērījumus un iegūt paraugus to laboratoriskām analizēm nav atļauts.

Tomēr iepriekšējos gados Latvijas Zinātniskai ekspedīcijai Ēģiptē izdevās veikt vairākus Džosera piramīdas kompleksa pētījumus (Deslandes, 2007), starp kuriem īpaši izceļami augstas kvalitātes 3D lāzerskanēšanas darbi pieminekļa visā pazemes daļā un arī ārpusē piramīdai no zemes virsas līdz otrajam pakāpienam. Tika precizēti vairāku piramīdas pazemes tuneļu izmēri un izvietojums. Pielietojot radiolokācijas metodi, tika konstatētas vairākas līdz šim nezināmas pazemes ejas. Pazemes galerijās tika veikta arī vēsturisko liecību arheoloģiskā inventarizācija un atbilstošas GIS datu bāzes izveide. Veiktie pētījumi ļāva noteikt arī nākotnē nepieciešamo darbu apjomu, tomēr to veikšanai Ēģiptes varas iestādes liedza atļauju.

Iepriekšējos gados ievāktais faktiskais materiāls, kas papildināts ar turpmāk veiktiem fotodokumentēšanas darbiem (kuru realizācijai nav nepieciešamas īpašas atļaujas) ļāva veikt vairākus atsevišķus pētījumus, kas dod iespējas ne tikai apzināt un novērtēt esošo situāciju, bet ir svarīgi dati arī pieminekļa konservācijas stratēģijas izvēlei.

Sakāras plato atrodas daudzi ļoti augstvērtīgi pasaules materiālās kultūras mantojuma pieminekļi. Šī teritorija ir sen zināma kā seismiski apdraudēta zona, kur katru gadu tiek fiksētas zemestrīces ar 4 baļļu magnitūdu. Diemžēl sistemātiski seismiskās aktivitātes novērojumi šeit netiek veikti. Ēģiptes teritorijā atrodas vairāki desmiti seismisko staciju, kas savienotas kopējā nacionālā novērojumu tīklā (ENSN), vairākas no tām ir izvietotas Gīzas un Sakāras plato, diemžēl to dati nav atbilstošas kvalitātes un stacijas nav iekļautas nevienā no starptautiskajiem seismisko novērojumu tīkliem (ISRI, GSN, un tml.).

Fiziskās bīstamības ierobežošanai apmeklētāji un tūristi netiek pielaisti pie potenciāli bīstamām celtnēm un konstrukcijām, daudzi objekti ir izslēgti no pieejamo objektu skaita. Tā rezultātā cieš tūrisma pakalpojumu kvalitāte un aizvien tiek ierobežotas iespējas iepazīties ar kultūras mantojumu, bet būves saglabātība no tā neiegūst. Tajā pašā laikā zemestrīču ietekme un postījumi ir visai nozīmīgi. Īpaši uzskatāmi tie ir pazemē, bet arī Džosera piramīdas ārsienās tie ir atpazīstami un konstatējami dabā (5.3. attēls).



5.3. attēls. Dabā konstatēto fasādes plaisu piemērs. Austrumu fasādes 3.-4.pakāpe.  
Figure 5.3. Example of fissures identified on the eastern facade of the pyramid (3rd-4th step).

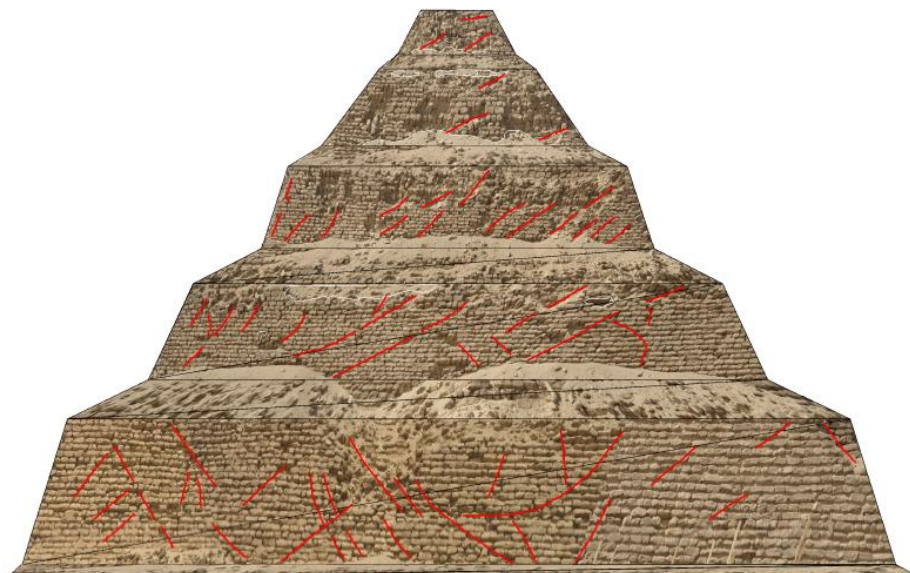
Veiktais Džosera piramīdas plaisu un pārrāvumu pētījums balstās uz 2006.-2011. gadā vairākkārtīgi veiktiem piramīdas fasādes augstas izšķirtspējas fotodokumenēšanas darbiem un iegūto attēlu detalizētu analīzi. Pētījumā plaisas un pārrāvumi ir konstatēti visās piramīdas fasādēs, tie ir atpazīstami visās fotodokumentācijas pētījumu sērijās vairāku gadu laikā. Tāpat tie ir atpazīstami arī dabā. Plaisas ir iespējams grupēt pēc to izsekojamības garuma, platuma, aizpildījuma pakāpes ar būves sadrupšanas materiālu un tamlīdzīgi.

Visas piramīdas fasādes tika raksturotas ar vienādu detalizācijas pakāpi un dati ir atspoguļoti 3D modelī. Šie dati skaidri norāda uz neatliekami veicamajiem pētījumiem nākotnē. Iegūtie dati un to vizualizācija norāda, ka tieši būves stabilitāte un viengabalainības atjaunošana būtu uzskatāmi par augstākajām prioritātēm Džosera piramīdas saglabāšanas un konservēšanas stratēģijas izvēlē.

Analizējot šī kultūrvēstures pieminekļa dimensiju un formu ģeotelpiskā modeļa izstrādei, tika konstatētas vairākas būtiskas novirzes no ģeometriski pareiza un proporcionāla modeļa. Pie tam, daļa no šīm neatbilstībām nav skaidrojamas ar piramīdas būvniecības vairākiem etapiem un būvniecības kļūdām. Pētījumā turpmāk tika izvērtētas šīs neatbilstības un tika konstatēts, ka nozīmīga to daļa ir saistīta ar būves deformācijām. Tās tika konstatētas piramīdas fotodokumentācijā un pārbaudēs dabā. Turpmāk tika veikta lielāko plaisu un pārrāvumu (lūzumu) atpazīšana un atspoguļošana uz piramīdas fasādēm.

Apzinātās plaisas un lūzumi piramīdas fasādēs ir konstatējamas, sākot no 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. Nav pārsteidzoši, ka šādas plaisas ir konstatētas objektā, kas ir izvietots seismiski salīdzinoši aktīvā zonā (Ambraseys *et al.*, 1995), bet jauns ir šo plaisu un lūzumu skaits un nozīme, kas mūsdienās ir atpazīstama jau piramīdas formas ģeometrijā. Minētais skaidri norāda uz būves viendabīguma zudumu un tas ir uzskatāms par ļoti nopietnu apdraudējumu objekta saglabāšanai nākotnē.

Piramīdas fasādēs konstatēto plaisu un lūzumu izvietojuma fragmenta piemērs ir parādīts 5.4. attēlā.



5.4. attēls. Lūzumi un plaisas Džosera pakāpju piramīdas austrumu fasādes 2.- 6. pakāpē kopējā ģeotelpiskajā modelī.

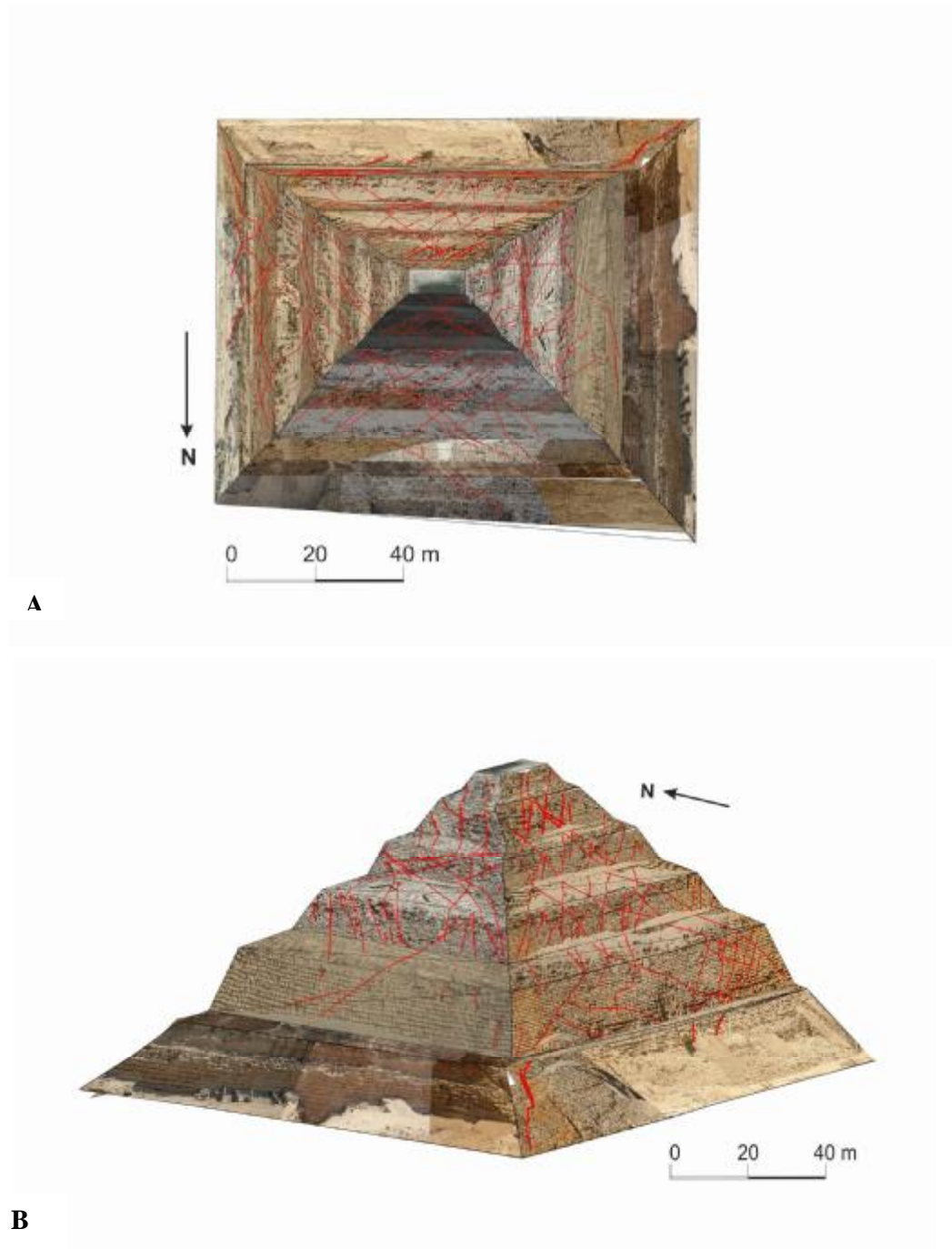
Figure 5.4. The splits and faults visible on the five upper steps of the southern facade of the Step Pyramid of Djoser integrated into geospatial model of the pyramid.

Izstrādātajā piramīdas ģeotelpiskajā modelī nav integrēta piramīdas pazemes daļas struktūra, kā arī mūsu rīcībā nav ziņu par piramīdas iekšējo uzbūvi (tās aizpildījumu), līdz ar to seismiskās ietekmes datu analīze nedod iespēju interpretēt noteiktu zināšanu pieaugumu vai kritumu piramīdas celtniecības laikā.

Pašu nozīmīgāko plaisu un lūzumu analīzes rezultātu grafiskais attēls (5.5. attēls) norāda uz lūzumu zonu piesaisti piramīdas pakāpienu distālajām daļām, kā arī visai nevienādu sadalījumu starp piramīdas fasādēm.

Blakus iepriekšēji apskatītajiem lūzumiem īpaši apskatāmi ir visās piramīdas fasādēs konstatētie diagonāli vērsti lūzumi. Daudzi no tiem ir izsekojami ne tikai vairākās pakāpēs, bet arī vairāk nekā trešajā daļā no fasādes platumā. Daži ir izsekojami trijās vai pat visās četrās fasādēs un visdrīzāk atspoguļo plakni, kas ievērojama pazemes grūdienu apstākļos var kļūt par slīdējuma virsmu un šāda būve vairs nebūs atjaunojama.

Mūsu rīcībā nav ziņu par piramīdas iekšējo uzbūvi un iespējams, ka tajā ir atšķirīgas kvalitātes un īpašību materiāli, kas var elastīgi dzēst šādas kustības, bet fasādes analīze ļoti skaidri norāda uz būves veseluma nopietniem apdraudējumiem.



5.5. attēls. Noteikto lūzumu un plaisu izvietojums uz piramīdas fasādēm. A: skats no augšas; B: skats uz piramīdas DR stūri (Seglins, Kukela, 2012).  
 Figure 5.5. Location of faults and cracks identified on the facades of the Step Pyramid; A: top view; B: south-west corner view (Seglins, Kukela, 2012).

Iegūtais un pētījumā izmantotais 3D modelis ir būtisks ieguvums un rada priekšrocības kā datu piesaistei, tā arī šo datu un rezultātu interpretācijai. Modelis ļāva piramīdas fasādēs atpazītās un pēc nozīmīguma klasificētās plaisas un lūzumus



izvērtēt kopumā un daudzas no tām atpazīt kā savstarpēji saistītas, kas visdrīzāk atspoguļo seismisko notikumu rezultātus.

Izveidotā fotodokumentu datu bāze ar dažādos gados veiktajiem foto uzņēmumiem ļauj izvairīties no subjektīvisma lūzumu diagnostikā, kas ir visai sarežģīta. Īpaši tas attiecas uz piramīdas pirmajām pakāpēm, kuras ir visvairāk pārbūvētas un pagājušā gadsimtā visvairāk labotas. Diemžēl pašlaik visa piramīda ir segta ar celtniecības stalažām un veikt sagatavotās interpretācijas detalizāciju un pārbaudi tuvākajos gados nebūs iespējams.

Iegūtais piramīdas fasāžu plaisainības novērtējums nav iepriecinošs – būve ir ļoti stipri bojāta un tas ir uzskatāms par pašu lielāko draudu visa pieminekļa saglabāšanai. 3D modelis uzskatāmi norāda 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.

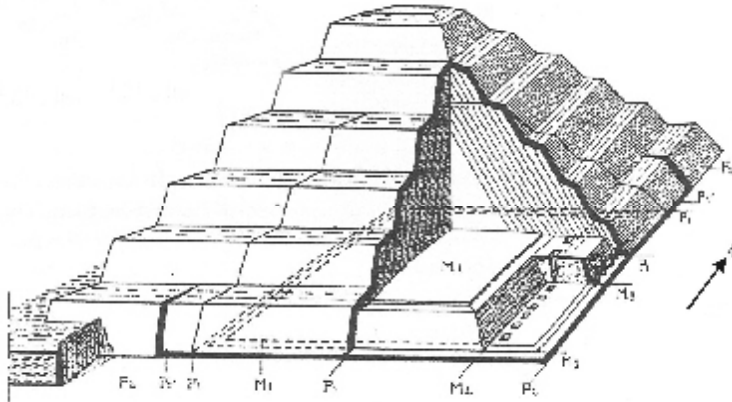
### 5.3. Izmantoto akmens būvmateriālu kvalitātes pazīmes

Regulāras seismiskas aktivitātes rezultātā Sakāras plato (Ambraseys *et al.*, 1995) masīvie kaļķakmens slāņi saplaisā, veidojot savdabīgu bloku struktūru ar izmēriem aptuveni 0,3-0,4 m (5.6. attēls), daudz retāk sastopami lielāki neplaisājuši kaļķakmens dabiskie bloki. Seismiskā aktivitāte ietekmē arī jau izveidotās būves nekropolē, kā rezultātā senie pieminekļi zaudē savu stabilitāti.



5.6. attēls. Sakāras plato ģeoloģiskā griezuma eksponētā daļa  
Figure 5.6. Exposed fragment of geological section of Saqqara plateau

Džosera piramīdas būvniecībā izmantoto akmens bloku izgatavošanas kvalitātes un bloku dēdēšanas novērtējums ļāva nodalīt jau iepriekšēji zināmos (Lauer, 1962) piramīdas izveides posmus (5.7. attēls)



5.7. attēls. Shematisks Pakāpju piramīdas būvniecības stadiju modelis (Verner, 2004, 115 lp.). Apzīmējumi: M1, M2, M3 – sākotnējās mastabas pārbūves posmi; P1, P2 – piramīdas pārbūves posmi.

Figure 5.7. Schematic representation of stages in building the Step Pyramid (Verner, 2004, pp.115). M1, M2, M3 – initial mastaba rebuilding stages; P1, P2 – pyramid rebuilding stages.

Šie valdnieka Džosera piramīdas būvniecības posmi turpmāk tika raksturoti pēc 4.7. apakšnodaļā minētajiem būvbloku kvalitātes novērtēšanas kritērijiem (5.1. tabula).

5.1. tabula. Akmens materiāla kvalitātes izmaiņas valdnieka Džosera piramīdas būvniecības dažādos posmos

Table 5.1. Changes in the quality of stone material in different stages of construction of the Step Pyramid

Akmens bloku raksturojums	Džosera piramīdas būvniecības fāzes pēc Lauēra (Lauer, 1962)				
	M1	M2	M3	P1	P2
<b>Bloku izmēri, cm</b>	Apm. 0.45-0.70	Apm. 0.25-0.50	Apm. 0.45-0.80	Apm. 0.50-1.20	Apm. 0.70-1.40
Izmēru dažādība, variācijas	Ļoti plašas variācijas, izmēri var mainīties vairākas reizes	Aptuveni vienādu izmēru akmeņi, izmēru atšķirības līdz 50%	Dati nav pietiekoši	5-6 dažādi tipveida izmēri, sīki akmeņi un šķembas izmantoti plaisu un lielāku šuvju aizpildīšanai	Izmantoti tikai daži tipveida izmēri; reti izmantoti citi bloku izmēri

5.1. tabulas turpinājums.

