

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

K. Bondars

**MŪRA PĀRSEGUMA KONSTRUKCIJU
ILGIZTURĪBAS PROGNOZĒŠANAS
METODIKA**

PROMOCIJAS DARBS

2011

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Būvniecības fakultāte
Materiālu un konstrukciju institūts

Kaspars BONDARS
Būvniecības doktora programmas students

**MŪRA PĀRSEGUMA
KONSTRUKCIJU ILGIZTURĪBAS
PROGNOZĒŠANAS METODIKA**

Promocijas darbs

Zinātniskais vadītājs
Dr. sc. ing., profesors
A. KORJAKINS

Rīga 2011

Anotācija

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā „Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai”.



Kopš seniem laikiem mūra konstrukcijas būvētas pēc laikā un praksē pārbaudītām metodēm un proporcijām. Eksploatācijas laikā mūra materiāla degradācija, pārslodze, dinamiskās iedarbes, balsta konstrukciju sēšanās, kā arī to radītās deformācijas mūra plaknē un perpendikulāri tai, var izsaukt mūra konstrukcijas sagrūvumu. Lai definētu vēsturisku ēku drošas eksploatācijas robežas, ir noteikti mūra daļu pārvietojumi, kas neapdraud konstrukcijas noturību. Balstu deformāciju izraisīta plaisu attīstība, ievērojami maina spiedes spēka ass novietojumu šķērsriezumā un izveido rotācijas punktus, kurus uzskata par locīklām. Vēsturisko ēku pamatu konstrukciju sēšanās ir par iemeslu plaisu attīstībai velvju pārsegumos un locīklas mehānisma izveidei. Velvju daļu savstarpējā mijiedarbība jādefinē kā virsmu kontakts, ievērtējot berzes komponenti, jo plaisājušu velvju droša eksploatācija iespējama arī pēc caurejošu plaisu izveidošanās. Deformētā konstrukciju modeļa izveidei un analīzes aprobācijai izmantots Rīgas Doma baznīcas vertikālo konstrukciju un pārseguma modelis. Būvkonstrukciju analīzei izmantoti „inversās inženierijas” (*reverse engineering*) principi, veicot uzmērīšanu ar virsmu lāzerskanēšanas metodi un konstrukcijas analizējot ar būvkonstrukciju datoraprēķina programmām.

Promocijas darbā secīgi apvienotas metodes, lai varētu analizēt esošu mūra ēku velvju pārsegumus. Metožu kopums sastāv no:

- a) vēsturisko mūra ēku velvju virsmu trīsdimensiju lāzerskanēšanas ar uzmērījumu transformāciju tīkla modelī;
- b) skaitliskas virsmas modeļa izveides, apstrādes un tā transformācijas būvkonstrukciju datoraprēķina programmās;
- c) mūra materiālu stiprības un elastīgo īpašību testa metožu atlases vēsturisko mūra materiālu īpašību noteikšanai;
- d) testos iegūto mūra materiāla īpašību apstrādes un homogenizēta mūra raksturlielumu pielietošanas datoraprēķinu programmās;
- e) vēsturisko ēku deformēto konstrukciju analīzes un korelācijas ar plaisu monitoringa datiem;

- f) velvju pārseguma nevienmērīgas balstu deformācijas efektu analīzes un esošu mūra pārsegumu drošas ekspluatācijas kritēriju izstrādes.

Piedāvātais metožu kopums nodrošina vēsturisko mūra ēku deformēto konstrukciju analīzi, lai noteiktu drošas ekspluatācijas robežas. Izstrādātais metožu kopums ietver samazinātas laikietilpības ģeometrisku virsmu uzmērīšanas metodi un analīzes datormodeļa izveidi, pielietojot „inversās inženierijas” metodi un deformēto konstrukciju datoranalīzi, izmantojot tirgū plaši pieejamas būvkonstrukciju datoranalīzes programmas.

Promocijas darbā korelētas velvju plaisu atvēruma izmaiņas ar pamatu nevienmērīgiem pārvietojumiem. Izmantojot Rīgas Doma baznīcas plaisu monitoringa sistēmas datus, analizēta temperatūras slogojuma, vēja, sniega un citu ekspluatācijas slodžu ietekme.

Pamatojoties uz apvienoto mūra konstrukciju analīzes metožu kopumu, izstrādāts esošu mūra pārseguma konstrukciju drošas ekspluatācijas kritērijs.

Darbā iekļauti 70 attēli, 6 tabulas un sniegtas atsauces uz 153 literatūras avotiem.

Anotation

This work has been supported by the European Social Fund within the project „Support for the implementation of doctoral studies at Riga Technical University”.



Since past masonry structures were built by time-honored method of trial and error. Structural weakness or overloading, dynamic vibrations, settlement, as well in-plane and out-of-plane deformations can cause failure of masonry structures. To prevent the accidental situation in heritage buildings, safety criteria specified by determining deformation limit between interacting parts of masonry arch shell. At the same time cracked masonry shell part interaction also must be specified by friction because safe exploitation of building after crack forming is possible. The foundation settlement effect is the reason of shell part disintegration and hinge forming in the heritage's vaulted structure. After support deformations and crack forming in shell, structures thrust line change position in cross section and internal forces relocates significantly. Simulation of hinge mechanism between rotating masonry parts is performed in the present investigation. Reverse engineering principles used in manufacturing processes adopted for structural analyze. The deformed state model of Riga Dome Cathedral's vaulted shell has been created using laser scanner surface scanning.