Akmens bloku raksturojums	Džosera piramīdas būvniecības fāzes pēc Lauēra (Lauer, 1962)				
	M1	M2	M3	P1	P2
<b>Izvēlēta materiāla vienveidīgums</b>	Ļoti augsta dažādība, nereti ievietoti dēdējuši, neviendabīgi akmens bloki	Ļoti liels skaits atšķirīgu īpašību akmens bloku	Dati nav pietiekoši	Vairāki pēc īpašībām līdzīgi materiāli	Viena vai ļoti tuva sastāva un īpašību akmens materiāla atlase
<b>Bloku virsmas apstrāde</b>	Neapstrādāts	Noskaldīta tikai viena vai divas malas pielāgojot transportēšanai vai vietai mūrējumā	Dati nav pietiekoši	Noskaldītas malas, virsma nav papildus izlīdzināta	Apstrādātas visas malas, nereti nogludināta virsma
<b>Bloku iepriekšēja apstrāde</b>	Akmens nav iepriekšēji apstrādāts	Tikai retos gadījumos akmens bloki ir apskaldīti	Dati nav pietiekoši	Blokam ir piešķirta tikai ārējā forma, nav nodalīts nekvalitatīvs materiāls	Gandrīz vienmēr no bloka ir nodalīts nepiemērots mālaino iežu slānis

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

Otrs būtisks solis ir pāreja no iepriekšējās raksturotās kvalitātes akmens materiāla (M2/M3) uz viena tipa akmens bloku iestrādi būvē (P1). To kvalitāte nav augsta, bloku izmēri atšķiras, bet iegūts ir līdzīga sastāva un 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, 2012e).

No būvniecībai nepieciešamo resursu ieguves skata punkta tās ir fundamentālas izmaiņas, kuras turpmākajā būvniecības gaitā nodrošina kontrolēti augstas kvalitātes būvmateriālu izvēli monumentālās būvēs Gīzā, kas arī mūsdienās pamatoti tiek sauktas par Pasaules brīnumiem.

Tomēr ir vēl vairāki aspekti, kas tika apzināti, detalizēti pētot dēdēšanas pazīmes Džosera piramīdas fasādēs, kā arī aplūkojot un analizējot katra bloka eksponēto virsmu. Šie pētījumi norāda, ka piramīdas izveides vēlākajā posmā (P2), kas ir ildzis vairākus gadus, ir atpazīstamas pakāpeniskas izmaiņas iestrādāto akmens bloku kvalitātē - izmēru precizitāte, bloka virsmas izlīdzinājuma pakāpe, bloka viendabīgums un nekvalitatīvā materiāla nodalīšana. Pēc šādām pazīmēm nosacīti var izdalīt vairākus P2 būvniecības posmus, kas izsekojami visās fasādēs virzienā no apakšas uz augšu - kā tika izbūvēta pati piramīda.

Šajā būvniecības posmā piramīdas apakšējā daļā, izveidojot pirmo pakāpienu, akmens būvbloku kvalitāte ir kontrastaina. Vietām tā ir līdzīga iepriekšējā būvniecības posma (P1) raksturīgai kvalitātei, bet tomēr dominē augstākas kvalitātes un daudz rūpīgāk izvēlēts akmens materiāls. Tas ir apskaldīts no visām pusēm, tikai retos uzņēmumos konstatējama arī bloku virsmas apstrāde. Šīs ir raksturīgas iezīmes piramīdas apakšējo divu pakāpienu izveidei (5.8. attēls).



5.8. attēls. Raksturīga būvbloku kvalitāte piramīdas apakšējā daļā. Pakāpju piramīdas dienvidu fasādes otrā pakāpiena fragments.  
Figure 5.8. Characteristic quality of the blocks laid in the lower part of the Step Pyramid (fragment of the second step of the southern facade).

Atsevišķi apskatāma ir būvmateriāla izvēle piramīdas rietumu fasādes pamatnē, kur pēdējo gadu laikā ir atsegts arī septītais jeb pats pirmais pakāpiens. Līdz šim tas nebija zināms un tas nav izveidots vismaz dienvidu fasādes pamatnē. Šī pamatnes (jeb „0” pakāpiena) izveidei izmantotais būvakmens ir visai atšķirīgs (5.9. attēls). Pēc sastāva tas ir daudz smilšaināks kaļķakmens kā turpmāk izmantotais, akmens bloki ir rūpīgi apkalti un virsmas līdzinātas, bloki ir akurāti savienoti viens ar otru izmantojot ļoti nelielu ģipša-kleķa saistvielas daudzumu. Bloku izmēri atšķiras un ir nodalāmi vismaz 3 to izmēru tipi. Rietumu fasādē atsegtais „0” pakāpiens, visdrīzāk, ir piebūvēts vēlāk ar mērķi stabilizēt būvi. Tas pats attiecināms arī uz piramīdas ziemeļrietumu un dienvidrietumu stūru pamatiem, kuros ir iestrādāti masīvi akmens bloki, kas nav izmantoti nekur citur piramīdas būvniecībā.

Diemžēl joprojām nav zināms laiks, kad šis mūrējums ir ticis izveidots un vai tas patiešām ir piramīdas atsevišķais pakāpiens vai tikai tā balsta siena. Pēc akmens apstrādes īpatnībām tas patiešām būtu drīzāk attiecināms uz vēlāku būvniecības posmu nekā pašas piramīdas galvenās būves izveides laiku.



5.9. attēls. Piramīdas pamatnē jeb „0” pakāpienā izmantotie būvbloki (rietumu fasāde); pa kreisi – 2010.gada fotouzņēmums; pa labi – 1930-to gadu fotouzņēmums (Firth, Quibell, 1935, 9. att.).

Figure 5.9. Building blocks used at the base or “0” step at the western façade of the Step Pyramid; on the left – photograph taken in 2010; on the right – photograph taken in the 1930’s (Firth, Quibell, 1935, Pl.9).

Tāpat nav zināms, no kāda materiāla un kā ir veidota piramīdas pamatne (pēda), virs kuras piramīda ir izbūvēta, tādēļ būtu nepieciešami atsevišķi piramīdas aizpildījuma pētījumi.

Piramīdas vidējā daļa (galvenokārt – trešais un ceturtais piramīdas pakāpiens skaitot no pamatnes) raksturojas ar ievērojami augstāku izvēlēta būvkmens kvalitāti – tie ir salīdzinoši vienveidīgi bloki, apstrādāti, virsmas nav papildus līdzinātas (tās šeit aizstāj biežāks mūra javas daudzums) (5.10. attēls). Interesanti atzīmēt, ka šis būvniecības posms ir visai kontrastains arī pēc izpildītā darba kvalitātes un ko uzskatāmi norāda cementa slāņa biežums, mūrējuma un bloku izvietoējuma akurātums. Minētais visdrīzāk norāda uz atšķirīgu amatnieku (to brigāžu) kvalifikāciju un pieredzi.



5.10. attēls. Valdnieka Džosera piramīdas augšējās daļas būvbloku kvalitāte (ceturtais pakāpiena fragments, dienvidu fasāde).

Figure 5.10. Building blocks used in the upper part of Djoser’s Pyramid (fragment of the fourth step of the southern façade).

Noslēdzošā piramīdas izveides posmā, kad tiek izveidoti augšējie divi pakāpieni (piektā pakāpiena augšējā daļa un sestais pakāpiens), izvēlēto akmens bloku kvalitāte ir savam laikam izcila (5.11. attēls). Tie ir ļoti precīzi noskaldīti, apstrādāti no visām pusēm, vismaz daļa no bloku virsmas ir papildus izlīdzinātas, šajos blokos nav mālaino iežu starpslāņu paliekas (tās ir nodalītas). Bloku izmēri ir ļoti regulāri, kā rezultātā arī izmantotās saistvielas daudzums ir ļoti neliels un nepārsniedz apm. 3-5 % no būvapjoma. Neveicot speciālu analīzi nereti izskatās, ka bloki ir savulaik tikuši precīzi piestrādāti viens pie otra, veidojot vienotu monolītu.



5.11. attēls. Valdnieka Džosera piramīdas noslēdzošā posma būvbloku kvalitāte (piektā un sestā pakāpiena fragments, dienvidu fasāde).

Figure 5.11. Building blocks used in the final stage of the construction of Djoser's Pyramid (fragment of the fifth and sixth steps of the southern facade).

Daudzi pētnieki (Firth, Quibell, 1935; Lauer, 1962; Edwards, 1967; Verner, 2004; Lehner, 2004) norāda, ka Džosera piramīda sākotnēji ir bijusi apšūta ar balta akmens plāksnēm, kas ir bijis pats vēlākais piramīdas būvniecības posms. Daži minētā apšūvuma balsta elementi pie piramīdas pamatnes ir redzami arī mūsdienās. Diemžēl tie visi ir pārvietoti, rekonstruēti, vietām aizvietoti ar citiem, kas mūsdienās neļauj spriest par to autentiskumu, jo senākie rekonstrukcijas darbi savulaik nav tikuši dokumentēti. Mūsdienās šeit konstatējami Tūras (senas akmeņlauztuves Nīlas pretējā krastā) balta un gaiši pelēka smalkgraudaina kaļķakmens īpaši apstrādāti bloki. Arī šo blokus saistošais ģipša-kaļķa cements visdrīzāk ir rekonstrukciju rezultāts. Pēc izmantotā akmens sastāva tie ir līdzīgi blakus esošo jaunāku piramīdu apšūvumā izmantotiem blokiem un minētais kaļķakmens ir labi zināms no piramīdu apšūvuma Gīzas nekropolē (5.12. attēls).

Džosera piramīdas gadījumā mums ir pamats pieņemt, ka tā tiešām ir bijusi apšūta, tomēr to detalizētākai raksturošanai mūsu rīcībā nav pietiekošu datu. Pastarpināti pati piramīdas apšūvuma izveide no akmens plāksnēm mūsu pētījumā ir svarīgs konstatējums, jo ļauj izdarīt vairākus svarīgus secinājumus. Tas ir drošs apliecinājums amatnieku meistarībai iegūt salīdzinoši plānas un viendabīgas akmens plāksnes, tās transportēt, t.sk., šķērsot Nīlu, kā arī prasmīgi iestrādāt plašos fasādes klājumos.



5.12. attēls. Piramīdu apšuvuma liecību piemēri. Pa kreisi - valdnieka Hefrēna piramīda Gīzā ar apšuvuma no Turas raktuvēm paliekām; pa labi – apšuvuma paliekas Džosera piramīdas austrumu fasādes apašējā daļā (Firth, Quibell, 1935, 9. att.).  
 Figure 5.12. Examples of casing remains. On the left - the Pyramid of Khafre at Giza with the remains of casing from Tura quarry; on the right – casing on east facade of the pyramid of Djoser (Firth, Quibell, 1935, Pl. 9).

Otra izrietošo secinājumu daļa attiecas uz ģeoloģiskām zināšanām. Pat vienas šādas piramīdas apšūšanai ar vienādas kvalitātes akmens plāksnēm ir nepieciešama atradne, kas ir jāatklāj, jāizpēta, jānovērtē, ir jāveic vismaz vienkāršotas tehnoloģiskās pārbaudes. Katrā ziņā objekta statuss – valdnieka kapavieta, te kādas nozīmīgas atkāpes nepieļautu. Ņemot vērā, ka kapeņu kompleksa izveides ilgums līdz šim ir vērtēts kā aptuveni 20 gadi un pēdējais (P2) piramīdas izveides posms ir aizņēmis ne vairāk kā 5 gadus, tad pat mūsdienās ir grūti stādīties priekšā šo visu pētījumu un būvdarbu realizāciju tik īsā laika posmā (Nicholson, Shaw, 2009).

Kopumā, novērtējot piramīdas celtniecībā izmantoto būvmateriālu, var skaidri izdalīt dažādos būvniecības un materiālu atlases posmus. Šo dažādo posmu vizualizācijai vislabāk noder izstrādātais piramīdas ģeotelpiskais modelis (skat. 5.1. apakšodaļu), kurš ir piemērots dažādu specifiskās informācijas slāņu attēlošanai.

#### 5.4. Izmantoto saistvielu novērtējums

Valdnieka Džosera piramīdā par saistvielu ir izmantoti dažādi mākslīgi veidoti maisījumi un šo saistvielu izmantojums dažādās piramīdas daļās nav vienmērīgs un vizuāli gandrīz neatšķirams. Tādēļ pašreizēji ir iespējams novērtēt tikai saistvielas dēdēšanas pakāpi, kas ir pretēja tās saglabātības pakāpei. Pētījums ļauj vizuāli diagnosticēt 5-6 dēdēšanas paveidus un novērtēt tos vairākās intensitātes klasēs. Minētā tipoloģija ir izstrādāta vairākos parauglaukumos, izvērtējot visas piramīdas fasādes. Detalizēti pētījumi norāda, ka piramīdas būvniecības gaitā vienlaicīgi ir tikušas izmantotas dažāda sastāva javas, tomēr nav zināmi šādas izvēles iemesli, jo ir apzināta tikai fasādes ārējā kārtā nelielā dziļumā.

Ņemot vērā, ka objektā nav iespējams veikt tiešus instrumentālus mērījumus un ņemt paraugus analītiskiem pētījumiem, izstrādātā klasifikācija ir izteikti empīriskā un nav universāla, tomēr tā ir nozīmīgs atspajds konservācijas projektu izstrādei.

Visu piramīdas fasāžu fotodokumentācijas analīze ļāva noteikt plašāk izplatītos piramīdas būvniecībā izmantotos saistvielu veidus. Visplašāk izplatīti ir divu veidu saistvielas (cementi), kuru pamatmasu vienā gadījumā veido tradicionāls kleķa materiāls no Nīlas nogulām, bet otrā – kompozītu masa no smiltīm un ģipša ar kaļķu un māla piemaisījumu. Atkarībā no komponentu proporcijām ir iespējams vizuāli diagnosticēt un arī pārbaudīt dabā vairākas šo dominējošo cementu tipu paveidus. Kopumā to raksturo 5.2. tabula.

5.2. tabula. Galvenie bloku saistvielu (cementa) veidi un to raksturīgākie bojājumi  
Table 5.2. Main types of mortar (cement) and their typical forms of damage

<i>Vizuāli nosakāmie cementa paveidi un to apzīmējums</i>	<i>Raksturīgākie bojājumi</i>	<i>Bojājumu intensitātes raksturojums; piezīmes</i>
<b>Māla kleķa cements (A)</b>		Satur mālu 3-35%
Masīvs un viendabīgs (AM) <i>adobe massif structure</i>	Žūšanas plaisāšana. Izlūzuši un zaudēti cementa gabali Zaudējis struktūru Zaudēta cementa masa	Saplaisājis; tukšumi, intensīvi saplaisājis; pilnībā vai daļēji sabrucis; saplūdis vienotā masīvā ar blokiem
Ar nelielu liesinātāja piejaukumu (ALP) <i>adobe lean material poor</i>	Žūšanas plaisas Mehāniskas plaisas Izlūzuši gabali Zaudējis struktūru Zaudēta cementa masa	Smiltis, smilts un smalkas grants graudi, drupināti gliemežvāki, drupināta keramika (terakota) – piejaukums līdz apmēram 10%
Ar ievērojamu liesinātāja piejaukumu (ALR) <i>adobe lean material rich</i>	Plaisas Zaudēta struktūra Zaudēta cementa masa	Dažāds mehāniski jaukts un inerts liesinātājs līdz 25%-30%, visbiežāk – skalota Nīlas upes smilts
Ar organiskas cilmes makropiemaisījumiem (AO) <i>adobe organic</i>	Zaudēta kleķa masa	Plēsti un smalcināti salmi, retāk – niedres un sīki zari; piejaukums līdz 35%
<b>Kleķa cementa kompozīta materiāls (AC) <i>Adobe composit</i></b>	Pazīmju izpausme atkarīga no pievienotā materiāla sastāva un kompozīcijas	Kleķa masa, kurā iejaukts malts (apdedzināts vai neapdedzināts) kaļķis (ar vai bez ģipša)
<b>Smilšu-kaļķa (ģipša) maisījuma masa (SL) <i>sand-lime (gypsum)</i></b>	Plaisas Kaļķu saistvielas zudums Cementa masas zudums	Smalcināts kaļķis apmēram 15-30% tilpuma. Gandrīz vienmēr neliels (līdz 5-10%) malta ģipša piejaukums, bieži drupināti gliemežvāki. Dažāda raupjuma skalotas smiltis



## 5.2. tabulas turpinājums

<i>Vizuāli nosakāmie cementa paveidi un to apzīmējums</i>	<i>Raksturīgākie bojājumi</i>	<i>Bojājumu intensitātes raksturojums; piezīmes</i>
<b>Kaļķu java (L) Lime</b>	Plaisas Saslāpošanās un horizontāla plaisainība Gabalu zudumi Cementa masas zudumi mehāniska dēdēšana)	Kaļķis vairāk kā 50% tilpuma. Droši atpazīstama tikai kopš Vēlā dinastiskā perioda pārbūvēm un rekonstrukcijām
Dažādi mūsdienu cementējošie materiāli un vielas, kas izmantoti daudzos nostiprināšanas un remontu darbos kopš pagājušā gadsimta 30-tiem gadiem (M) <i>Modern</i>  Vizuāli atšķiramas vairāk nekā 10 atšķirīgas saistvielas		Izmantoto saistvielu kvalitāte ir ļoti atšķirīga, kopumā – ievērojami zemākas kvalitātes attiecībā pret cementētā akmens materiāla noturību pret fizisko dēdēšanu

Nav lietderīgi mēģināt detalizēt pēdējā gadsimta laikā veikto remontu un rekonstrukcijas darbos izmantoto cementu atšķirības. Tās kopumā pat vizuāli var nošķirt no senākos laikos izmantotām un pēc autora pieredzes, kā galvenā atšķirības pazīme izceļams saistvielu viendabīgums. Remontu laikā saistviela visbiežāk ir klāta kā ļoti viendabīga smalkgraudaina pastveida masa, bet darbu izpilde ir ļoti pavirša: cements ir klāts, pārsedzot arī apkārtējos akmens blokus, virsmas nav tikušas iepriekšēji attīrītas un sagatavotas, kā rezultātā jaunā saistviela viegli brūk un intensīvi dēdē. Tādēļ izmantotās saistvielas detalizācija ir visai apgrūtināša un noteiktus pieminekļa rekonstrukcijas periodus un izmantotās saistvielas vismaz vizuāli izdalīt nav iespējams. Veiktā piramīdas fasāžu fotodokumentēšana skaidri norāda, ka ievērojama daļa no iepriekšēji veiktajiem rekonstrukcijas darbiem būs jāatkārto jau netālā nākotnē.

Detalizēti vērtējot dēdēšanas ietekmi uz dažādiem cementa veidiem, papildus noteiktai piederībai cementa tipam, ir iespējams novērtēt arī cementa dēdēšanas intensitāti. Dažas raksturīgas pazīmes ir norādītas 5.2. tabulā, tomēr jebkuru no izdalītajiem cementa tipiem pēc tā saglabātības pakāpes var vizuāli novērtēt un iedalīt tos vairākās intensitātes klasēs (ballēs vai punktos) no 1 (masīva, strukturēta cementa masa bez redzamām bojājuma pazīmēm) līdz 5 (pilnīgs cementa masas zudums). Minēto ilustrē piemērs no piramīdas austrumu fasādes (5.13. attēls), kur redzamas raksturīgas kleķa cementa kompozīta materiāla cementa (AC) dēdēšanas intensitātes atšķirības.



5.13. attēls. Raksturīgas kleča cementa kompozīta materiāla cementa (AC) tipa dēdēšanas atšķirības. Pakāpju piramīdas dienvidu fasāde; augšējā attēlā – parauglaukuma oriģinālais fotouzņēmums; apakšējā attēlā: 1 - 5 apzīmē cementa dēdēšanas intensitāti.

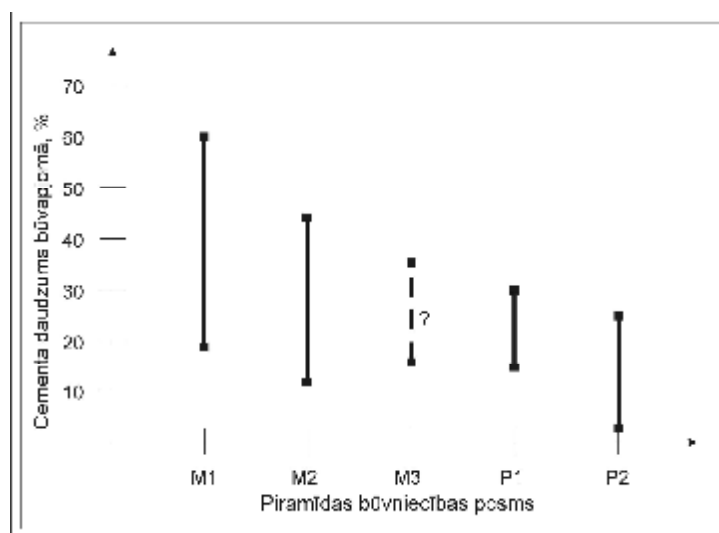
Figure 5.13. Typical weathering traits of adobe composite cement (AC). Southern facade of the Step Pyramid; above: original image of the sample area; below: the intensity of cement weathering measuring from 1 to 5.

Arī saistvielas daudzums, kas izmantots Valdnieka Džosera piramīdas celtniecībā nav vienāds. Kapenes pirmā mastaba tika veidota no apkārtņē savāktiem plakaniem akmeņiem, kas ir izturīgāki par kleča ķieģeļiem. Tomēr to drošība nav pārbaudīta, noteikta nozīme ir arī ierobežotam būvei nepieciešamo akmeņu daudzumam apkārtņē. Iespējams tieši tādēļ piramīdas pamatnē esošās mastabas būvē ir izmantots visai ievērojams cementa daudzums, kas vietām pārsniedz iestrādāto akmeņu daudzumu. Turpmākās būvniecības stadijās tiek apgūti jauni akmens materiāla ieguves un apstrādes paņēmieni, kas ļauj ļoti būtiski samazināt nepieciešamā cementa daudzumu (5.14. attēls). Vienlaicīgi tiek pilnveidota arī saistvielas kompozīcija, jo mainījies ir to būvbloku sastāvs un īpašības, kas ir saistāms.

Līdzšinēji paveiktais norāda uz salīdzinoši drošu cementa tipu diagnostiku visās piramīdas fasādēs un iespējam vizuāli novērtēt tā bojājuma pakāpi ārējā kārtā. Vienlaicīgi jānorāda, ka piedāvātā cementa dēdēšanas intensitātes novērtēšanas sistēma joprojām ir tehniski grūti realizējama un tā ir ļoti darbietilpīga. Tā nevar tikt rekomendēta liela izmēra objektiem, bet detalizētiem pētījumiem un precizēšanai detalizācijas laukumos tās ir nozīmīgs papildus informācijas avots.

Pētījumi parauglakumos piramīdas pirmajā un otrajā pakāpienā norāda, ka cementējošās vielas saglabātību ir iespējams novērtēt, izdalot piecas dēdēšanas intensitātes klases, bet, novērtējot šāda izmēra pieminekli kā Džosera piramīda, kopumā, minētā klasifikācija ir vienkāršojama līdz tā ir pielietojama arī pakāpieniem,

kuri tiešiem pētījumiem nav pieejami. Metodiski svarīgākais elements ir iespējas kvalitatīvi, balstoties uz fotodokumentācijas analīzi, novērtēt cementējošās vielas bojājumu pakāpi un to precīzi piesaistīt objekta 3D matemātiskajam modelim.



5.14. attēls. Cementa daudzums katrā no piramīdas būvniecības posmiem, kas noteikts fasādes eksponēto virsmu analīzes rezultātē.

Figure 5.14. Amount of cement (%) in the building volume correlated to the pyramid's construction stages. Assessment of exposed surfaces of the facades of the Step Pyramid of Djoser.

Veiktais pētījums norāda, ka, balstoties uz augstas precizitātes ģeotelpisko modeli un kvalitatīvu fotodokumentāciju, blakus jau minētajiem akmens materiāla pētījumiem, ir iespējams kvalitatīvi realizēt vēl vairākus citus pētījumus, piemēram, novērtēt būvniecības gaitu (secīgumu), būvākmeņus ieguves avotu dažādošanos un tamlīdzīgi.

Saistvielu novērtējums ir indikators, kuru efektīvi var izmantot, pētot ne tikai būves drošību un stabilitāti, bet arī nosakot neatliekami nepieciešamos remontus. Saistvielas raksturo arī būvniecības dažādos posmus un palīdz novērtēt zināšanu pieauguma izmaiņas piramīdas būvniecības gaitā. Diemžēl, izvēlētai metodikai, kas balstās uz nedestruktīvu novērtējumu un nepieļauj paraugu ņemšanu un tālākas laboratoriskas pārbaudes, ir ierobežotas iespējas. Iegūtie rezultāti ir uzskatāmi kā orientējoši un būtu detalizējami nākotnē, tam veltot speciālu pētījumu.

## 5.5. Džosera piramīdas akmens materiāla dēdēšanas novērtējums

Džosera Pakāpju piramīda ir veidota no atšķirīgu izmēru kaļķakmens blokiem, kuriem ir dažāda kvalitāte un saglabātības pakāpe. Mūsdienās ir konstatējami nozīmīgi akmens materiāla bojājumi un būve ir vairākkārtīgi remontēta un rekonstruēta kā senajos laikos, tā arī pagājušajā gadsimtā. Izceļama ir tieši fiziskās dēdēšanas nozīme un akmens materiāla masas un kvalitātes zudums. Netieši šos rādītājus var novērtēt pēc dēdēšanas veidu izpausmēm un to intensitātes.

Piramīda nav pieejama tiešiem pētījumiem, kas ierobežoja metožu izvēli un iespējas instrumentāli un analītiski novērtēt daudzus raksturlielumus. Tādēļ par pamata informācijas avotu pētījumam kalpoja vairākkārtīgi veiktā piramīdas fasāžu fotodokumentēšana un iegūto datu fragmentāra pārbaude dabā, neizmantojot destruktīvas pētniecības metodes.

Pētījuma vajadzībām tika izveidots piramīdas ģeotelpiskais modelis datorprogrammā MicroStation V8i (Seglins *et al.*, 2011) un tas ļāva uz tā pamatnes izveidot vairākus specifiskās informācijas slāņus. Kā viens no šādas informācijas slāņiem ir piramīdas akmens materiāla dēdēšanas raksturīgākie veidi un dēdēšanas intensitāte (Seglins *et al.*, 2011). Ir izstrādāta noteikta metodika dēdēšanas pazīmju diagnostikai, to klasifikācijai, kā arī eksponēto virsmu kartēšanai. Tā ir visai atšķirīga no literatūrā biežāk diskutētām (Aboushook *et al.*, 2006, 2008; Dorn, Cervený, 2005; Fitzner, Heinrichs, 2002). Būtiskākā atšķirība ir pazīmju klasifikāciju vienkāršošanā līdz salīdzinoši nelielam dēdēšanas veidu skaitam, kas ir droši kartējamas visā objektā, nevis tikai ierobežotā testa laukumā. Arī šajā gadījumā ir izceļamas izveidotā 3D modeļa priekšrocības ar tā integrāciju WEB GIS sistēmās, kas ļauj praktiski neierobežoti papildināt esošo pētījumu datu bāzi ar pilnīgākiem datiem nākotnē, pat tad, ja tie aptvers ierobežotu kādas fasādes laukumu.

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 dēdēšanas rezultātā. Papildus novērtēta arī būvblokus savstarpēji saistošā cementa veidi un to saglabātība (Kukela, Seglins, 2012a).

Analīzes gaitā papildus tika vērtēta izmantoto būvbloku kvalitāte, kā arī tās atšķirības dažādās piramīdas izveides fāzēs. Par akmens būvbloku kvalitātes novērtēšanas kritērijiem tika noteikti: bloku izmēri (izmēru dažādība, variācijas) un izvēlētā materiāla vienveidīgums (viena sastāva un īpašību akmens materiāla atlase), bloku virsmas apstrāde (neapstrādāts, noskaldītas malas, apstrādātas visas malas, nogludināta virsma) un bloku iepriekšēja apstrāde, paaugstinot to kvalitāti (nodalīts viegli dēdējošs mālaino iežu slānis). Papildus tika apzinātas iespējamās senās būvākmeņi ieguves vietas Sakāras plato stāvajās austrumu un ziemeļaustrumu nogāzēs, kur vietām tie ir pieejami apskatei, jo šeit ir iekārtots visai ievērojams skaits senu kapeņu. Tas ļāva salīdzināt iegūtos rezultātus ar citiem publicētiem pētījumiem par piramīdu būvniecībā izmantotā akmens materiāla kvalitāti (Klemm, Klemm, 2010; Clarke, Engelbach, 1990).

Pētījuma vajadzībām tika izstrādāts Džosera piramīdas bloku virsmas dēdēšanas piemēru katalogs, kas aptver vairākus dēdēšanas veidus (noapaļošana, virsmas noslāņošanās un akmens materiāla zudums) un katram no tiem ir noteiktas 5 dēdēšanas izpausmes intensitātes (Kukela, Segliņš, 2012d). Tas ļāva izveidot izstrādātā kataloga aprakstu, kas īsumā tiek raksturots zemāk.

#### *Noapaļošanās (N)*

Dēdējuma formām ir raksturīgas sākotnēji taisnstūra akmens bloku virsmas stūru un skaldņu izmaiņas, materiāla viendabīguma zudums, kas ir atpazīstams kā būvbloku eksponēto virsmu stūru noapaļojumi. Šis dēdēšanas veids ir vizuāli konstatējamas uz bloka eksponētās virsmas un šķautnēm (īpaši bloka stūros). Vizuāli dabā un fotodokumentācijā droši ir atpazīstamas un savstarpējos salīdzinājumos izmantojamas tikai 4 dēdēšanas intensitātes pakāpes.

0. intensitātes pakāpe norāda uz nenozīmīgām pārmaiņām bloka virsmā, tomēr izdalītais dēdēšanas veids ir atpazīstams. Raksturīgākās pazīmes ir skaidri atšķirami bloku taisnie stūri, kas ļauj novērtēt izmantotā būvbloka sākotnējos izmērus un formu.

1. intensitātes pakāpe norāda, ka bloku eksponētā virsma un sānu šķautnes ir nedaudz noapaļotas, bet viens vai vairāki bloka stūri vēl ir atpazīstami.

2. intensitātes pakāpe apzīmē tādu bloka eksponētās virsmas dēdēšanas intensitāti, kura ir skārusi visas bloka šķautnes, visiem būvbloka stūriem ir konstatējams noapaļojums, vairs nav iespējams rekonstruēt sākotnējos bloku izmērus, bet paša bloka apjoms ir sarucis nedaudz.

3. intensitātes pakāpe norāda, ka dēdēšana ir būtiski skārusi gan būvbloka eksponēto virsmu un stūrus, gan arī tā šķautnes; bloks ir mainījis izmērus un tā vizuāli atpazīstamā forma ir kļuvusi ovāla, ieapaļa vai apaļa un būvbloka apjoms ir ievērojami samazinājies.

4. intensitātes pakāpe norāda uz būtiski dēdēšanas skartu bloku, kuram ir būtiski skartas šķautnes un bloka stūri vairs nav atpazīstami; bloks ir ieguvis ieapaļu vai ovālu formu, un ir vērojams būtisks bloka apjoma samazinājums.

#### *Virsmas noslāņošanās (V)*

Dēdēšanas veidam ir raksturīga akmens bloka pakāpeniska sadalīšanās slāņos, kas var skart gan bloka šķautnes, gan arī bloka eksponēto virsmu un nereti šāda dēdēšanas veida ietekme ir izsekojama arī bloka iekšienē.

0. intensitātes pakāpe norāda, ka būvbloks ir saglabājis savu sākotnējo formu un izskatu, uz tā šķautnēm un sānu skaldnēm vizuāli nav atpazīstama dēdēšanas ietekme, bet bloka eksponētā virsmā iezīmējas slāņi, kas ir paralēli zemes virsai. Šie vizuāli atpazīstamie slāņi nav saistīti ar būvbloka dabisko tekstūru un struktūru.

1. intensitātes pakāpe apzīmē bloku, kura šķautnēs un eksponētā virsmā ir vērojama slāņu veidošanās atsevišķos būvbloka laukumos, joslās, neregulāras formas fragmentos un minētās pazīmes klāj nelielu bloka daļu.

2. intensitātes pakāpe norāda, ka uz bloka eksponētās virsmas un šķautnēm ir novērojama akmens materiāla kārtu veidošanās visā bloka garumā, skarot ievērojamu bloka eksponētās virsmas daļu.

3. intensitātes pakāpe apzīmē bloku, kura eksponētā virsmā un šķautnēs novērojamā materiāla noslāņošanās veido vairākas kārtas visā bloka eksponētās virsmas garumā un šīs kārtas skar praktiski visu bloka virsmu.

4. intensitātes pakāpe norāda uz bloku, kura eksponētā virsma un šķautnes ir klātas ar noslāņotā akmens materiāla kārtām. Šis noslāņojums pilnībā sedz visu eksponēto bloka virsmu. Tāpat ir konstatējams būtisks bloka šķautņu deformējums, bloka sākotnējā forma un izmēri vairs nav atpazīstami.

#### *Akmens materiāla zudums (Z)*

Vispārinātā formā dēdēšanas veids izpaužas kā akmens materiāla virsmas un šķautņu fragmentu zudums, tas ir, šādas dēdēšanas rezultātā tiek zaudēts pats bloku veidojošais akmens materiāls.

0. intensitātes pakāpe raksturo bloku ar vizuāli neatpazīstamām izmaiņām ne bloka eksponētā virsmā, ne arī tā ar šķautnēs. Konstatētie negludumi, virsmas nelīdzenumi tiek interpretēti kā būvbloka sākotnējās apstrādes pēdas, tomēr vismaz dažas no tām norāda uz neviendabīgas dēdēšanas intensitātes pazīmēm (sīkas plaisas, nevienādas nokrāsas veidošanās laukumos starp sīkām plaišām, utml.).

1. intensitātes pakāpe norāda uz bloku, kura eksponētā virsmā un šķautnēs ir atpazīstami nodrupuši un atlūzuši salīdzinoši nelieli būvbloka fragmenti, galvenokārt veidojot izteiktāki nelīdzenas vienu vai vairākas bloka šķautnes.

2. intensitātes pakāpe apzīmē bloka virsmu, kur konstatējami nošķelti un nodrupuši ievērojami akmens materiāla fragmenti, kas maina bloka formu un deformē tā sākotnējās šķautnes un virsmu.

3. intensitātes pakāpe norāda uz bloka ievērojama apjoma masas izmaiņām, zaudējot atsevišķus gabalus, fragmentus un tas ir konstatējams gan bloka šķautnēs, gan arī bloka eksponētās virsmās. Šāda intensitātes pakāpe norāda uz dēdēšanas procesa būtisku ietekmi uz akmens bloka izturību un nestspēju.