Dissertation consists of sequently joined methodes for deformed heritage masonry vaulted structure analysis. The proposed methods are:

- a) three-dimensional scanning of heritage structure by means of 3D laser scanners to measure vaulted structure surface and further conversion into surface mesh model;
- b) digitalized surface model preparing and transfer to structural computational programs;
- c) selection of masonry material investigation methods to describe the heritage masonry structure material physical and mechanical properties;
- d) test result processing and material property definition for structural analyze;
- e) heritage structure deformed stage analyze and result validation with crack monitoring data;
- f) safe criteria development according to structure support unequal settlement.

The presented set of methods provides vaulted structure analysis in deformed stage to define safe exploitation limits and plan the reinforcement or reconstruction of the analyzed structure. Presented methodologies includes the less time-consuming vault geometry measuring method, model preparation method adopted by „reverse engineering” for mechanical engineering and deformed stage computational analyze using popular structural analyze program.

Crack monitoring system of Riga Dome Cathedral’s vaulted shell is managed for three years to establish correlation between support settlement, temperature loading and crack movement. Deformed state model and long term crack monitoring is used for analysis of influence the support deformations. Deformation criteria are developed for safety exploitation of heritage masonry structures.

The paper includes 70 pictures, 6 tables, and provides references to 153 literature sources.

Аннотация

Эта работа выполнена при содействии Европейского социального фонда в рамках проекта „Поддержка развития докторантуры РТУ”.



В давнем прошлом конструкции из кирпичной кладки строились методом проб и ошибок. Во время эксплуатации потери прочности материала, осадка конструкций, перегрузки, динамические колебания, деформации в плоскости и параллельно плоскости кладки могут привести к разрушению строений из кирпичной кладки. В работе рассмотрены арочные несущие конструкции перекрытий выполненные из

кирпичной кладки, определены границы деформаций между взаимодействующими частями стен и конструкциями арки, сформулирован критерий безопасной эксплуатации исторических зданий с перекрытием из кирпичной кладки. Эксплуатация исторических зданий возможна также и после формирования сквозных трещин в стенах и сводах. Разделенные трещиной части кладки взаимодействуют между собой по границе контакта, где должны учитываться силы трения. Осадки опор сводов здания вызывают образование трещин в стенах и сводах, которые приводят к созданию шарнира в точках контакта частей конструкций. После возникновения сквозных трещин в оболочке перекрытия происходит значительное смещение сжатой зоны. Моделируя перекрытие существующего исторического собора при неравномерных осадках опор сводчатых перекрытий приняты границы линейности внутренних взаимодействий. Деформированное состояние модели сводчатых оболочек Рижского Домского собора было создано методом „обратной техники” (*reverse engineering*) с использованием лазерного оборудования для сканирования поверхностей конструкций здания, создания цифровой модели и анализа конструкций. Метод „обратной техники” был приспособлен для анализа стойких конструкций исторических зданий.

Диссертация состоит из последовательно соединённых методологических этапов для анализа деформированных сводчатых перекрытий исторических зданий. Предлагаемыми методологическими этапами являются:

- а) трехмерное сканирование поверхности конструкций исторических зданий с помощью 3D лазерных сканеров для дальнейшей конвертации результатов и создания сеточной модели поверхности конструкций;
- б) цифровое формирование модели поверхностей и передача модели в вычислительные программы стойких конструкций;
- с) выбор методов исследования физико-механических свойств для описания материала кладки исторических зданий;
- г) обработка результатов экспериментального тестирования материалов кирпичной кладки по определению их физико-механических свойств для использования в вычислительных программах стойких конструкций;
- е) анализ деформированного состояния исторических зданий и сравнение результатов с данными мониторинга трещин;
- е) анализ динамики неравномерных осадок опор сводов и разработка критерия безопасной эксплуатации зданий.

Представленный набор методов обеспечивает анализ сводчатых структур в деформированном состоянии с определением предела безопасной эксплуатации. В представленной методологии создается численная модель существующего сводчатого перекрытия для дальнейшего анализа, разработки усиления или реконструкции рассматриваемого исторического здания. Комплекс методов включает в себя метод измерения геометрии свода уменьшая временные затраты, подготовку модели и анализ деформированного состояния используя популярные вычислительные программы для строительных конструкций.

Система проводимого мониторинга трещин сводчатого перекрытия Рижского Домского собора регистрирует развитие трещин в течение трех лет и даёт возможность соотносить развитие трещин с деформациями опор, температурными и эксплуатационными нагрузками. Критерии деформации разработаны для оценки безопасной эксплуатации конструкций исторических зданий.

Документ содержит 70 рисунков, 6 таблиц и ссылки на 153 литературных источника.

PATEICĪVA

Vēlos izteikt pateicību saviem tuvākajiem, ģimenei un draugiem par sapratni un iecietību, un par spēju izprast pētnieka dīvaino dabu visā mana zinātniskā darba veikšanas laikā.

Vislielākā pateicība tiek veltīta manam promocijas darba vadītājam, profesoram Dr. sc. ing. Aleksandram Korjakinam par mērķtiecīgu un sistemātisku vadību būvzinātnes pētījumos.

Liela pateicība jāizteic Materiālu un Konstruksiju institūta vadītājam, profesoram Dr. sc. ing. Andrim Čatem un šī institūta jaunajiem zinātniskajiem līdzstrādniekiem Dr. sc. ing. Kasparam Kalniņam, M. sc. ing. Oļģertam Ozoliņam un M. sc. ing. Edgaram Eglītim par draudzīgu un nesavtīgu palīdzību gan ar kvalificētiem padomiem, gan morālu atbalstu.