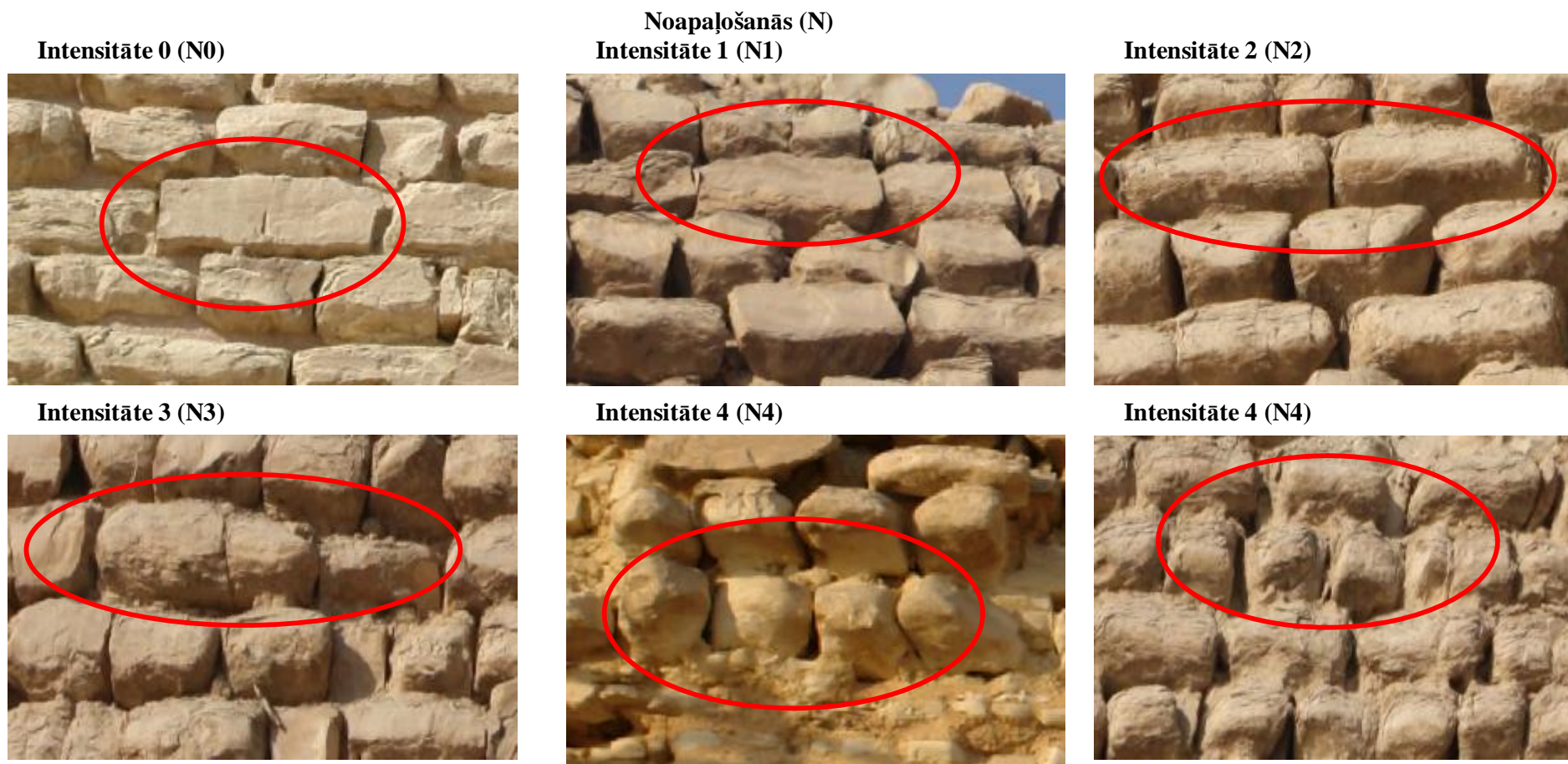
4. intensitātes pakāpe norāda, ka dēdēšanas rezultātā būvbloks ir zaudējis būtisku akmens materiāla apjomu, kā arī savas sākotnējās īpašības. Uz šo intensitātes pakāpi norāda arī dziļas kavernas un dobumi bloka eksponētā virsmā, šādi bojājumi var aizņemt būtisku vai pat visu akmens bloka eksponēto daļu.

Izstrādātais valdnieka Džosera piramīdas fasāžu bloku virsmas dēdēšanas piemēru katalogs ir parādīts 5.15. A, B, C attēlā.

Minētos dēdēšanas veidus un intensitātes, atspoguļojot 3D ģeotelpiskajā modelī konstatējams, ka šo kategoriju izvietojums uz piramīdas fasādēm veido sarežģītu attēlu un nepastāv kāds raksturīgs dēdēšanas veids vai tās intensitāte, kas būtu raksturīga tikai vienai atsevišķai fasādei vai kādai tās noteiktai daļai (5.16. attēls). Tā vietā ļoti izteiktas ir maksimālās dēdēšanas pakāpes piramīdas fasāžu malās, stūros, kā arī iepriekšēji aprakstīto lūzumu un plaisu zonu tuvumā ar maksimumiem šādu lūzumu krustošanās gadījumos. Šādas atkarības konstatētas visā piramīdā un pašlaik nevar tikt detalizētas, jo piramīdas fasādes tiek intensīvi tīrītas un visvairāk bojātie akmens bloki tiek aizvietoti ar jauniem.

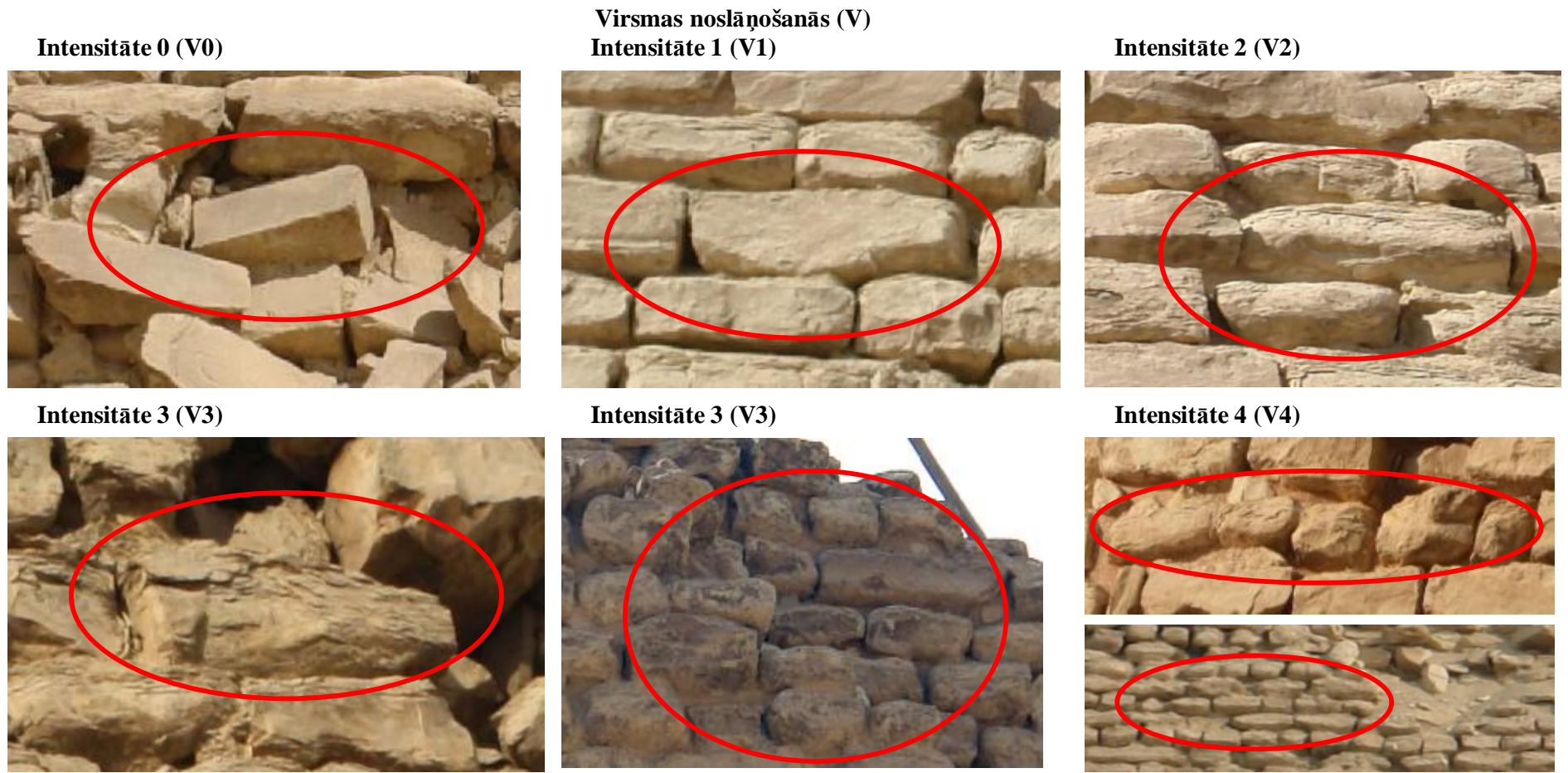
Tomēr iegūto datu vienkāršota statistiska analīze ļauj atpazīt arī vairākas citas likumsakarības. Pat neņemot vērā visai sarežģīto dēdējuma izvietojumu uz katras no fasādēm, to kopējā dēdēšanas skartā platība ir visai atšķirīga. Tā dienvidu fasādē būvakmens eksponētās virsmas noslāņošanās un materiāla zudums ir skāris 49,78% virsmas (1709,7 m<sup>2</sup>), 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>). 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.

Jau iepriekš tika minēts, ka visvairāk ir bojāta, tajā skaitā daudzo rekonstrukciju dēļ, tieši apakšējā jeb pirmā pakāpe, kurā virsmas noslāņošanās un materiāla zudums sasniedz 61,5% ziemeļu fasādē, bet vēl pirms dažiem gadiem daļēji ar smiltīm klātā rietumu fasādē – tikai 20,6%. Tādēļ formāli savstarpēji salīdzināt un novērtēt pirmo pakāpi nav lietderīgi, jo šādas salīdzinājums vairāk raksturo veikto rekonstrukciju kvalitāti, kā procesu nozīmīgumu. Diemžēl līdz šim šādas rekonstrukcijas nekad nav tikušas dokumentētas un nav zināms, kad kura fasādes daļa ir tikusi labota vai tikuši aizvietoti akmens bloki, kas izslēdz šeit veikt pamatotu dēdēšanas procesu attīstības ātruma izvērtējumu.



5.15. attēls. A. Džosera piramīdas fasāžu bloku virsmas dēdēšanas piemēru katalogs (Noapaļošanās).

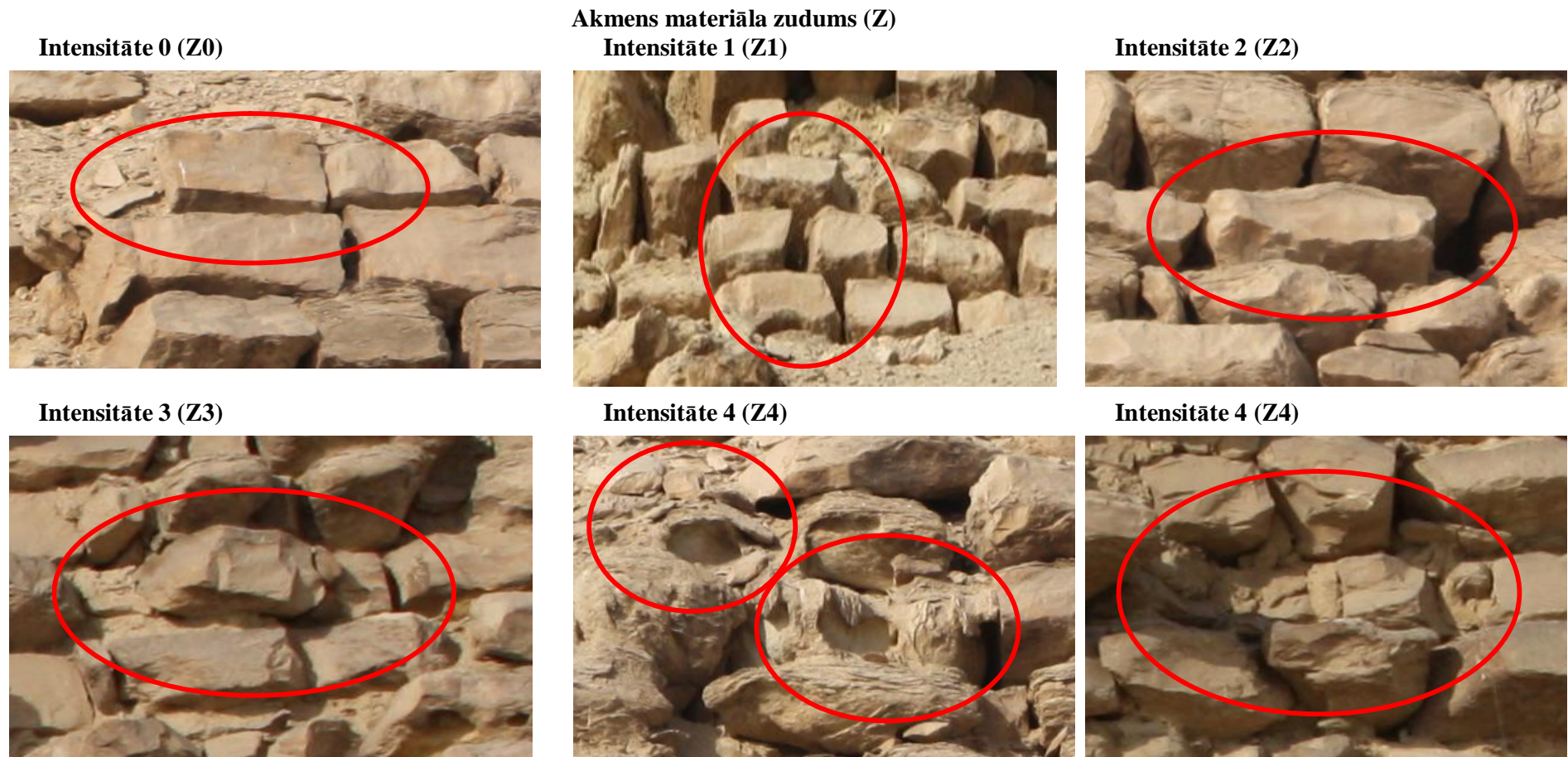
Figure 5.15. A. Catalogue of samples of stone block weathering on the facades of Djoser's Pyramid (Rounding (N)), designation of intensities from 0 to 4 (N0-N4).



5.15. attēls. B. Džosera piramīdas fasāžu bloku virsmas dēdēšanas piemēru katalogs (Virsmas noslāņošanās).

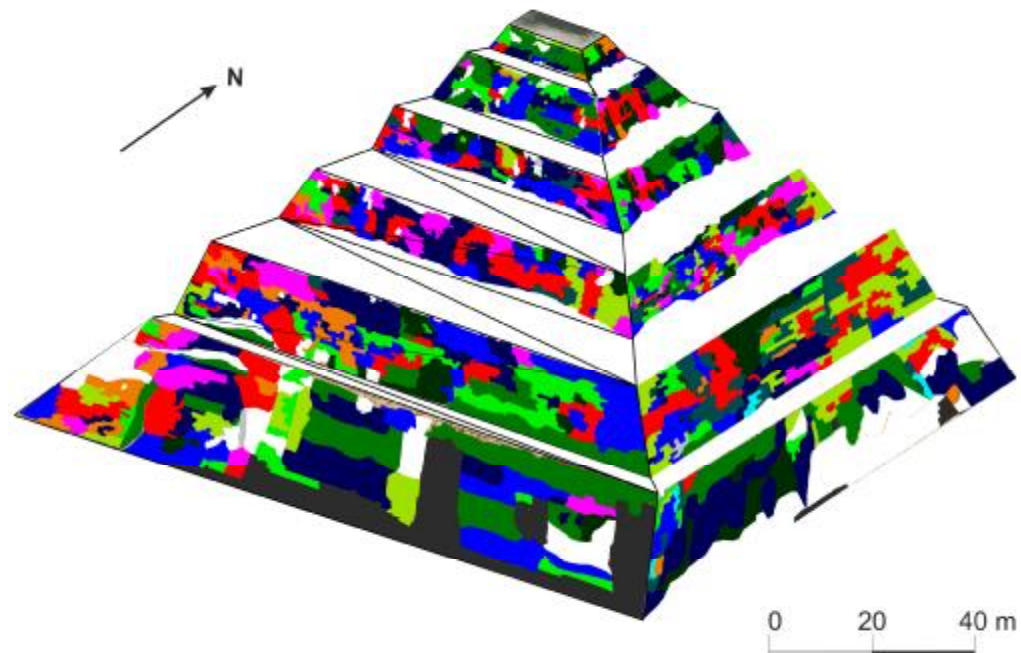
Figure 5.15. B. Catalogue of samples of stone block weathering on the facades of Djoser's Pyramid (Back weathering (V)), designation of intensities from 0 to 4 (V0-V4).





5.15. attēls. C. Džosera piramīdas fasāžu bloku virsmas dēdēšanas piemēru katalogs (Akmens materiāla zudums).

Figure 5.15. C. Catalogue of samples of stone block weathering on the facades of Djoser's Pyramid (Loss of stone material (Z)), designation of intensities from 0 to 4 (Z0-Z4).



Dēdēšanas veidi	Intensitāte 0	Intensitāte 1	Intensitāte 2	Intensitāte 3	Intensitāte 4
Noapaļošanās (N)					
Virsmas noslāņošanās (V)					
Akmens materiāla zudums (Z)					

5.16. attēls. Džosera piramīdas fasādēs konstatēto dēdēšanas veidu un intensitātes atspoguļojums piramīdas 3D modelī. Baltā krāsā atspoguļots nobiru slānis un neinterpretējamie laukumi.

Figure 5.16. Visualization of weathering types and their intensities on the facades of the Djoser's Pyramid on the 3D model. The scree layers are indicated in white. Weathering types – Rounding (N), Back weathering (V), Loss of stone material (Z); designation of intensities from 0 to 4.

Salīdzinoši informatīvāka ir atsevišķu piramīdas pakāpju dēdēšanas intensitātes un nozīmīguma izvērtēšana (5.3. tabula).

5.3. tabula. Akmens materiāla virsmas noslāņošanās un akmens materiāla zudums Džosera piramīdas fasādēs, procentos no fasādes virsmas laukuma

Table 5.3. Stone material surface detachment and loss of stone material on the facades of the Step Pyramid, percentage of the area of a facade

<b>Virsmas noslāņošanās un materiāla zuduma veidi (V, Z)</b>	<b>Dienvīdu fasāde, %</b>	<b>Austrumu fasāde, %</b>	<b>Ziemeļu fasāde, %</b>	<b>Rietumu fasāde, %</b>
1. pakāpe	42,45	30,18	61,51	20,55
2. pakāpe	60,34	60,31	55,91	50,81
3. pakāpe	59,82	70,00	57,90	62,50
4. pakāpe	41,41	73,69	60,64	70,38
5. pakāpe	50,89	69,23	53,13	95,12
6. pakāpe	70,87	67,21	50,72	100,00
<b>KOPĀ pa fasādi, %</b>	<b>49,78</b>	<b>50,36</b>	<b>58,69</b>	<b>39,96</b>

Šāds novērtējums ir ļoti efektīvs palīgīdzeklis ne tikai pētījumu plānošanai nākotnē, bet arī novērtējot nepieciešamos rekonstrukcijas darbu apjomu. Izceļams, ka šādus un citus papildus nepieciešamos statistiskos datus ir iespējams iepriekšēji noteiktā griezumā viegli aprēķināt pēc 3D ģeotelpiskā modeļa izveides Microstation vidē.

Papildus informāciju un zināšanas sniedz dēdēšanas intensitātes izpausmes, kas atspoguļo dēdēšanu kategorijās no „0”- dēdēšanas pazīmes uz bloka virsmas ir atpazīstamas līdz „4”- dēdēšanas pilnībā ir pārveidojusi eksponēto akmens virsmu un dziļi skārusi pašu materiālu (5.4. tabula). Šajā tabulā ir iekļauti dati ne tikai par iepriekšēji apskatītajiem (virsmas noslāņošanās un materiāla zudums) dēdēšanas veidiem, bet arī par akmens bloku noapaļošanas un tie atspoguļo summāros rādītājus.

5.4. tabula. Dēdēšanas intensitātes sadalījums pa piramīdas fasāžu virsmu, % no kopējās fasādes virsmas.

Table 5.4. Distribution of weathering intensities on the surface of the Step Pyramid, percentage of the area of a facade

<b>Dēdēšanas intensitāte</b>	<b>Dienvīdu fasāde, %</b>	<b>Austrumu fasāde, %</b>	<b>Ziemeļu fasāde, %</b>	<b>Rietumu fasāde, %</b>
0	0,20	0,23	0,11	2,15
1	8,11	12,35	16,57	18,23
2	18,86	24,25	22,23	15,87
3	35,82	19,24	29,13	15,63
4	17,93	27,07	16,32	12,59

Tabulā ievietotie 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 (Lauer, 1977). Tā ir veidota ne tik rūpīgi un par to papildus liecina ievērojams cementa masas zudums un tā salīdzinoši zemā kvalitāte.

Akmens materiāla, tajā skaitā būvēs izmantotā, dēdēšana ir dabisks process un tuksneša apstākļos Sakāras plato šāda parādība un tās sekas ir atpazīstamas visās būvēs un konstrukcijās (Papa, 2003). Viegli atpazīstama arī fiziskās dēdēšanas saistība ar dominējošiem vēju virzieniem un to apstiprina dēdēšanas atšķirības dažādās piramīdas fasādēs. Tomēr dēdēšanas intensitātes sadalījums norāda uz daudz sarežģītākām likumsakarībām, kas galvenokārt izriet no būvniecībā izmantotā akmens materiāla kvalitātes. Šajā nozīmē analizētie dēdēšanas veidu un intensitātes sadalījuma dati skaidri norāda uz piramīdas fasādē eksponētiem būvniecības posmiem, ko pastiprina izmantotā cementa kvalitātes atšķirības.

Pētījumā iegūtie materiāli daudzos aspektos nav interpretējami viennozīmīgi, jo faktiski ir veikta tikai metožu aprobācija un priekšizpēte un nākotnē būtu nepieciešami papildus pētījumi uz vietas pašā objektā, bet pamatotākai interpretācijai papildus ir nepieciešami pētījumi pašā piramīdā, ne tikai tās fasādēs.

Būves fasādes eksponētais akmens materiāls ir dēdējis un ir iespējams skaitliski novērtēt ne tikai dominējošos dēdēšanas veidus un intensitāti, bet arī to telpisko izvietojumu un saistību ar citiem vērtējamiem parametriem. Tā, uzskatāmi ir konstatēta materiāla dēdēšana saistība ar piramīdas būves izveides etapiem. Šādi izvērtējumi, kopā ar nepietiekoši apzinātu cementa materiālu īpašību izziņāšanu, būtu veicami pirms būvē tiek atjaunoti rekonstrukcijas darbi.

## 6. DISKUSIJA

Iepriekšējās nodaļās izklāstītais norāda uz vairākiem nozīmīgiem rezultātiem, kas var tikt interpretēti šaurākā kontekstā attiecībā uz konkrēto pētniecības priekšmetu (piemēram, būvkmens kvalitāte, saistvielas, būvkmens virsmas dēdēšanas veidi un intensitāte, kā arī ģeotelpiskā modeļa izveide). Tāpat, atsevišķie pētniecības priekšmeti var tikt interpretēti plašākā nozīmē un kontekstā kā ģeoloģisko zināšanu izmaiņu rezultāti Senajā valstī.

Pētījuma uzsākšanas fāzē kā līdzvērtīgas tika apskatītas divas galvenās hipotēzes par ģeoloģisko zināšanu būtiskas palielināšanās iemesliem. Var tikt pieņemts, ka jaunās zināšanas, kuras ļauj Senajā valstī uzsākt liela būvapjoma akmens būvju izveidi ir saistāmas ar svešu kultūru zināšanu pārņemšanu (tā saucamais „zināšanu imports”). Alternatīva hipotēze būtu pakāpeniska vietējo zināšanu papildināšana un uzkrāšana, līdz tās ļauj realizēt liela mēroga akmens būvju izveides projektus.

Sākotnēji pieņemtais par vienu iespējamo hipotēzi – svešu kultūru pārņemtās zināšanas - pētījuma gaitā tika apzināts kā atšķirīgu viedokļu kopums, kurus apvieno tikai divas pazīmes. Tās ir, „zināšanu imports” un to pielietojums akmens būvju izveidē, un faktisko liecību, datu un pārbaudāmu konstatējumu iztrūkums. Tomēr atzīmējams, ka Senajā valstī Ēģiptē objektīvi ļoti augsti sasniegumi ir konstatējami daudzās jomās, tādās kā materiālzinātne, būvniecība, arī arhitektūra, telpas plānošana, utml. (Lehner, 2004). Minētais daudziem pētniekiem ļāva izvirzīt atšķirīgas teorijas (Firth, Quibell, 1935; Lauer, 1962; Edwards, 1967) un pieņēmumus (David, 1997; Estep, 2008; Lockyer, 2010) starp kurām ir ne mazums tādu, kuras saukt par zinātniskām mūsdienās ir grūti (Schoch, 2004; Reece, 2006). Apskatot šīs hipotēzes un pieņēmumus, ir jāņem vērā, ka pašas būtiskākās izmaiņas akmens materiāla izmantošanā Senajā Ēģiptē ir aptvērušas vēsturiski īsu laika posmu, kas mērāms tikai gadu desmitos un tas ir nozīmīgs aspekts, kurš ir veicinājis daudzo teoriju attīstību (Lucas, 2003).

Vairumā gadījumu pētnieki norāda uz Senajā Ēģiptē veidotu būvju vizuālu līdzību ar piramidālām būvēm Senajā Mezopotāmijā (Kriwaczek, 2012), kuras savulaik tika datētas kā senākas par zināmajām Ēģiptē (skat., piemēram, Budge, 1907; Firth, Quibell, 1935). Tas veidotu loģisku kopainu, ja savulaik tiktu apstiprināta arī teorija par senēģiptiešu rakstības attīstību, pārņemot senākās ķīļrakstu alfabēta zīmes (Betro, 1996). Tomēr mūsdienās šīs hipotēzes nav apstiprinājušas iepriekšēji minētos pieņēmumus (Regulski, 2010), kā arī nereti izteiktās saiknes ar piramīdu būvniecību senajās kultūrās citos kontinentos (Osmanagi, 2012; Woods, Woods, 2011; Malkowski, 2010) nav uzskatāmas par pamatotām.

Vienlaicīgi atzīmējams, ka Senās valsts laikā Ēģipte nav izolēta un tā ir iesaistīta gan tirdzniecības maršrutos, gan ir atvērta arī kultūru mijiedarbībai (Kanawati, 1977; Forman, Malek, 1992, Jeffrey, 2011). Tomēr nav zināmi kādi zinātniski argumenti par seno zināšanu pārnešai akmens apstrādes un akmens būvju izveides jomā. Tas būtu arī visai neparasti, ņemot vērā, ka senākās akmens būves Senajā Ēģiptē ir saistītas ar mirušo kultūru, valdnieku kapenēm un to kultam veltītām būvēm (Shafer, 1997). Šādu sakrālo būvju izveide balstās uz daudzu gadu simtu senām tradīcijām, kā arī ļoti savdabīgo reliģisko kultūru 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).

Citi argumenti par labu vairākām atšķirīgām hipotēzēm izriet no tehniskām grūtībām ar tajā laikā pieejamajiem bronzas instrumentiem apstrādāt masīvus klintsbluķus un tiem piešķirt vēlamo formu (Isler, 2001; Stocks, 2003), kā arī nodrošināt pietiekami augstu darbu organizāciju, tai skaitā, materiālu piegādi būvniecības vajadzībām būvlaukumā. Tomēr mūsdienu arheoloģiskie pētījumi ir snieguši pietiekami pārliecinošus pierādījumus par seno akmens būvju amatnieku izmantotajiem instrumentiem un to atbilstību mērķim (Nicholson, Shaw, 2009), bet daudzos eksperimentos ir pārbaudīta šo seno darbarīku piemērotība akmens apstrādei būvniecības vajadzībām (Stocks, 2003).

Tomēr visi minētie pētnieki atzīmē, ka šāds akmeņkaļu un būvnieku darbs ir bijis tikai nedaudz mehanizēts, tas ir bijis smags un fiziski grūts. Tādēļ loģiski ir pieņemt, ka šāda mēroga būvēm Senajā Ēģiptē daudz racionālāk būtu šos būvniecībai nepieciešamos blokus izgatavot uz vietas no kaļķakmens drupinātas masas un kāda mūsdienās nezināma vienkārša polimēra. Šāda pieeja ģeopolimēra izgatavošanā būtu ļāvusi senajiem būvniekiem ļoti vienkārši nepieciešamo materiālu izgatavot tieši būvlaukumā vai pat piramīdas jau pabeigtās pakāpēs (Davidovits, Margie, 1991; Davidovits, 2009). Diemžēl šādu tehnoloģiju izmantošanas gadījumus vai izgatavotos izstrādājumus līdz šim nevienā pētījumā nav izdevies atpazīt, kas šo hipotēzi neļauj mums tālāk attīstīt. Vienlaicīgi atzīmējams, ka saistvielu izgatavošanā un to dažādošanā senie ēģiptieši jau bija sasnieguši diezgan augstu līmeni (Nicholson, Shaw, 2009; Kukela, Seglins, 2012a).

Atsevišķu Ēģiptes Senās valsts piramīdu un citu akmens būvju izveides hipotēžu grupu veido hipotēze par līdz šim nezināmu civilizāciju, nereti akcentējot ārpuszemes civilizāciju, kura nodevusi senajiem ēģiptiešiem zināšanas to realizācijai praksē. Šo hipotēžu autori kā jaunas īpašas zināšanas izceļ zināšanas ģeometrijā un arhitektūrā, būvmateriālu izvēlē, kā arī mūsdienās nezināmu spēju smagu bloku pārvietošanai (Knight, Butler, 2011; Dunn, 2010; Childress, 1999, Pye, Dalley, 2011). Diemžēl šie darbi ir ļoti vispārīgi un tajos netiek precizēts tieši kādas materiālzinātnes un ģeoloģijas zināšanas ir tikušas nodotas, tādēļ mūsu pētījumā šī hipotēžu grupu detalizētāk netiek apskatīta.

Minētais norāda, ka pamatotāka ir ģeoloģisko un akmens materiāla apstrādes zināšanu pakāpeniska uzkrāšana un attīstība pašā Ēģiptē, kas atspoguļojas akmens materiāla izmantošanā būvniecībā. Tomēr plašākā vēsturiskā skatījumā vienkāršāko ģeoloģisko novērojumu, lietišķo zināšanu un to pielietojuma pirmsākumi nav zināmi un, iespējams, tie ir saistīti ar pašiem senākajiem aizvēstures posmiem. Tas ir laika posms, kas ir aptvēris vairākus simtus tūkstošu gadu un, kurā radās pirmās būtiskās izmaiņas cilvēku izmantotajā akmens materiālā.

Materiālu noderīgo īpašību izmantošana iezīmē neolīta jeb jaunākā akmens laikmeta posmu, kurā tiek apgūta gan keramikas izstrādājumu apdedzināšana, gan arī akmens būvju veidošana (Wenke, 2009). Senajā Ēģiptē šis ir Nāgādas kultūru laiks, kurā blakus iepriekšēji minētām pazīmēm raksturīga ir pastāvīgu ciematu veidošana, māju akmens pamatu izveide, ciematu norobežošana no ārpusē ar krautiem akmens žogiem, kā arī okera ieguve dažādām sadzīves un reliģiskā kultū vajadzībām.

Nākamajā vēsturiskajā posmā jaunākās ģeoloģisko zināšanu inovācijas ir māla kleķa ķieģeļu izgatavošanas ieviešana. Tas ir svarīgs būvmateriāls Ēģiptē arī mūsdienās, apliecinot seno zināšanu augstu dzīvotspēju un izstrādājumu piemērotību vietējiem apstākļiem, kas arī mūsdienu globalizētā saimnieciskajā pasaulē ļauj sekmīgi konkurēt ar mūsdienīgiem būvmateriāliem. Šī būvmateriāla izgatavošanai nepieciešamo izejvielu kvalitāte šajā laikā ievērojami uzlabojas, kas norāda uz pieaugošām produkta

izgatavošanas tehnoloģiskām prasmēm, kā arī zināšanām atrast noteiktas kvalitātes izejvielas. Vēl vairāk minētais attiecināms uz keramikas izgatavošanu, kas laika posmā pirms Senās valsts ir sasniegusi ievērojamus panākumus ne tikai plaši izmantojot podnieka ripu, bet arī sakarā ar prasmi izgatavot atšķirīgas formas un dažādiem lietojuma mērķiem specializētus traukus. Svarīgi, ka to izgatavošanai ir nepieciešamas netradicionālas izejvielas – noteiktas kvalitātes aleirītiski māli un kvalitatīvi liesinātāji (mazgātas smiltis, terakota, drupināti gliemežvāki un dažādi to maisījumi). Ir jāņem vērā, ka keramikas trauku izgatavošana šajā laikā ir visai ievērojami mērogi, kas mērāmi miljonos izstrādājumu gadā un šādas ražošanas nodrošināšanai ir nepieciešami apjomīgi atbilstošas kvalitātes izejvielu meklēšanas un izpētes darbi (Kukela, Seglins, 2011d).

Mūsu rīcībā nav kādu konkrētu faktu vai liecību, kas apliecinātu šādu specializēto ģeoloģisko pētījumu realizācijas metodikas un procedūras, vai arī izejvielu kvalitātes pārbaudes, tomēr nelielais keramikas trauku ražošanas brāķa daudzums norāda uz atrasto un piegādāto izejvielu augsto kvalitāti. Tomēr šī kvalitāte tika sasniegta ļoti daudzu gadu simtu laikā un tās izmaiņas mūsdienās tiek izmantotas senās kultūras attīstības periodizācijai (Petrie, 1891; Hawass, Senussi, 2008).

Atšķirībā no keramikas izstrādājumu izgatavošanai nepieciešamajām izejvielām, noteiktas kvalitātes akmens būvmateriālu pētījumi tiek uzsākti daudz vēlāk. Cik tālu tas ir zināms, pirmoreiz šāda veida pētījumi tika veikti Džosera piramīdas izveidei Senās valsts laikā. Ir pamats domāt, ka tieši lietīšķās prasmes un zināšanas keramikas ražošanai nepieciešamo izejvielu meklēšanā un izpētē, kalpoja par pamatu būvkmens un noteiktas kvalitātes kaļķakmens meklēšanai un materiāla kvalitātes izvērtēšanai.

Konkrētu analītisku pētījumu datu par valdnieka Džosera piramīdas būvniecībā izmantoto akmens materiālu nav daudz (Firth, Quibell, 1935; Lauer, 1962; Edwards, 1967; Baud, 2002; Verner, 2004; Lehner, 2004). Arī iežu nosaukumi dažādās publikācijās ir atšķirīgi un variē no kaļķa līdz kramveida kaļķakmeņiem un dolomītiem, no „balta akmens” līdz „dažādiem apkārtņē zināmiem akmeņiem”. Pirmo plašāko ieskatu sniedz D. un R. Klemmu 2010.gadā publicētais pārskata pētījums par Senās Ēģiptes piramīdu būvniecībā izmantoto būvakmeni (Klemm, Klemm, 2010). Šajā pētījumā ir sniegts atsevišķu piramīdā izmantoto kaļķakmens paraugu petrogrāfiskais apraksts un realizēta šo paraugu plazmas spektroskopiskā analīze, kā arī ar neitronu aktivācijas analīzes palīdzību noteikta ķīmisko elementu Na, Rb, Sr, Ba, Cr, Fe, Co, Sc, La, Ce un Eu saturu interpretācija. Minētajā pētījumā norādīts, ka ir tikuši paņemti 67 kaļķakmens paraugi no piramīdas būves. Diemžēl publikācijā nav pievienoti konkrēti iegūto analīžu rezultāti un ir interpretētas tikai proporcijas Mg/Fe, Mg/Sr, Fe/Mn, kas ļauj autoriem nonākt pie diviem nozīmīgiem secinājumiem par būvniecībā izmantotā materiāla vietējo izcelsmi (šauri lokālā nozīmē no Sakāras plato) un atšķirīgu ķīmisko elementu proporcijām analizētos paraugos (kas kopā ar petrogrāfisko analīzi ļauj izdalīt divus kaļķakmeņu paveidus – ar seno organismu paliekām bagātu mikrītisku kaļķakmeni un ar māla daļiņā bagātāku mergēlainu kaļķakmeni). Vienlaicīgi ir atzīmējama šo pētījumu augstā analītiskā kvalitāte un pētījumu rezultātu pieejamība, kas ir retums piramīdu pētniecības vēsturē.