Pateicība Rīgas Doma pārvaldei par radīto iespēju veikt Rīgas Doma baznīcas plaisu monitoringu un viņu atbalstu inovatīvajām tehnoloģijām baznīcas plaisu pārvietošanas kontrolei, uzstādot optiskās šķiedras tenzometru plaisu monitoringa sistēmu. Nododot pētnieku rīcībā šo plaisu monitoringa sistēmu, tika pavērta iespēja ēkas ekspluatācijas apstākļu pētījumiem, zinātniskai analīzei un ēkas ekspluatācijas drošības novērtēšanai. Personīgais, Rīgas Doma atjaunošanas nodaļas vadītāja, Ronalds Lūša atbalsts un ieinteresētība pētījumos uzskatāma par garantu šī izcilā vēstures pieminekļa saglabāšanai.

Pateicība SIA „Jensen Consult un Arhis inženieri” vadībai un darbiniekiem par morālu atbalstu un sapratni, akceptējot manu laukietilpīgo pētījumu.

Izsaku lielu pateicību sava promocijas darba redaktoriem, Dr. schem. Dainai Kalniņai un Odetai Indusei, nesavtīgi ieguldot laiku un darbu.

SATURA RĀDĪTĀJS

Ievads.....	10
1. Darba pamatojums un uzdevums	11
2. Inversās inženierijas pielietošana būvkonstrukciju analīzē.....	20
2.1 Optisko instrumentu uzmērījumi.....	22
2.2 Lāzerskanēšana, inversās inženierijas virsmu uzmērījumi	24
2.3 Esošu mūra pārsegumu uzmērīšana	30
2.4 Uzmērījumu datu apstrāde	32
2.5 Digitalizētu virsmu transformācija.....	36
2.6 Datormodeļu izveide būvkonstrukciju aprēķinu programmām.....	38
2.7 Analīzes objekta raksturojums	44
2.8 Līdzšinējā prakse apsekošanā.....	49
2.9 Ēku monitoringa attīstības virzieni	50
2.10 Apsekošanas un monitoringa attīstība Rīgas Doma baznīcā.....	51
2.10.1 Ēkas pamatnes izpēte.....	53
2.10.2 Ēkas mikroklimata mērījumi	55
2.10.3 Mūra masīvu ķīmiskā piesārņojuma izpēte	57
2.10.4 Mūra materiāla viendabības analīze	58
2.10.5 Mūra materiālu izpēte.....	62
2.11 Esošu mūru materiālu testēšanas metožu izvēle	64
2.12 Homogenizēta mūra materiāla definēšana datoraprēķinos.....	74
3. Velvju pārsegumu drošas ekspluatācijas kritēriju izstrāde.....	78
3.1 Aprēķina modeļu vēsturiskā attīstība	78
3.1.1 Kontakta spēku metode	78
3.1.2 Iekārtas ķēdes metode	82
3.1.3 Analītisko aprēķinu metode	83
3.1.4 Mūra modelēšana pielietojot diskretizācijas metodi	84
3.1.5 Datoraprēķini lietojot mūra homogenizācijas metodi	89
3.2 Esošu mūra pārseguma slogojums	92
3.2.1 Sniega svara slodze	94
3.2.2 Vēja slodze	94
3.2.3 Temperatūras slogojums	95
3.2.4 Ekspluatācijas slodzes	98

3.2.5	Avārijas slodzes.....	98
3.3	Plaisu monitoringa sistēmas izveide un datu analīze	98
3.4	Velvju pārseguma modelēšana.....	106
3.5	Velvju konstrukcijas lokāla sabrukuma modelēšana	109
3.6	Globālas noturības modelēšana un progresīvās sabrukšanas novērtējums	116
3.7	Mūra čaulu pārsegumu drošas ekspluatācijas robežas izstrāde.....	122
4.	Izstrādātās metodoloģijas apkopojums.....	124
5.	Secinājumi	126
6.	Literatūra	128

IEVADS

Promocijas darbā izstrādāta metodoloģija, kura ietver metodes, lai analizētu esošu mūra pārsegumu konstrukcijas reālos ekspluatācijas apstākļos. Promocijas darbā piedāvātā metodoloģija apkopo dažādu nozaru pētījumus. Pamatojoties uz šo pētījumu atšķirīgo raksturu, promocijas darbā nav sniegts koncentrēts literatūras apskats un pētījuma teorētiskais pamatojums.

Izstrādātā metodoloģija ietver mūra pārsegumu analīzei nepieciešamo metožu apkopojumu un apskata to efektivitāti esošu mūra pārsegumu analīzes nodrošināšanā. Metodoloģija sasaista trīs nodalītas nozares:

- a) ģeomātiku – liela izmēra objektu uzmērījumi, pielietojot virsmu lāzera skanēšanu;
- b) būvkonstrukciju defektu apsekošanu – plaisu kustības dinamikas novērtēšana, uzstādot plaisu monitoringa sistēmu un analizējot sienu un velvju plaisājuma zonu pārvietojumus;
- c) esošu mūra konstrukciju datoranalīzi – mūra pārseguma ekspluatācijas drošības novērtēšana, modelējot ēkas balstu nevienmērīgas deformācijas un monitoringa laikā reģistrēto temperatūras slogojumu.