Tajā pašā laikā līdzšinēji veiktie pētījumi nav vērtējuši vai pat atzīmējuši atšķirīgo būvkmens kvalitāti pašā valdnieka Džosera piramīdas būvē, lai gan par tās izveides vairākām stadijām vai posmiem ir zināms jau kopš 19.gadsimta 40-tajiem gadiem (Perring, 1839). Autora veiktais pētījums apstiprina iepriekšējo pētnieku norādītos būvniecības posmus, bet skaidri norāda arī uz izmantotā būvkmens atšķirīgo

kvalitāti (Kukela, Seglins, 2012e). Piramīdas būvniecības veids viennozīmīgi norāda uz būvkmens vietējo izcelsmi, ko apstiprina D. un R. Klemm (2010) pētījums, un izceļ materiāla kvalitātes atšķirības kā seno būvnieku zināšanu izmaiņas par materiāliem un ģeoloģiskiem apstākļiem, kas ļāva būvniecības gaitā būtiski paaugstināt akmens materiāla izvēlei izvirzītās prasības. Diemžēl šajā nozīmē neviens no līdzšinējiem pētījumiem, tai skaitā, D. un R. Klemm (2010) pētījums, nav pietiekoši detalizēts un kvalitatīvs, jo nesatur norādes uz paraugu noņemšanas vietām un to atbilstību tam vai citam būvniecības posmam. Līdz ar to šie dati nākotnē būtu vērtējami vien kā informatīvi.

Minētajā pētījumā (Klemm, Klemm, 2010) norādīts, ka divi kaļķakmens paraugi ir ņemti arī no Sakāras plato kraujas austrumu nogāzes sienas (dabiska atseguma), kur visdrīzāk arī ir ticis iegūts Džosera piramīdas izbūvei nepieciešamais būvmateriāls. Blakus kvalitatīvi veiktajai petrogrāfiskai analīzei šajā publikācijā nav norādīta precīza paraugu noņemšanas vieta, kas apgrūtinā šo datu turpmāku izmantošanu. Jo vairāk, kā atzīmēts pētījumā (Kukela, Seglins, 2012e), Sakāras plato vidējā miocēna augšējās daļas litoloģiskajā griezumā ir vērojama izteikti ritmiska uzbūve ar tai raksturīgu slāņmiju. No piramīdas būvniecībai piemērota būvkmens izvēles viedokļa, minētajā slāņmijā pati nozīmīgākā ir masīvā kaļķakmens slāņa daļa, bet tā (kaļķakmens) mehāniskā izturība un dabiskā plaisainība ģeoloģiskajā griezumā ir visai mainīga. Diemžēl D. un R. Klemm pētījums (2010) nesatur nekādas norādes par detalizēti pētīto kaļķakmens paraugu noņemšanas vietu piesaisti pie ģeoloģiskā griezuma un tādēļ šo analīžu vērtība nav augsta un var tikt izmantota tikai vispārīgam raksturojumam. Tomēr ir atzīmējama minētā pārskata pētījuma vēl viena pozitīvā iezīme – tajā ir apkopoti visi pieejamie bibliogrāfiskie dati par iepriekšējos gados veiktiem piramīdu būvniecībā izmantotā akmens materiāla pētījumiem.

Iepriekšēji norādītās nepilnības un ierobežojumi būtiski veicināja autora oriģinālos pētījumus par piramīdas fasādēs eksponēto būvbloku virsmu bojājumu un dēdējumu novērtēšanu. Līdzīgas metodes savulaik tika pielietotas Gīzas plato valdnieka Hufu piramīdas dienvidu fasādes neliela fragmenta dēdēšanas veidu un to intensitātes novērtēšanai, tajā skaitā, veicot instrumentālus mehāniskās izturības mērījumus, kas tika papildināti ar izmantotā būvkmens paraugu petrogrāfiskām un ķīmiskām analīzēm (Fitzner *et al.*, 2002). Šis pētījums ir ļoti izvērstis un detalizēts, kā rezultātā iegūtie dati joprojām tiek izmantoti atsaucēm jaunākos pētījumos. Tas kļuva par nozīmīgu daļu B. Ficnera un līdzautoru (2002) izstrādātā dēdēšanas pazīmju klasifikatorā izmantošanai kultūrvēstures pieminekļu izpētei. Diemžēl iegūtā klasifikācija, pretendējot kļūt par visaptverošu, ir ļoti sarežģīta, tā izmantojama tikai ar izvērstiem instrumentāliem un laboratoriskiem pētījumiem un, rezultātā, ir ārkārtīgi darbietilpīga un dārga. Šo iemeslu dēļ šī klasifikācija mūsdienās vairs netiek izmantota.

Promocijas darbā veiktie pētījumi norāda (Kukela, Seglins, 2011b), ka pastāv iespēja šo pieeju būtiski uzlabot attiecībā uz pētītajiem Senās valsts pieminekļiem Sakāras un Gīzas plato, loģiskā secībā sakārtojot dēdēšanas pazīmes un intensitāti, ierobežojot pazīmju un kategoriju skaitu tiktāl, līdz to diagnostikai nav nepieciešams destruktīvu metožu pielietojums. 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 analītisko (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 turpmāk šāda veida datus ļauj ar statistiski noteiktu ticamības pakāpi izmantot dažādiem ģeoarheoloģiskiem un akmens pieminekļu saglabāšanas un restaurācijas projektu aprēķiniem Ēģiptē un teritorijās ar līdzīgiem fiziogeoģrāfiskiem apstākļiem. Savukārt, promocijas darbā iepriekšēji apskatītā metodika sniedza ļoti svarīgu informāciju attiecībā uz valdnieka Džosera piramīdas pēdējā izbūves posmā izmantotā būvkmens kvalitāti, tās būtiskām izmaiņām pat vienas būvniecības stadijas laikā.

Metodes izmantošana joprojām ir ļoti darbietilpīga un līdzšinējie mēģinājumi to automatizēt nav bijuši sekmīgi, tomēr arī iegūtie rezultāti, jo īpaši, kad tie ir iestrādāti piramīdas ģeotelpiskajā modelī, ir ļoti informatīvi un ļauj izdarīt vairākus nozīmīgus secinājumus.

Ņemot 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 tos izvest no valsts detalizētiem ģeoloģiskiem pētījumiem. Pēdējo gadu laikā šis aizliegums attiecas arī uz ģeoloģisko griezumņu aprakstiem un atsegumu dokumentāciju ārpus oficiālo starpvaldību sadarbības programmu ietvariem. 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 modelī 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 iepriekšēji izdalītos piramīdas būvniecības posmus un izvērsti vērtēt jaunākajā būvniecības posmā izmantotā materiāla kvalitāti, kas ne tikai ļoti skaidri ļauj izsekot izvēlēta materiāla kvalitātei, bet 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 izmantotas, tām ir sulfātcementa sastāvs, bet detalizēti pētījumu rezultāti līdz šim nav tikuši publicēti. Vairums pētnieku norāda uz saistvielu līdzībām visās Senās valsts laikā būvētajām piramīdām, bet ķīmiskā sastāva analīzes ir veiktas tikai dažiem paraugiem (Lucas, 1948; Salmoni, 1933). Promocijas darba pētījums norāda, ka piramīdas būvniecības gaitā ir tikušas izmantotas dažāda sastāva saistvielas (Kukela, Seglins, 2012a), tās ir pilnveidotas būvniecības gaitā un atšķiras savā starpā, secīgi raksturojot piramīdas izveides galvenos posmus. Pierādīts, ka saistvielu sastāva (kompozīcijas) atšķirības ir tieši korelatīvas ar fotodokumentācijā diagnosticējamajām cementa dēdēšanas un zuduma pazīmēm. Minētais ļāva izstrādāt cementa materiāla dēdēšanas pazīmju klasifikatoru konkrētam piemineklim (Kukela, Seglins, 2012a) un iegūtie rezultāti ļauj cerēt, ka to pilnveidojot, var tik attīstīta pietiekami jutīga un augsti efektīva pieminekļu saglabātības novērtēšanas metodika. Pašreiz šī metodika ir piemērota tikai Senās valsts pieminekļiem, kas atrodas Sakāras un daļēji arī Gīzas plato, bet turpmākai metodikas attīstībai ir nepieciešami nozīmīgi saistvielu analītiski pētījumi senajos pieminekļos.

Iepriekšēji norādītais attiecas, galvenokārt, tikai uz pētījuma galvenā objekta – valdnieka Džosera piramīdas detalizētu izpēti. Šajā nozīmē 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 ir ievērojami mazāk mainīgas, un kopumā atspoguļo to zināšanu kopumu, kas tika iegūts jau Džosera piramīdas izveides gaitā.

Turpmākajos Senās valsts būvniecības objektu attīstības posmos, par kuriem uzskatāmi liecina piramīdas Dašūrā un Gīzas plato, tiek pilnveidota plānošana un būvju arhitektūra, būvmateriālu piegādēm tiek veidoti īpaši, konkrētu piramīdu būvniecībai izveidoti karjeri, kas ļauj iegūt daudz lielāku izmēru un augstākas kvalitātes kaļķakmens blokus. Tāpat pilnveidojas saistvielu sastāvs, kā arī aizvien lielāka nozīme tiek piešķirta no Asuānas un citām vietām Nīlas augštecē piegādāto granīta apdares plātņu un atbildīgāko nesošo konstrukciju izveidei nepieciešamajiem būvblokiem.

Tādējādi pētījuma rezultāti kopumā ļauj Senās valsts laikā izsekot ģeoloģisko zināšanu uzkrāšanu un izmantošanas loka paplašināšanos. Plašākā kontekstā tas ir apskatīts (Kukela, Seglins, 2011d) attiecībā uz dabas resursu izmantošanu Senajā Ēģiptē, kur raksturotas līdzīgas likumsakarības arī attiecībā uz Nīlas ūdens, dūņu un smilšu izmantošanu, sāls un sodas meklēšanu un izmantošanu, kā arī ļoti būtiskiem panākumiem un sasniegumiem pusdārgakmeņu, zelta un sudraba rūdu atklāšanā un šo zināšanu izmantošanā.

Tajā pašā laikā, mūsdienu skatījumā šīs zināšanas ir izteikti lietišķas un mērķtiecīgi tika attīstītas un pilnveidotas augsti centralizēti pārvaldītas valsts būvniecības pasūtījumu realizācijai. Tādēļ Senās valsts laikā ir atpazīstami vairāki zemes dzīļu resursu un eksogēno procesu izziņāšanas nozīmīgi ierobežojumi. Attiecībā uz zemes dzīlēm ģeoloģiskās zināšanas tiek izmantotas tikai iekšējam patēriņam valsts iekšienē un pat dārgās sāls un sodas eksporta apjomi šajā laikā ir ļoti nenozīmīgi (Wenke, 2009). Arī zināšanas par akmens materiālu īpašībām, lētu būvmateriālu un saistvielu nozīmi netiek pārnestas uz daudzu tempļu, valdnieka galma un bagātnieku māju izbūvi, tās joprojām tiek būvētas no tradicionāliem kleķa ķieģeļiem. Šajā jomā izmaiņas zināmas daudz vēlākā vēsturiskajā posmā - tikai Vidējās valsts laikā. Iespējams, ka minētajās īpatnībās nozīmīga loma ir bijusi reliģiskajiem priekšstatiem, kas šāda veida būves pielāva veidot tikai valdnieka kapeņu vajadzībām

Joprojām nezināmu iemeslu dēļ Senās valsts laikā ļoti vāji tiek apzināti eksogēnie ģeoloģiskie procesi, tajā skaitā, erozijas un sedimentācijas procesi, nogāžu noslīdēšana, nobrukumi un tamlīdzīgi, lai gan tie ir ļoti plaši attīstīti un ne reizi vien ir izraisījuši saimnieciskas problēmas (nogrūvumi karjeros, tuksnešu ekspansija nekropolēs, pilsētu vai to daļu noskalošana Nīlas krastos, utt.). Atzīmējamas arī vājās zināšanas par gruntīm un to īpašībām, jo būvlaukumu iepriekšējā sagatavošana un atbrīvošana no augšējās mainīgā sastāva grunts slāņa Sakāras un Gīzas nekropoles būvēs tiek ieviesta tikai Senās valsts noslēguma posmā (Kukela, Seglins, 2011d).

Reliģisko priekšstatu jaukšana ar priekšstatiem par pazemes ūdens pārvietošanos un saistību ar ūdeņiem upēs un ezeros būtu jāmin kā vājas un savam vēsturiskajam laikam nepietiekošas ģeoloģiskas zināšanas. Līdzīgs apgalvojums attiecas arī uz novērojumiem un priekšstatiem par zemestrīcēm, kas Ēģiptē ir parasta parādība (gandrīz katru gadu ir novērojama vismaz viena zemestrīce ar magnitūdu, kas pārsniedz 6 balles), tomēr nevienā no Senās valsts laika būvēm konstruktīvi nav tikuši iestrādāti kādi tehniskie risinājumi zemestrīču ietekmes mazināšanai uz būvju stabilitāti.

Veiktais pētījums norāda, ka ģeoloģiskās zināšanas Senās valsts laikā ir nozīmīgi palielinājušās, tomēr nav pamata tās pārspīlēt. Kopumā, tās drīzāk būtu saucamas par augstām profesionālām prasmēm, pieredzi un zināšanām, kas tika nodotas no paaudzes uz paaudzi. Tas ir tradicionāls zināšanu pārnese veids, kas zināms ne tikai Senajā Ēģiptē, bet ļoti daudzos pasaules reģionos un arī mūsdienās (Nicholson, Shaw, 2009)

Tomēr ģeoloģisko zināšanu nesējiem – amatniekiem, noderīgu būvkmens meklētāju un citu zemes dzīļu pazinējiem Senajā valstī nav bijis kādu īpašu privilēģiju vai tiesību. Arī starp dažādiem valsts pārvaldes amatpersonu, galma un bagātnieku tituliem līdz šim nav zināms neviens, kas norādītu uz šo darbības jomu īpašu izdalīšanu vai kādu to īpašo nozīmi. Pirmie šādi tituli ir zināmi tikai Jaunās valsts laikā (Harrell, Brown, 1992), bet Valdnieku ielejai blakus esošajā Amatnieku ielejā joprojām nav zināmas nevienas kapenes, kas piederētu zemes dzīļu zinātājam (David, 1986).

Vienlaicīgi atzīmējams, ka no veiktā pētījuma izriet vairāki blakus secinājumi, kas ir loģiski, bet nav tieši pierādāmi konkrētā pētījuma ietvaros. Svarīgākie no minētiem secinājumiem izriet no akmens materiāla izmantošanas intensitātes pieauguma ļoti īsā vēsturiskā laika posmā, kad atsevišķu amatnieku iepriekšējās pakāpeniski uzkrātās zināšanas tiek apkopotas savulaik lielākās sakrālās būves izveidei. Šāda zināšanu pārnese nenoliedzami atspoguļo Senās valsts pārvaldes augsto centralizācijas pakāpi, daudzlīmeņu darba organizāciju un vadību lielajās būvēs. Šādu būvju izveidei ir nepieciešama ievērojama finanšu un materiālu resursu koncentrācija, augsti kvalificēta darbaspēka piesaiste un mobilizācija (Shaw, 2003; Kukela, Seglins, 2012e). Tomēr līdzšinējie piramīdu būvniecības organizācijas jautājumi nav tikuši attiecināti arī uz tādām jomām kā būvniecībai nepieciešamo materiālu meklēšanu, to ieguvī un sagatavošanu izmantošanai konkrētām būvniecības vajadzībām. Džosera piramīdas izveides posmu analīze (5.3. - 5.5. apakšnodaļas) norāda, ka pieaugošās ģeoloģiskās zināšanas un iespējas izvēlēties noteiktas kvalitātes būvkmens ir veicinājušas būves vairākkārtīgu pārbūvi līdz tā ieguvusi mūsdienās zināmo izskatu.

Kopumā, mūsu veiktie pētījumi Ēģiptē 2007. - 2011. gadā, vairākkārtīgi veicot lauka mērījumus un novērojumus piramīdu kompleksos Sakārā un Gīzā, kā arī citās Senās Ēģiptes akmens būvju atrašanās vietās, nav ļāvuši konstatēt nekādus pierādījumus iepriekšēji raksturotām hipotēzēm par akmens izmantošanas zināšanu pārņemšanu no citām senām kultūrām. Minētais ļauj autoram pieturēties pie pakāpenisku zināšanu uzkrāšanas un izmaiņu hipotēzes (Kukela, Seglins, 2012e), kuras pierādīšanai bija nepieciešams izstrādāt vairākas netiešās novērtējumu metodes un pētījuma rezultātus integrēt vienotā priekšstatu sistēmā. Veiktais pētījums, tajā skaitā, detalizētas literatūras studijas un pētījumi Sakāras plato kopumā liecina, ka zināšanas ir tikušas uzkrātas Senās Ēģiptes teritorijā, zināšanu papildināšana ir bijusi pakāpeniska, un to apliecina daudzi jauniegūtie pierādījumi. Atsevišķo eksperimentālo pētījumu, kā arī datu apstrādes un interpretācijas rezultāti tika apskatīti iepriekšējās nodaļās. Promocijas darba mērķa sasniegšanai kā svarīgākie rezultāti ir atzīmējami nedestruktīvu augstas izšķirtspējas metodīku attīstība un pilnveide konkrētajos pētījuma apstākļos.

Jaunās metodes ļāva skaidri identificēt piramīdas būvniecības dažādos posmus un raksturot tos pēc:

- izmantotā būvmateriāla cilmes, izvēles, sākotnējās akmens materiāla kvalitātes, būvbloku pirmapstrādes un virsmas apstrādes, kā arī izmantoto būvbloku izmēriem (Kukela, Seglins, 2012e);
- izmantotās saistvielas kompozīcijas (sastāva galvenajiem elementiem) un izmantotā saistvielu daudzuma (Kukela, Seglins, 2012a);
- būvbloku eksponētās virsmas dēdēšanas veidiem un intensitātes, kas tiek interpretēta kā būvbloku akmens materiāla kvalitāte (Kukela, Seglins, 2011c, 2012c).

Iepriekšēji minētās pazīmes un to identifikācija ir aprobētas vairākās anonīmi recenzētas starptautiskās publikācijās. Par iegūtajiem rezultātiem ir ziņots starptautiskās un vietējās zinātniskajās konferencēs, kas ļāva nozīmīgi paaugstināt prasības pret

iegūto datu interpretācijas ticamību un pētījumā iegūto novērtējumu atkārtojamību. Tā rezultātā ievērojami pamatotāki ir rezultāti, kas apliecina ģeoloģisko zināšanu pakāpenisku papildināšanu un attīstību Senajā valstī.

Kā ļoti nozīmīgs pētījuma rezultāts izceļams mēģinājums izveidot piramīdas ģeotelpisko modeli, kas visai ierobežotas datu un mērījumu pieejamības apstākļos bija tehniski sarežģīts uzdevums. Izveidotais piramīdas ģeotelpiskais modelis dod iespēju integrēt tajā dažāda veida datus – gan skaitliskus, gan vizuālus, gan arī teksta informāciju. Tāpat šajā modelī var apkopot atšķirīgas kvalitātes pētījumus, kas veikti dažādos vēsturiskos periodos un dažādus atsevišķus novērojumus. GIS vide, kurā modelis ir izstrādāts, dod iespēju veidot specializētās datu bāzes, kuras ir izmantojamas dažāda veida pētījumu vajadzībām (Kukela, Seglins, 2010; Seglins *et al.*, 2011; Kukela, Seglins, 2011a).

Izstrādātais 3D modelis pēc būtības var kļūt par informācijas arhīvu un portālu, kā arī ir pietiekami elastīgs un ļauj precizēt modeļa ģeometriskos parametrus, kad šādi dati kļūs pieejami nākotnē.

## SECINĀJUMI

Ēģiptes Senās valsts vēsturiskais posms (2686.-2160.g. p.m.ē.) promocijas darbā apskatīts, pētot un izvērtējot akmens materiāla izmantošanu būvniecībā, analīzei izceļot būvmateriāla izmantošanas aizsākumus un attīstību. Uzsākot pētījumu, tika iecerēts, ka tas ļaus novērtēt ģeoloģisko zināšanu izmaiņas apskatāmajā straujo pārmaiņu laikmetā, kura raksturīgākā iezīme ir māla kleķu ķieģeļu sakrālo būvju vietā izbūvēt senāko līdz šim zināmo akmens bloku būvi pasaulē – valdnieka Džosera pakāpju piramīdu. Mūsdienās tas ir UNESCO Pasaules kultūrvēstures mantojuma piemineklis ar ļoti ierobežotu pieeju un aizliegumiem pieminekli veikt pētījumus *in situ*. Tādēļ pētījums tika veikts daudzpusīgi, kas ļāva attīstīt un pilnveidot pētniecības metodes un paņēmienus, kā arī to kompleksas analīzes un rezultātu prezentācijas veidus. Pētījums kopumā ļāva sasniegt izvirzīto mērķi un izdarīt vairākus nozīmīgus secinājumus. Iespējams, kā svarīgākie un paliekošākie ir tieši metodiskas ievirzes risinājumi, kas ļāva gūt pietiekošus pierādījumus vispārīgo secinājumu izdarīšanai. Zemāk ir izklāstīti nozīmīgākie pētījuma secinājumi.

Pētījumā iegūtie dati un to daudzpusīga analīze norāda, ka ģeoloģiskās zināšanas Senās valsts laikā Ēģiptē ir tikušas uzkrātas un papildinātas pakāpeniski ilgstošā laika posmā. Tās ir vietēji apgūtas zināšanas un prasmes, bet hipotēzēm par ģeoloģisko zināšanu pārņemšanu no citām senajām kultūrām nav atrasti pierādījumi un pamats tās nākotnē attīstīt.

Džosera piramīdas būvniecībā izmantotie materiāli un to kvalitāte skaidri norāda uz ģeoloģisko zināšanu par būvmateriālu dabiskām izejvielām pieaugumu būvniecības gaitā. Tā ir zināšanu pārmantojamība – iepriekšējos vēsturiskajos periodos uzkrātās zināšanas un prasmes citu dabisko izejvielu (smilts, māls, sāls, soda, u.c.) meklēšanā, apzināšanā un izpētē Senās valsts laikā tiek pielāgotas un attīstītas akmens materiāla piegādēm lielāko sakrālo būvju vajadzībām.

Pētījums valdnieka Džosera piramīdas fasādēs ļauj droši atpazīt vairākus būves izveides posmus, kurus raksturo ne tikai kapeņu arhitektoniskās formas. Katram posmam ir raksturīgs būvākmeņu izveides veids, bloku apdare, kā arī būvniecībā izmantotās saistvielas. Norādītās atšķirības ir konstatējamas un salīdzinoši novērtējamas pēc šo būvniecībā izmantoto materiālu dēdēšanas veidiem un dēdēšanas intensitātes. Tā, pēc savas saglabātības Džosera piramīdas 3., un jo īpaši 4.pakāpe, būtiski atšķiras no pārējām piramīdas pakāpēm. Tieši šajās pakāpēs ir konstatējami visi dēdēšanas veidi un visas to intensitātes. Visi šajās pakāpēs interpretētie atsevišķu dēdēšanas veidu un to intensitātes laukumi ir nelieli, tiem ir mozaīkas veida izkārtojums, kas neveido kādu noteiktu likumsakarību, izņemot pakāpes centrālās daļas akmens materiālu, kas ir dēdējis intensīvāk, nekā pakāpes malās esošais materiāls. Pieminekļa saglabāšanas skatījumā tieši šīm pakāpēm būtu veicami pētījumi ar augstāku detalizāciju.

Novērtējot piramīdas ģeotelpiskajā modelī attēloto dēdēšanu pēc maksimālās tās izpausmes intensitātes (visu identificēto dēdēšanas veidu 4. intensitātes pakāpe), tika konstatēts, ka 1., 2., 5. un 6. piramīdas pakāpes (skaitot no piramīdas pamatnes) ir veidotas no līdzīgas kvalitātes materiāla. Tas apstiprinās arī gadījumā, ja novērtējumam tiek pievienota arī dažādu dēdēšanas veidu 3. intensitātes pakāpe. Dominējošs dēdēšanas veids ir akmens bloku noapaļošanās un akmens materiāla zudums. Piramīdas 3. un 4. pakāpju celtniecībā izmantotais materiāls ir atšķirīgs - šeit dēdēšanas veidi un

to intensitātes ir ļoti dažādi un skar nelielus laukumus, kas norāda uz atšķirīgas kvalitātes būvmateriālu.

Dēdēšanas intensitātes pastiprināšanās un lokalizācijas faktors ir saistība ar būves plaisām, t.i., lielāka dēdēšanas intensitāte ir plaisu blīvuma zonās un vietās, kur plaisas krustojas, zarojas vai atrodas tuvu viena otrai. Plaisu analīze norāda, ka piramīdas pakāpju centrālajā daļā ir izmantots zemākas kvalitātes akmens materiāls, bet pakāpju sānu malās – augstākas kvalitātes materiāls, tomēr ne tik noturīgs pret plaisainību.

Akcentējams, ka būtiska nozīme ir akmens būvbloku cementējošai vielai. Diemžēl Džosera piramīdā tā nav bijusi pietiekami izturīga, līdz ar to šis faktors arī ir ietekmējis akmens bloku noturību. Veiktais pētījums norāda, ka cementa 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. Tas ir realizēts datorprogrammas MicroStation V8i vidē un ļauj atsevišķo akmens materiālu pētījumu rezultātus atspoguļot telpiski. Šādi sagatavotie informācijas slāņi ļauj izdarīt būtiskus secinājumus par piramīdas būvniecības gaitu, izmantotā būvakmens kvalitāti, kā arī apzināt piramīdas fasāžu bojājumus. Ir izstrādātas procedūras šādu pētījumu realizācijai citos nozīmīgos kultūrvēstures objektos, kuriem ir nepieciešams veikt augstas precizitātes rekonstrukcijas darbus.

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 esošā stāvokļa metožu attīstībā, un tas nepārprotami norāda uz to, ka šajā virzienā pētījumi ir jāturpina arī nākotnē.

## IZMANTOTĀ LITERATŪRA

### Publicētā

- Aboushook, M.I., Park, H.D., Mazen, S.O., El- Sohby, M.A., 2006. Determination of the durability of some Egyptian monument stones using digital image analysis. In Chulshaw, M.G., Reeves, H.J., Jefferson, I., Spink T.W., (eds.) *Engineering Geology for Tomorrow's Cities*. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publication No.22, [CD-ROM, Paper No. 80].
- Aboushook, M.I., Park, H.D., Mazen, S.O., El- Sohby, M.A., 2008. Elaboration of digital image processing for monitoring environmental impact on Cheops (Khufu) pyramid. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Site Characterization*, Taipei, Taiwan, [CD-ROM, Paper No. 902].
- Agricola, G., 1950 [1556]. De Re Metallica. *Grām*. Translated from the first Latin edition of 1556. Hoover, H.C., Hoover, L.H., *Dover Publications Inc.*, New York, p. 638.
- Alvarez de Buergo, M., Gonzalez, F., 2002. Characterizing the construction materials of a historic building and evaluating possible preservation treatments for restoration purposes. *Special Publication*, Geological Society of London, pp. 241-254.
- Ambraseys, N.N., Melville, C.P., Adams, R.D., 1995. The Seismicity of Egypt, Arabia and the Red Sea: A Historical Review. *Book. Cambridge University Press*, UK, p.201.
- Arnold, D., 1991. Building in Egypt: Pharaonic stone masonry. *Book. Oxford University Press*, USA, p. 316.
- Arnold, D., 1999. When the Pyramids Were Built: Egyptian Art of the Old Kingdom. *Book. Rizzoli International Publications*, p. 144.
- Arnold, A., Jeannette D., Zehnder K., 1980. ICOMOS GP 80. Proposal for a terminology of weathering phenomena on building stones, pp. 1-26.
- Bacharach, J.L., (ed.), 1995. Restoration and Conservation of Islamic Monuments in Egypt. *Book. American University in Cairo Press*, Cairo, p. 194.
- Ball, J., 1939. Contributions to the geography of Egypt. *Book. Egypt Survey Dept. Government Press*, Cairo, p. 308.
- Bard, K. A., 2008. An introduction to the archaeology of Ancient Egypt. *Book. Blackwell Publishing*, UK, p. 400.
- Barta, M., Coppens, F., Krejčí, J. (eds.), 2006. Abusir and Saqqara in the Year 2005, Czech Institute of Egyptology, Prague, p. 437.
- Barta, M., Coppens, F., Krejčí, J. (eds.), 2011, *in press*. Abusir and Saqqara in the Year 2010, Czech Institute of Egyptology, Prague.
- Bateman, M.D., Ayala, G., Wainwright, J. (ed.), 2010. Special Issue:Geoarchaeology: From Landscape to Laboratory and Back Again. November/December 2010, Volume 25, Issue 6, pp. 671–856.
- Baud, M., 2002. Djéser et la IIIe dynastie. *Book. Pygmalion/Gérard Waletet*, p. 146.
- Bernhardt, C.E., Benjamin, P., Horton, B.P., Stanley, J.D., 2012. Nile Delta vegetation response to Holocene climate variability. *Geology*. July 2012, v. 40, pp. 615-618.
- Betro, M. C., 1996. Hieroglyphics: The Writings of Ancient Egypt. *Book. Abbeville Press*, p. 251.
- Budge, E. A. W., 1907. The Egyptian Sûdân, its history and monuments. Vol.2. *Book. Kegan Paul, Trench, Trubner&Co, Limited*, London, p. 618.

- Buongarzone, R., 2003. History of Explorations, Atlas of New Cartography, Archaeological Database. In Ago, F., Bresciani, E., Giammarusti, A. (eds.) *The North Saqqara Archaeological Site. Handbook for the Environmental Risk Analysis*, Edizioni Plus, Università di Pisa, Pisa, pp. 108-121.
- Childress, D. H., 1999. Technology of the Gods: The Incredible Sciences of the Ancients. *Book. Adventures Unlimited Press*, p. 320.
- Clarke, S., Engelbach R., 1990 [1929]. Ancient Egyptian construction and architecture. *Book. Dover Publications*, New York, p. 242.
- David, A.R., 1986. The Pyramid Builders of Ancient Egypt. A modern investigation of Pharaoh's workforce. *Book. Guild Publishing*, London, p. 269.
- Davidovits, J., 2009. Why the Pharaohs Built the Pyramids with Fake Stones. *Book. Geopolymer Institute*, Saint Quentin (France), p. 288.
- Davidovits, J., Margie, M., 1991. The Pyramids: An Enigma Solved. *Book. Barnes & Noble Inc.*, New York, p. 280.
- Del Monte, C., Sabbioni, C., 1986. Chemical and biological weathering of an historical building. *Sci. Total Environ* 50, pp.165- 182.
- Description de l'Égypte: ou, Recueil des observations et des recherches qui ont été faites en Égypte pendant l'expédition de l'armée française, 1809-1822. Imprimerie impériale (puis royale), Paris, p. 751.
- Doehne, E., Price, C.A., 2010. Stone conservation. An overview of current research. *Book. The Getty Conservation Institute*, USA, p.160.
- Dorn, Ronald I., 2009. Desert Rock Coatings. In Parsons, A.J., Abrahams, A.D. (eds.) *Geomorphology of Desert Environments*, 2nd ed. *Springer.*, pp. 153-186.
- Dunn, Ch., 2010. Lost Technologies of Ancient Egypt: Advanced Engineering in the Temples of the Pharaohs. *Book. Bear & Company*, New York, p. 400.
- Edwards, I.E.S., 1967. Die Ägyptischen Pyramiden. *Book. Otto Harrassowitz*, Weisbaden. p. 224.
- El-Gohary, M., 2011. Chemical deterioration of Egyptian limestones affected by saline water. In *International Journal of Conservation Science*, Vol.2, Issue 1, January-March 2011, pp.17-28.
- Emmerson, A., 2010. Reconstructing the Funerary Landscape at Pompeii's Porta Stabia. In *Rivista di Studi Pompeiani* 21, pp. 77-86.
- Estep, W., 2008. The Great Pyramid. Book of Sacred Mysteries: With a Treatise on the Ancient Order of Temple Builders. *Book. Kessinger Publishing*, p. 208.
- Firth, C.M., Quibell, J.E., 1935. Excavations at Saqqara. The Step Pyramid. *Book. Institut Français d'Archéologie Orientale*, Cairo, p. 263.
- Fitzner B, Heinrichs K, Kownatzki R., 1995. Weathering forms—classification and mapping/Verwitterungsformen—Klassifizierung und Kartierung. *Denkmalpflege und Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung*, vol. 1., *Verlag Ernst & Sohn*, Berlin, pp. 41–88.
- 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, pp. 11-56.



- Fitzner, B., Heinrichs, K., Bouchardiers, D., 2002. Limestone weathering of historical monuments in Cairo, Egypt. Special Publication, *Geological Society of London*, 205, pp. 217-239.
- Fitzner, B., 2004. Documentation and evaluation of stone damage on monuments. In Kwiatkowski, D., Löfvendahl, R. (ed.), *Proceedings of the 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, 27 June - 2 July 2004, Stockholm, Vol. II, ICOMOS, Sweden, pp. 677-690.
- Forman, W., Malek, J., 1992. In the Shadow of the Pyramids: Egypt during the Old Kingdom. *Book. University of Oklahoma Press*, p. 130.
- Franke L., Schumann I., Van Hees R., Van der Klugt L., Naldini S., Binda L., Baronio G., Van Balen K., Mateus J., 1998. Damage Atlas, Classification of Damage Patterns Found in Brick Masonry. Protection and Conservation of European Cultural Heritage, Research Report European Commission, N°8, vol.2. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, p. 172.
- Gauri, K.L., 1984. Geological study of the Sphinx. *NARVCE*, 127, pp. 24-43.
- Giammarusti, A., 2003. The sustainable development of archaeological sites – risk analysis. In Ago, F., Bresciani, E., Giammarusti, A. (eds.) *The North Saqqara Archaeological Site. Handbook for the Environmental Risk Analysis*, Edizioni Plus, Università di Pisa, Pisa, pp. 76-105.
- Goyon, J.C., Cardin, C. (eds.), 2007. Proceedings of the ninth International Congress of Egyptologists, Peeters, Belgium, p. 231.
- Grassegger, G., 1999. Decay mechanisms of natural building stones on monuments: A review of the latest theories. In *Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen: Festschrift zum 60. Geburtstag von H.-W.Reinbard*, ed. C.U. Große, Stuttgart: IWB. pp. 54-81.
- Grimal, N. A., 1994. History of Ancient Egypt. *Book. Willey-Blackwell*, Oxford, p.142.
- Grimmer, A.E., (ed.), 1984. A Glossary of Historic Masonry Deterioration Problems and Preservation Treatments. *Book. National Park Service Preservation Assistance Division*, Washington, DC, p. 65.
- Groat, L., Wang, D., 2002. Architectural research methods. *Book. John Wiley & Sons, Inc.*, USA, p. 389.
- Gupta, R.P., 2003. Remote Sensing Geology, 2nd ed. *Book. Spinder Verlag*, Germany, p. 655.
- Harrell, J. A., Brown, V. M., 1992. The oldest surviving topographical map from ancient Egypt (Turin Papyri 1879, 1899 and 1969). *Journal of the American Research Center in Egypt*, 29, pp. 81-105.
- Harrell, J. A., Storemyr, P., 2009. Ancient Egyptian quarries – an illustrated overview. In. Abu Jaber, N., Bloxam, E.G., Degryse, P., Heldal, T. (eds) *QuarryScapes: Ancient Stone Quarry Landscapes in the Eastern Mediterranean*, Norwegian Geological Survey of Norway, Special Publication no.12. pp. 7-50.
- Hawass, Z., 2005. A new era for museums in Egypt. *Museum International*, Vol.57, Issue 1-2, (2005), Blackwell Publishing, UK, pp. 7-23.
- Hawass, Z., Senussi, A., 2008. Old Kingdom Pottery from Giza. *Book. SCA Press*, Cairo, pp. 247-254.
- Heinrichs, K., 2008. Diagnosis of weathering damage on rock-cut monuments in Petra, Jordan. *Environmental Geology*, Vol.56, Numbers 3-4 (2008), Springer Verlag, 2008, pp. 643-675.