Promocijas darbā liela uzmanība pievērsta mūra pārseguma uzmērījumu datu apstrādes problēmām un konvertācijai būvkonstrukciju datoraprēķina programmām. Vairums grafisko datorprogrammu tikai ar cilvēka līdzdalību spēj radīt noslēgtas virsmas, tādējādi šāda virsmas skanējuma automātiska konvertācija būvkonstrukciju datoraprēķina modelī ir viens no šī darba izaicinājumiem. Augstas precizitātes virsmu trīsdimensiju lāzera skanējums un ģeometrisku datu transformācija nodrošina ne tikai uzmērījumu precizitātes pieaugumu, salīdzinot ar manuāliem uzmērījumiem, bet samazina darbietilpību un datu apstrādes kļūdu iespējas. Meklējot analogiju ar esošajām citu nozaru metodoloģijām, veidotas paralēles ar inverso inženieriju (*reverse engineering*). Rūpniecības inversās inženierijas ietvaros tiek veikta rūpnieciski ražotu detaļu projektēšana, izgatavošana, testēšana un dzīves cikla analīze. Promocijas darba ietvaros, inversās inženierijas principi pārnesti uz esošu mūra būvkonstrukciju analīzi, nosakot konstrukciju virsmu uzmērīšanu, materiālu īpašību testus un konstrukciju esošās situācijas analīzi, ar perspektīvu rekonstrukcijas analīzi un rekonstrukcijas efektivitātes izvērtēšanu.

1. DARBA PAMATOJUMS UN UZDEVUMS

Tēmas aktualitāte:

Vairākus gadu tūkstošus mūra tehnoloģija bijusi dominējošā būvniecības tehnoloģija, kura īpaši attīstījās viduslaiku sakrālās būvniecības laikā. Līdz 19.gs mūra pārsegumi bija dominējošā pārsegumu tehnoloģija liellaidumu pārsegumos. No 9.gs līdz 19.gs mūra tehnoloģija bija dominējošā sakrālo būvju celtniecības tehnoloģija Baltijas jūras reģionā.

Vēsturisko arhitektūras objektu stāvoklis pasliktinās ekspluatācijas apstākļu ietekmē, izmainoties pamatnes īpašībām un degradējoties pamata konstrukciju tehniskajam stāvoklim. Vienotas metodoloģijas trūkums mūra konstrukciju analīzē iezīmējis nepieciešamību apkopot analīzes nodrošināšanai nepieciešamās metodes, tās secīgi sakārtojot, ar mērķi, veikt esošu mūra ēku konstrukciju stāvokļa novērtēšanu, noteikt to ekspluatācijas drošību un prognozēt drošas ekspluatācijas robežu. Metožu kopums aprobēts, veicot Rīgas Doma baznīcas velvju pārsegumu analīzi un metodoloģiju vispārinot uz citām, vēsturiskām mūra konstrukcijas ēkām.

Rīgas vēsturiskajā centrā atrodas Doma baznīca, Jura baznīca, Jēkaba baznīca, Pētera baznīca, kuru pārsegumi veidoti mūra velvju konstrukcijās. Arī cituviet Latvijā būvētas monumentālas baznīcas gotiskajā arhitektūras stilā, piemēram, sv. Sīmaņa baznīca Cēsīs un Ikšķiles baznīca. Līdzīgi Rīgas vēsturiskajam centram tādu pilsētu vēsturiskie centri, kā Ventpils, Ķīle, Hamburga, Lībeka, Ščecina, Gdaņska, Rostoka, Roterdama un Amsterdama, arī atrodas uz pamatnes no upes gultnes sanesumiem. Šo vecpilsētu vēsturisko ēku analīzei var izmantot šajā darbā izstrādāto metodoloģiju.

UNESCO pasaules kultūras mantojuma sarakstā iekļauti pilsētu vēsturiskie centri: Tallinas vecpilsēta Igaunijā, Rīgas vecpilsēta Latvijā, Kveldinburgas un Regensburgas vecpilsētas Vācijā, Korfu vecpilsēta Grieķijā un Avilas, Caceres, Segovijas un Santiago de Compostela vecpilsētas Spānijā. UNESCO pasaules kultūras mantojuma sarakstā ir liels skaits mūra baznīcu gotiskajā arhitektūras stilā. Baznīcas un katedrāles, kā atsevišķi UNESCO pasaules kultūras mantojumā iekļautie objekti Eiropā [150], apkopoti tabulā 1.1.

Tabula Nr.1.1

UNESCO pasaules kultūras mantojumā iekļauti objekti

Nr. p. k.	Valsts	Nosaukums	Nosaukums oriģinālvalodā
1.	Bulgārija	Ivanovo baznīca	<i>Боянска църква</i>
2.	Bulgārija	Boyana baznīca	<i>Ивановски скални църкви</i>
3.	Horvātija	Eifratas bazilika	<i>Eufrazijeva bazilika</i>
4.	Horvātija	Sv. Jāņa katedrāle	<i>Katedrala sv. Jakova</i>

5.	Kipra	Trodos reģiona baznīcas	<i>Painted Churches in the Troodos Region</i>
6.	Čehija	Sv. Barbara baznīca	<i>Chrám svaté Barbory</i>
7.	Čehija	Dievmātes baznīca Sedlecā	<i>Chrám Nanebevzetí Pany Marie</i>
8.	Čehija	Sv. Jāņa baznīca	<i>Poutní kostel Svatého Jana Nepomuckého</i>
9.	Dānija	Jelling Mounds baznīca	<i>Jellingstenene Kirke</i>
10.	Dānija	Roskilde katedrāle	<i>Roskilde Domkirke</i>
11.	Somija	Petājāvesi vecā baznīca	<i>Petäjäveden vanha kirkko</i>
12.	Francija	Abatijas baznīca Saint-Savin sur Gertempe	<i>Abbatiale de Saint-Savin sur Gartempe</i>
13.	Francija	Armēņu katedrāle	<i>Cathédrale d'Amiens</i>
14.	Francija	Bourges katedrāle	<i>Cathédrale de Bourges</i>
15.	Francija	Notre-Dame katedrāle	<i>Cathédrale Notre-Dame</i>
16.	Francija	Chartres katedrāle	<i>Cathédrale de Chartres</i>
17.	Francija	Vézelay baznīca	<i>Basilique et colline de Vézelay</i>
18.	Vācija	Ahenes baznīca	<i>Kaiserdom</i>
19.	Vācija	Koledžas baznīca	<i>Quedlinburger Dom</i>
20.	Vācija	Kologņas katedrāle	<i>Kölner Dom</i>
21.	Vācija	Svētceļnieku baznīca	<i>Wieskirche</i>
22.	Vācija	Sv. Pētera katedrāle	<i>Trierer Dom</i>
23.	Vācija	Dievmātes baznīca	<i>Liebfrauenkirche</i>
24.	Vācija	Speier katedrāle	<i>Dom zu Unserer lieben Frau in Speyer</i>
25.	Vācija	Sv. Marijas katedrāle	<i>Dom St. Maria</i>
26.	Vācija	Sv. Mihaila baznīca	<i>Michaeliskirche</i>
27.	Grieķija	Sv. Demetrija baznīca	
28.	Grieķija	Sv. Dāvida baznīca	
29.	Itālija	Dominikāņu klostera Sv. Marijas baznīca	<i>Santa Maria delle Grazie</i>
30.	Itālija	Astoņu baznīcu komplekss Ravenā	
31.	Itālija	Piazza del Duomo katedrāle	<i>Piazza del Duomo</i>
32.	Itālija	Sassi baznīca un vecpilsētas baznīcu komplekss Materā	<i>Parco della Murgia Materana</i>
33.	Norvēģija	Urnes Stave baznīca	<i>Urnes stavkirke</i>
34.	Polija	Koka karkasa pildmūra baznīca Javorā	
35.	Polija	Koka karkasa pildmūra baznīca Svidnikā	
36.	Polija	Vairākas koka guļbūves baznīcas Mazajā Dienvidpolijā	
37.	Rumānija	Moldāvijas reģiona baznīcas	
38.	Rumānija	Nocietinātā baznīca Transilvānijā	
39.	Rumānija	Koka baznīcas Maramures	
40.	Slovākija	Koka baznīcas Karpatu kalnu apgabalā	
41.	Spānija	Romāņu baznīca Vall de Boi	<i>Valle de Bohí</i>
42.	Spānija	Baznīcas Aragonas vecpilsētā	
43.	Spānija	Avilas katedrāle	<i>Catedral de Ávila</i>
44.	Zviedrija	Gammelstades un Luleā baznīcciemī	<i>Gammelstads kyrkstad</i>
45.	Lielbritānija	Kanterburijas katedrāle	<i>Canterbury Cathedral</i>
46.	Lielbritānija	Sv. Margaretas baznīca	<i>church of St. Margaret</i>

47.	Lielbritānija	Durhamas katedrāle	<i>Durham Cathedral</i>
48.	Lielbritānija	Sv. Mārtiņa baznīca	<i>The Church of St Martin</i>

Lai gan vairākām no UNESCO pasaules kultūras mantojuma sarakstā esošajām baznīcām ir koka karkasa vai guļbūves konstrukcijas, lielākā daļa no tām būvētas ar gotiska vai romaniska stila mūra konstrukcijām, ar velvju pārsegumiem. Latvijas Valsts Kultūras Pieminekļu Aizsardzības inspekcijas reģistrā [151] uzskaitītas 263 baznīcas, liela daļa, no kurām būvētas masīvu mūru konstrukcijās. Ar promocijas darbā izstrādāto metodoloģiju kā papildus analizējamus objektus var minēt klosterus, rātsnamus, nocietinājuma sienas, pilis un citas ēkas ar mūra velvju pārsegumiem.

Mūra pārsegumu aprēķini, lietojot ģeometriski idealizētu modeli, ir izplatīta prakse inženieraprēķinos rekonstrukciju vajadzībām. Aprakstot mūra pārsegumu ģeometriju ar proporciju un ģeometrisko attiecību metodi, tiek idealizēta velvju ģeometrija, kas rada mūra pārseguma čaulu ģeometrijas izkropļojumus aprēķina modelī un noved pie būtiskām aprēķina modeļa un reālās konstrukcijas neatbilstībām. Telpisku liektu virsmu modelēšana no ģeometriskiem uzmērījumiem ne tikai prasa ievērojamu darbietilpību, bet arī noved pie idealizācijas izkropļojumiem. Modernas virsmas skanēšanas tehnoloģijas, pielietojot trīs dimensiju lāzerskanerus, ne tikai izslēdz virsmas ģeometriskās interpretācijas, bet arī sagatavo skanēto virsmu telpisku digitalizētu modeli, kuru ērti transformēt datoraprēķinu modelī. Koriģējot skanēšanas punktu distances, var panākt inženieraprēķinos pieņemamu konstruktīvā modeļa precizitāti. Pašlaik plaši tiek lietota trīsdimensiju skanēšana, lai veidotu ēku un būvju trīsdimensiju ģeometrisko modeli. Skanēšanas rezultātu pielietošana galvenokārt paredzēta virtuālu vizualizācijas modeļu izveidei, vēsturiskajai izpētei, stāvokļa fiksācijai un uzmērījumu precizēšanai.