- Heinrichs, K., Fitzner, B., 2007. Stone monuments of the Nemrud Dag sanctuary, Turkey - petrographical investigation and diagnosis of weathering damage. *Z. dt. Ges. Geowiss.*, 158/3 "Rohstoff Naturstein - Teil 1" / "Natural Building Stone Resources - Part 1", pp. 519-548.
- Honeyborne, D.B., 2006. Weathering and decay of masonry. In: Conservation of building & decorative stone. Part 1, *In* Ashurst, J., Dimes, F.J., Butterworth, H. (eds.), UK, p.193.
- Isler, M., 2001. Sticks, stones, and shadows: building the Egyptian pyramids. *Book. University of Oklahoma Press, USA*, p.352.
- Jeffrey, S. B., 2011. Ancient Egypt and the Old Kingdom. *Book. Webster's Digital Services*, p. 254.
- Jensen, J.R., 1995. Introductory Digital Image Processing, 2nd ed. *Book. Prentice Hall, USA*, p. 526.
- Kaļinka, M., 2008. Arhitektūras telpiskās dokumentēšanas tehnoloģija. Promocijas darbs, Rīgas Tehniskā Universitāte, 127 lpp.
- Kalinka, M., Rutkovska, E., 2007. Use the 3D laser scanning for documentation the Riga cathedral in Latvia. *In Proceedings of the ISPRS Working Group v/4 Virtual reality and Computer Animation, ISPRS WG V/2 Cultural Heritage Documentation, Latvia, [CD-ROM]*.
- Kalinka, M., 2007. Use the 3D laser scanning for documentation and the data in databases. *In Scientific Proceedings of Riga Technical University, Geomatics Science Series, the 11th issue, Vol. 2, RTU, Riga, Latvia*, pp. 95-103.
- Kamil, J., 1998. Ancient Egyptians: Life in the Old Kingdom. *Book. Columbia University Press*, p. 206.
- Kanawati, N., 1977. Egyptian Administration in the Old Kingdom: Evidence on Its Economic Decline. Doctoral Thesis, Macquarie University, Humanities Pr. Publishers, p. 168.
- Kawae, Y., Kamei H., Kosuke, S., 2009. Aiming to Go beyond Archaeological Horizons: 3D Data of Pyramids and Their Interpretations. *In 22nd CIPA Symposium (Digital Documentation, Interpretation & Presentation of Cultural Heritage)*, Oct. 11-15, Kyoto, Japan, Paper No. 221.
- Klemm, R., Klemm, D.D., 1993. Steine und steinbrüche im alten Ägypten. *Book. Heidelberg, Springer Verlag*, p. 456.
- Klemm, R., Klemm, D.D., 2008. Stones and Quarries in Ancient Egypt. *Book. British Museum Press, London*, p. 384.
- 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.
- Klitzsch, E., List, E.K., Pöhlmann, G., 1989. Stratigraphic lexicon and explanatory notes to the geological map of Egypt, Conoco Coral and Egyptian General Petroleum Corporation, Cairo, p. 262.
- Klitzsch, E., List, E.K., Pöhlmann, G., 1986-87. Geological map of Egypt (1:500,000 in 20 sheets), Conoco Coral and Egyptian General Petroleum Corporation, Cairo.
- Knight, Ch., Butler, A., 2011. Before the Pyramids: Cracking Archaeology's Greatest Mystery. *Book. Watkins Publishing*, p. 288.

- Korres, M., Panetsos, G., Seki, T. (eds.), 1996. The Parthenon, Architecture and Conservation, ESMA and the Foundation for Greek Culture, Athens, pp. 12-81.
- Kriwaczek, P., 2012. Babylon: Mesopotamia and the Birth of Civilization. *Book. Atlantic Books*, p. 320.
- Крол, А., 2005. Египет первых фараонов. Хеб-Сед и становление древнеегипетского государства. *Книга. Издательство Рудимино*, Москва, 224 с.
- 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, pp. 235-240.
- Kukela, A., Segliņš, V., 2012b. Unis piramīdas fasāžu akmens materiāla dēdēšanas netieša novērtēšana. *Krāj. Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Vides zinātne. LU 70. zinātniskās konferences referātu tēzes*. Rīga, Latvijas Universitāte, 187.-189. lpp.
- Kukela, A., Seglins, V., 2012c. 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, pp. 112-121.
- Kukela, A., Seglins, V., 2012d. Džosera piramīdas akmens materiāla dēdēšanas nedestruktīva novērtēšana. *Latvijas Universitātes raksti, sērija „Zemes un vides zinātnes, 789 sēj. Rīga, Latvijas Universitāte. lpp. 105.-116.*
- Kukela A., Segliņš V., 2012e. 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), pp. 31-36.
- Kukela, A., Seglins, V., 2011a. Study of the historical monuments: from the photography to the digital spatial model. *In Proceedings of the 53rd International Scientific conference of Daugavpils University, Daugavpils, Latvia, [CD-ROM]*.
- Kukela, A., Seglins, V., 2011b. 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, pp. 82-90.
- Kukela, A., Seglins, V., 2011c. 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, pp. 142-149.*
- Kukela, A., Seglins, V., 2011d. Znanija o nedrah 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, pp. 72-75.*
- 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, pp. 185-195.*
- Labrousse, A., 1996. L'architecture des Pyramides a Textes, Vol.2., *Book. Institut Français d'Archéologie Orientale, Cairo, p. 123.*
- 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.*
- Lauer, J.P., 1977. Les pyramides de Sakkarah. *Book. Cairo, p. 92.*

- Lehner, M., 1985. The Giza Plateau Mapping Project: Season 1984-85. *NARCE*, 131, pp. 23-56.
- Lehner, M., 2004. The Complete Pyramids. *Book. The American University in Cairo Press*, p. 256.
- Lehner, M., Kamel, M., Tavares, A., 2009a. Giza Plateau Mapping Project. Seasons 2006-2007. Preliminary report. *In Giza Occasional Papers 3*. Ancient Egypt Research Associates, Inc. , Boston, p. 176.
- Lehner, M., Kamel, M., Tavares, A., 2009b. Giza Plateau Mapping Project. Seasons 2008. Preliminary report. *In Giza Occasional Papers 4*. Ancient Egypt Research Associates, Inc., Boston, p. 72.
- Lepsius, C.R., 1849-59, 1897-1913. *Denkmaler aus Agypten und Athiopien*. 12 vols. Leipzig.
- Lepsius, K.R., 1892. *Zeitschrift für Ägyptische Sprache un Alterthumskunde*, Vol. XXX, Leipzig, p. 128.
- Lockyer, J. N., 2010. The Early Temple and Great Pyramid Builders of Ancient Egypt. *Book. Kessinger Publishing*, p. 22.
- Lucas, A., 1948. Ancient Egyptian materials and industries, 3<sup>rd</sup> edition. *Book. The St Ann's Press, London*, p. 548.
- Malkowski, E.F., 2010. Ancient Egypt 39,000 BCE: The History, Technology, and Philosophy of Civilization X. *Book. Bear & Company*, p. 344.
- Meyer, E., Grussenmeyer, P., Perrin, J.P., Durand, A., Drap, P., 2006. Intra-site Level Cultural Heritage Documentation: Combination of Survey, Modeling and Imagery Data in a Web Information System. *In Ioannides, M., Arnold, D., Niccolucci, F., Mania, K. (eds.). The 7th International Symposium on Virtual Reality, Archeology and Cultural Heritage, VAST.*, pp. 129-134.
- Midant-Reynes, B., 2000. The Prehistory of Egypt. *Book. Wiley-Blackwell*, p. 328.
- Mitchell, N., Rössler, M., Tricaud, P.M., (Authors/Ed.). 2009. World Heritage Cultural Landscapes. A Handbook for Conservation and Management. UNESCO World Heritage Centre, p. 135.
- Neubauer, W., Doneus, M., Studnicka, N., Riegl, J., 2005. Combined High Resolution Laser Scanning and Photogrammetrical Documentation of the Pyramids at Giza. *In Proceedings of the XXth International Symposium CIPA, Torino, The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI-5/C34/1, 200*, pp. 470-475.
- Newton, C., 2007. Environmental change and settlement shifts in Upper Egypt during the Predynastic: charcoal analysis at Adaïma. *The Holocene*. 2007 Vol. 17 no. 8, pp. 1109-1118.
- Nicholson, P.T., Shaw, I., (eds.), 2009. Ancient Egyptian Materials and Technology. *Book. Cambridge University Press*, p. 702.
- O'Brien, C., 2011. Guidance for the care, conservation and recording of historic Graveyards. *Book. The Heritage Council of Ireland*, p. 64.
- Oers van, R., Haraguchi, S., (eds.) 2010. Managing historic cities. UNESCO World Heritage Centre, p. 253.
- Omran, F. E., 1992. Holocene sea level changes at the Nile delta coastal zone of Egypt. *GeoJournal*, Volume 26, Number 3 (1992), pp. 389-394.

- Osmanagi, S., 2012. Pyramids Around The World. *Book. The New Era Times Press*, p. 365.
- Papa, G., 2003. Site environmental analysis. In Ago, F., Bresciani, E., Giammarusti, A. (eds.) *The North Saqqara Archaeological Site. Handbook for the Environmental Risk Analysis*, Edizioni Plus, Università di Pisa, Pisa, pp. 180-203.
- Perring, J.S., 1839. Pyramids of Gizeh from actual survey and admeasurement, London, p. 159.
- Petrie, W.M.F., 1891. Illahun, Kahun, and Gurob, London, p. 59.
- Phillipps, R., Holdaway, S., Wendrich, W. Cappers, R.. 2012. Mid-Holocene occupation of Egypt and global climatic change. *Quaternary International*. Volume 251, 2012, pp. 64–76.
- Preusser, F., Maekawa, S., Doehne, E., Selwitz, C., 2006. The GCI/EAO environmental monitoring program at the Great Sphinx of Giza: results and interpretation. In *Supplément aux annales du service des Antiquités de l'Égypte*. Cahier No.35. The world of Ancient Egypt essays in honour of Ahmed Abd El-Qader El-Sawi. SCA, p. 220.
- Pye, M., Dalley, K. (eds.), 2011. Exposed, Uncovered, & Declassified: Lost Civilizations & Secrets of the Past. *Book. New Page Books*, London, p. 224.
- Reece, K. E., 2006. The Egyptians: Builders of the Pyramids. *Book. Rourke Publishing*, p. 48.
- Regulski, I., 2010. A Palaeographic Study of Early Writing in Egypt. *Book. Orientalia Lovaniensia Analecta. Peeters Publishers*, p. 824.
- 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. pp. 251-256.
- Said, R. (ed.), 1990. The Geology of Egypt. *Book. Taylor & Francis*, Amsterdam, p. 734.
- Salonia, P., Bellucci, V., Scolastico, S., Marcologno, A., Leti Messina, T., 2007. 3D survey Technologies for reconstruction, analysis and diagnosis in the conservation process of cultural heritage. In Georgopoulos, A., Agriantonis, N. (eds.), *Anticipating the Future of the Cultural Past*, Proceedings of the XXI International CIPA Symposium, Athens, Greece, [CD-ROM].
- Sampsell, B. M., 2003. A Travelers Guide to the Geology of Egypt. *Book. The American University in Cairo Press*, Cairo, p. 229.
- Sanford, K.S., Arkell, W.J., 1929. Prehistoric Survey of Egypt and Western Asia. Lower Egypt. Vol. 4, Cambridge University Press, Cambridge, p. 190.
- 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, pp. 72-83.
- Shafer, B. E. (ed.), 1997. Temples of Ancient Egypt. *Book. Cornell University Press*, p. 352.
- Schlumberger, 1984. Well evaluation conference of Egypt. *Schlumberger Middle East*, Vol.1.Geology of Egypt. Cairo, p. 67.
- Schoch, R., 2004. Voyages of the Pyramid Builders: The True Origins of the Pyramids from Lost Egypt to Ancient America. *Book. Los Angeles, Tarcher Publishers*, p. 352.

- Segliņš, V., 2011. Senās Ēģiptes rakstu dārgumi. No Piramīdu tekstiem līdz Mirušo grāmatai. *Grāmata. LU Akadēmiskais apgāds*, Rīga, 344 lpp.
- 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*, Sofia, Bulgaria, pp. 401-407.
- 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, pp. 1005-1011.
- Shaw, I. (ed.), 2003. *The Oxford History of Ancient Egypt. Book. Oxford University Press*, Oxford, p. 525.
- Siegesmund, S., Weiss, T.N., Vollbrecht, A. (eds.), 2003. Natural stone, weathering phenomena, conservation strategies and case studies. Geological Society Special publication 205, *Geological Society of London*, p. 496.
- Smith, B.J., Warke, P.A. (eds.), 1996. Processes of Urban Stone Decay. *In Proceedings of SWAPNET '95*, The Queen's University, Shaftesbury (Dorset): Donhead Publishing, Belfast, p. 288.
- Stadelmann R., 1991. Die Ägyptischen Pyramiden: Vom Ziegelbau zum Weltwunder. *Book. Mainz*, p. 313.
- Stocks, D. A., 2003. Experiments in Egyptian archaeology: stoneworking technology in ancient Egypt. *Book. Routledge*, p. 296.
- Svahn, H., 2006. Non-destructive field tests in stone conservation: Field and laboratory tests: final report for the research and development project. Rapport från Riksantikvarieämbetet 2006: 4, Riksantikvarieämbetet, Stockholm, p. 118.
- Tawadros, E.E., 2001. Geology of Egypt and Libya. *Book. Brookfield: A.A. Balkema*, Rotterdam, p. 468.
- Vergès-Belmin, V., (ed.), 2008. Illustrated Glossary on Stone Deterioration Patterns. Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre. English-French version. Monuments & Sites 15. Paris: ICOMOS (International Council on Monuments and Sites) and ISCS (International Scientific Committee for Stone), p. 86.
- Verner, M., 2004. The Pyramids: The Mystery, Culture and Science of Egypt's Great Monuments. *Book. The American University in Cairo Press*, p. 495.
- Wang, W., Pottmann, H., Liu, Y., 2004. Fitting B-Spline Curves to Point Clouds by Distance Minimization. Department of Computer Science. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol.25, Issue 2, New York, pp. 214-238.
- Weeks, K.R., Hetherington, N.J., 2006. The Valley of the Kings, Luxor, Egypt site management masterplan. Theban Mapping Project, Cairo, p. 290.
- Wengrow, D., 2006. The archaeology of Early Egypt. Social transformations in North-East Africa, 10,000 to 2650 BC. *Book. Cambridge University Press*, UK, p. 343.
- Wenke, R., J., 2009. The Ancient Egyptian State. The Origins of Egyptian Culture (c.8000-2000 BC)., *Book. Cambridge University Press*, USA, p. 395.
- Wilkinson, T.A.H., 1999. Early dynastic Egypt. *Book. Routledge*, UK, p. 413.
- Wilkinson, T., 2003. Genesis of the Pharaohs. Dramatic new discoveries rewrite the origins of Ancient Egypt. *Book. Thames & Hudson*, London, p. 208.

Wilkinson, T., 2011. The Rise and fall of Ancient Egypt. *Book. Bloomsbury Publishing PLC.*, p. 672.

Woods, M., Woods, M. B., 2011. Ancient Construction Technology: From Pyramids to Fortresses. *Book. Technology in Ancient Cultures. Twenty First Century Books*, p. 96.

Wright, G.R.H., 2005. Ancient building technology. Vol.2. Materials. *Book. Brill, Leiden*, p. 554.

## **Nepublicētā**

Latvijas Zinātniskās ekspedīcijas Ēģiptē materiāli. Aizrobežu Mākslas muzeja arhīvs.

## **Interneta resursi**

3d-model for GoogleEarth in Google's 3d-warehouse, 2009.

<http://www.3dhh.de/b/egypt-pyramid-djoser/>. Skatīts 15.06.2011.

Acropolis Restoration Service, 2011. <http://www.ysma.gr/en/>. Skatīts 10.05.2012.

Amarna Project, 2010. <http://www.amarnaproject.com/>. Skatīts 10.05.2012.

Cervený, N.V., Dorn, R.I., Gordon, S.J. and Whitley, D.S., 2007. Atlas of Petroglyph Weathering Forms used in the Rock Art Stability Index (RASI). <http://alliance.la.asu.edu/rockart/stabilityindex/RASIAtlas.html> . Skatīts 02.04.2011.

Classification scheme of weathering forms, 2002. [http://www.stone.rwth-aachen.de/wgn\\_cse.htm](http://www.stone.rwth-aachen.de/wgn_cse.htm) . Skatīts 12.02.2012.

Deslandes B., Update on the recent works carried out by the Latvian Scientific Mission in the Step Pyramid of Saqqara (Egypt), *Archaeogate Egittologia*, 18.09.2007. (<http://www.archaeogate.org/egittologia/article/677/1/update-on-the-recent-works-carried-out-by-the-latvian-s.html>)

Digital Karnak Project, 2008. <http://dlib.etc.ucla.edu/projects/Karnak/>. Skatīts 10.05.2012.

Ēģiptes Naftas un minerālu nodrošinājuma ministrija

(<http://www.petroleum.gov.eg/en/Pages/default.aspx>). Skatīts 15.05.2012.

Geske, A., 2001. Datortehnoloģijas un matemātikas metožu lietošana izglītības pētījumos. Hipotēžu statistiskā pārbaude.

[https://www.mykoob.lv/?index/liis\\_macibu\\_materiali\\_documents/category/38/material/49/documentsshow/1#topic\\_49](https://www.mykoob.lv/?index/liis_macibu_materiali_documents/category/38/material/49/documentsshow/1#topic_49). Skatīts 09.07.2012.

Pompeii Archaeological Research Project: Porta Stabia, 2012.

<http://classics.uc.edu/pompeii/index.php/home.html>. Skatīts 01.05.2012.

Revolutionizing Archaeology with the Latest Scanning Technology, Topcon Corporation, Japan [http://www.topcon.co.jp/en/positioning/atwork/saqqara\\_gls.html](http://www.topcon.co.jp/en/positioning/atwork/saqqara_gls.html) Skatīts 21.11.2011.

Starptautiskās Stratigrāfijas Komisijas mājas lapa. <http://www.stratigraphy.org/>. Skatīts 30.10.2011.