Analizējot mūra konstrukciju darbību un projektējot mūra pārseguma rekonstrukcijas, bieži tiek izmantots mūra homogenizēts, lineāri elastīgs, raksturojums. Šāda vienkāršota pieeja ir pieļaujama un sevi attaisno jaunbūvēs un mūra masīvos bez defektiem. Tuvu mūru nestspējas robežai mūra elastības raksturlielumi neatbilst lineārai diagrammai, jo būtisku efektu rada javas plastiskās īpašības un elementu kontakta nevienmērība. Lielos vertikālos mūra masīvos iekšējie spriegumi pēc lieluma nav salīdzināmi ar mūra materiāla nestspējas robežu. Lielos mūra masīvos spriegumi sasniedz 40-50% no mūra nestspējas. Mūra pārseguma čaulā iekšējie spriegumi ir tuvi mūra materiāla nestspējas robežai un sastāda 70-90% no mūra nestspējas. Plasticitātes un spriegumu relaksācijas efekti rada velvju formas liekuma ģeometriskas izmaiņas, kas noved pie iekšējo spriegumu pieauguma velves konstrukcijā. Modelējot velvju darbību, jāievērtē vēsturisko mūru kaļķu javas plastiskās

īpašības un to ietekme uz paliekošajām deformācijām. Vienkāršota materiālu īpašību definēšana var novest pie kļūdainiem velvju pārseguma rekonstrukcijas risinājumiem. Mūsdienu praksē mūra konstrukcijas pieņemts modelēt ar materiāla homogenizācijas paņēmieni, vispārinot materiāla īpašības, plasticitātes un materiāla lokālā sabrukuma efektus, tos ietverot izotropā materiāla modelī.

Lai analizētu esošus mūra pārsegumus, nepieciešams izstrādāt metodi automatizētai mūra velvju uzmērījumu veikšanai un datoranalīzei, kā arī izstrādāt metodoloģiju vēsturisku mūra velvju pārsegumu drošības analīzei.

Darba mērķi un uzdevumi:

- a) Izveidot metodoloģiju mūra velvju uzmērījumu veikšanai un datoranalīzei:
 - a. aprobēt lāzera skanēšanas metodi mūra velvju uzmērījumu veikšanas automatizācijai;
 - b. novērtēt datu apstrādes algoritmus, lai efektīvi transformētu mūra ēku virsmu lāzera skanējuma datus, digitāla virsmu modeļa iegūšanai;
 - c. aprobēt iegūto virsmu transformācijas ceļus būvkonstrukciju datoraprēķina programmām;
 - d. izvēlēties mūra materiālu testa metodes materiālu īpašību noteikšanai;
 - e. definēt mūra materiālu īpašības būvkonstrukciju datoraprēķiniem.
- b) Izstrādāt metodoloģiju, lai analizētu vēsturisku mūra velvju pārsegumu drošību:
 - a. analizēt esošas ēkas mūru pārsegumu datoraprēķina programmā, modelējot to nestspējas robežstāvokli;
 - b. izvērtēt mūra velvju balstu deformāciju ietekmi uz velvju noturību un ekspluatācijas drošību;
 - c. veikt piedāvātā aprēķina modeļa validāciju ar Rīgas Doma baznīcas plaisu monitoringa datiem, analizējot mūra materiālu un ekspluatācijas slogojumu;
 - d. analizēt mūra velvju esošo deformēto stāvokli, salīdzinot to ar deformāciju monitoringa datiem;
 - e. veikt vēsturisku mūra pārseguma konstrukciju nestspējas un noturības modelēšanu ar būvkonstrukciju aprēķina programmām.

Aizstāvēšanai tiek izvirzīts:

- a) Inversās inženierijas metodes piemērošana esošu mūra pārseguma būvkonstrukciju analīzei;
- b) Drošas ekspluatācijas robežas prognozes metode, analizējot velvju pārseguma plaisu monitoringa datus.

Darba zinātniskā novitāte:

Promocijas darbā izstrādātā metodoloģija dod iespēju veikt mūra konstrukciju analīzi un plānot rekonstrukcijas darbus esošo ēku saglabāšanai. Metodoloģija ļauj ievērtēt esošu mūra ēku ekspluatācijas apstākļus un modelēt mūra pārsegumu ekspluatācijas drošumu. Metodoloģija aprobēta Rīgas Doma baznīcā un paver iespējas citu vēsturisko ēku analīzei. Rīgas mērogā šī metodika var tikt izmantota viena desmita, Latvijas mērogā viena simta, bet Eiropas mērogā vairāku tūkstošu, vēsturisku mūra celtnu būvkonstrukciju stāvokļa analīzei.

Promocijas darba ietvaros pirmo reizi tiek analizēti velvju pārsegumi telpiskā modelī, pielietojot augstas precizitātes virsmas ģeometriju. Darbā izmantoti būvzinātnes sasniegumi un Latvijas būvkonstrukciju projektēšanas praksē, plaši lietota datoraprēķinu programmatūra, kas ļauj ievērtēt mūra ekspluatācijas apstākļus un modelēt esošu ēku konstrukciju darbību. Ārējās iedarbes, ekspluatācijas ietekme un mūra materiālu ilglaicīgie efekti pasliktina ēku būvkonstrukciju stāvokli un rada ekspluatācijas drošības samazinājumu.

Lai gan Latvijā un pasaulē liela vērtība tiek pievērsta vēsturisku mūra ēku izpētei un modelēšanai, tomēr, lai sniegtu pilnīgu analīzi un plānotu rekonstrukcijas darbus, nepieciešams komplekss risinājums, kāds tiek piedāvāts šajā darbā.

Šajā promocijas darbā trīsdimensiju lāzerskanēšanas tehnoloģija izmantota, lai no digitalizēta virsmas punktu mākoņa iegūtu mūra pārseguma datoraprēķina modeli. Pasaules praksē ir plaši izplatīta inversā inženierija (*reverse engineering*), taču tā netiek pielietota mūra konstrukcijas būvju analīzē. Ģeometrisku modeļu izveide no lāzerskanējuma datiem tiek pielietota mašīnbūvē, stomatoloģijā un dažādu izstrādājumu virsmu digitalizācijā. Lāzera skanējuma virsmas uzmērīšanas precizitāte dod iespēju veikt liektu ēku un būvju virsmu uzmērīšanu desmit reižu precīzāk, salīdzinot ar telpiski liektu virsmu optisko uzmērīšanu. Latvijas apstākļos vēsturiskās mūra ēkas, tilti un velves skanētas, lai iegūtu digitalizētu virsmas modeli rekonstrukcijas vai stāvokļa fiksācijas nolūkos.

Mūra pārseguma deformēto stāvokli, modelējot elastīgajā materiāla stadijā, nevar ievērtēt nevienmērīgu balstu deformāciju efektus, tādēļ izstrādātas materiālu īpašību noteikšanas metodes nelineāriem aprēķiniem.

Pasaules praksē mūra materiālu īpašību modelēšana ir plaši pētīta, tādējādi paverot iespēju aprakstīt mūra materiāla īpašības gan ar diskretizācijas [skatīt 3.1.4. nodaļu], gan ar materiāla homogenizācijas paņēmieni [skatīt 3.1.5. nodaļu]. Literatūrā plaši aprakstīti mūra defekti un to ietekme uz mūra materiālu fizikālajām īpašībām. Mūra konstrukcijas modelētas, pielietojot materiāla homogenizācijas metodi, ievērtējot ilglaicīga slogojuma plasticitātes efektu. Metodes papildus iespējas ir analizēt vēsturiskas mūra ēkas būvniecības etapu un ekspluatācijas laikā veikto pārbūvju ietekmes izvērtēšanu uz spriegumstāvokli mūra masīvos un pārsegumos. Šī darba ietvaros pētīta Rīgas Doma baznīcas būvniecība pa vēsturiskajiem etapiem, lai pēc iespējas precīzāk analizētu mūra daļu darbību esošajā deformētajā stāvoklī.

Rīgas Doma automātiskā monitoringa sistēma reālajā laika režīmā ļauj izvērtēt deformāciju attīstības tendences un pievērst uzmanību zonām ar augstāku deformāciju dinamiku. Metode ļauj precizēt esošo monitoringa programmu, analizēt iegūtos rezultātus, kā arī pamatot papildus izpētes nepieciešamību.

Darba praktiskais pielietojums:

Metodoloģija paver iespējas uzmērīt, modelēt, plānot bojājumu monitoringu, plānot rekonstrukciju un izvērtēt esošu ēku ekspluatācijas drošību:

- a) Līdzšinējā prakse ir ģeometrisku modeļu izveidē, velvju pārsegumu datoraprēķina modeļos ir ģeometrisku proporciju interpretācija, veicot optiskus mērījumus plāna koordināšu tīklā. Lāzerskanēšanas uzmērījumi izslēdz datu interpretācijas un apstrādes kļūdas manuālas datu apstrādes rezultātā. Lāzerskanēšanas datu izmantošana ģeometrisku modeļu definēšanā ļauj paaugstināt modeļa precizitāti un ietaupa cilvēku resursus. Atkarībā no uzmērāmā objekta sarežģītības uzmērījumu darbietilpības ietaupījums vērtējams no 50% līdz 80% robežās.
- b) Metodoloģija ļauj sagatavot objekta ģeometriskos datus rekonstrukcijai un analizēt patreizējo spriegumstāvokli konstrukcijā, modelēt rekonstrukcijas efektus un izvērtēt tās efektivitāti.
- c) Metodoloģija ļauj analizēt mūra pārseguma un vertikālās konstrukcijas deformētā stāvoklī, kā slogojumu pielietojot reāli konstatētos ekspluatācijas apstākļus. Kā nozīmīgāko esošu ēku mūra pārsegumu slogojumu pieņemot pamatu nevienmērīgās deformācijas, temperatūras izmaiņas un sadalījumu konstrukciju šķērsgrīzumā un mūra materiāla degradācijas efektus.

Metodes turpmāka attīstība:

- a) rezultātu analīze, precizējot monitoringa programmu un mūra materiālu papildus izpētes nepieciešamību;
- b) rekonstrukcijas datormodelēšana un iegūto pastiprinājuma efektu izvērtēšana, sniedzot rekomendācijas rekonstrukcijas projekta izstrādei;
- c) ekspluatācijas apstākļu izmaiņu simulācija datoranalīzes programmā, ar mērķi izvērtēt avārijas slogojuma efektus un citas ekspluatācijas apstākļu izmaiņas.

Darba aprobācija un publikācijas

Datoraprēķina modeļa validācijai tiek izmantoti Rīgas Doma plaisu atvēruma monitoringa dati. Rīgas Doma baznīcā uzstādīta plaisu monitoringa sistēma secīgi veic plaisu mērījumus 22 punktos. Plaisu dinamikas novērtēšanai tiek veikti plaisu atvēruma mērījumi automātiskā režīmā ar divu stundu intervālu. Analizējot Rīgas Doma baznīcas mūra pārseguma slogojumu un plaisu pārvietojumus, tiek prognozēta ēkas pārseguma ekspluatācijas drošība. Pamatojoties uz uzkrātajiem monitoringa datiem, aprobēts datoraprēķina modelis un analizēts slogojums. Materiālu īpašības datoraprēķina modelī pieņemtas no veiktajiem materiālu testiem. Datorsimulācijā ievērtēts mūra pārseguma slogojums un tā efekti.

Kā izejas dati izmantoti:

- a) būvniecības gaitas vēsturiskā izpēte izmantojot VKPAI arhīvus;
- b) konstruktīvo elementu būvniecības tehnoloģiju vēsturiskā izpēte [53];
- c) rekonstrukciju ieviesto konstruktīvo izmaiņu izvērtējums;
- d) konstruktīvo elementu tehniskā stāvokļa izpēte [102];
- e) konstrukciju būvmateriālu laboratoriskā izpēte [102];
- f) mūrjavu ķīmiskā analīze [109];
- g) ēkas mikroklimate monitoringa dati [108];
- h) konstruktīvo elementu ģeometrijas lāzerskanējums [70; 71];
- i) konstruktīvo defektu fiksācija un uzmērījumi [8; 81];
- j) pamatu balsta apstākļu, pamatu izpēte [81; 101; 122];
- k) inženierģeoloģiskā izpēte [101; 122];
- l) gruntsūdens svārstību monitoringa dati [79];
- m) konstrukciju slogojuma pētījums;
- n) konstrukciju radara zondēšanas dati [81];

- o) sēšanās monitoringa dati [73];
- p) plaisu atvēruma monitoringa dati [35].

Analizējot visus apkopotos testus un izpētes, modelēts ēkas pārseguma deformētais stāvoklis un analizēta tā ekspluatācijas drošība. Izpētes un monitoringa analīze salīdzināta ar esošā pārseguma bojājumiem un to dinamiku. Pētījuma starprezultāti prezentēti sekojošās zinātniskajās konferencēs, rakstus publicējot zinātnisko rakstu krājumos:

a) Bondars K., Korjakins A., Improved deformation mechanism of masonry vault// MuRiCo3, Mechanics of masonry structures strengthened with composite materials Università IUAV di Venezia. 2009. gada 22.-24. aprīlis. Itālija, Venēcija. - Konferences rakstu krājums, 23.-23. lpp.

b) Korjakins A., Bondars K., Definition the safe exploitation limits of Dome cathedral by monitoring of support deformation and existing cracks// „Наука и инновации в строительстве SIB 2008”, 2008. gada 10.-15. novembris, Krievija, Voroneža. – Konferences rakstu krājums, 177.-182. lpp.

c) Bondars K., Korjakins A., Mūra velvju stabilitātes novērtēšanas monitoringa kritēriju izstrāde// 49. RTU studentu zinātniski tehniskā konference, 2008. gads, Latvija, Rīga. - RTU zinātniskie raksti. 2. sēr., Būvzinātne. - 9. sēj. (2008), 25.-36. lpp.

d) Bondars K., Korjakins A., Safety criteria development on groined masonry arch stability initiated by structure support deformations// 4th International Specialty Conference on The conceptual approach to structural design. Dept of Architecture & Construction, Università IUAV di Venezia. 2007. gada 27.-29. jūnijs. Itālija, Venēcija. - Konferences rakstu krājums CD, 12. lpp.

e) Bondars K., Korjakins A., Influence of deformation at a heritage building support on stability of groined masonry arch// “Computational Civil Engineering 2007”, 5th International Symposium, 2007. gada 25. maijs, Rumānija, Iași. – Konferences rakstu krājums, 39.-54. lpp.

f) Bondars K., Korjakins A. Modelling of structural masonry groined arch// Starptautiskā būvniecības konference “Būvniecība ‘05”. 2005. gada 26.-26. maijs, Latvija, Jelgava, - Konferences rakstu krājums, 21.-26. lpp.

Promocijas darba rezultāti ziņoti starptautiskās zinātniskajās konferencēs:

a) Korjakins A., Bondars K., Definition the safe exploitation limits of groin vault in heritage masonry structures// International conference on civil engineering design and

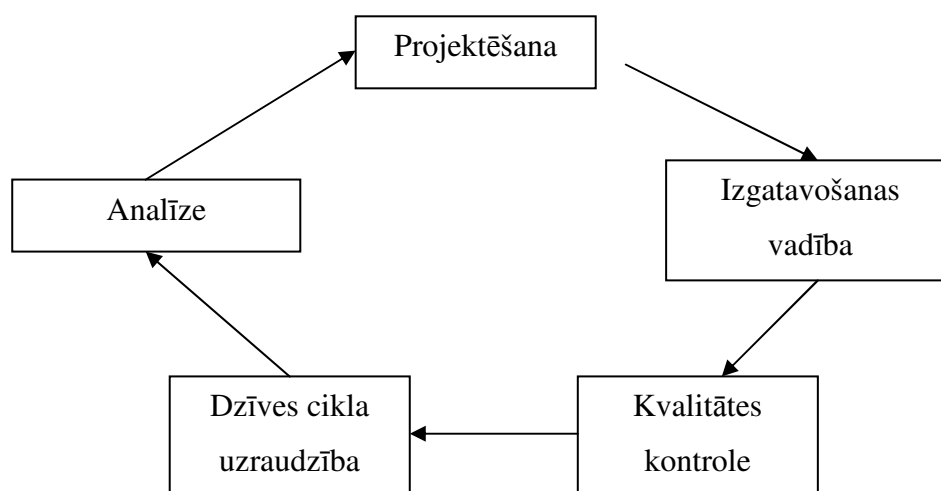
construction "Eurocodes - science and practice", 2010. gada 9.-11. septembris. Bulgārija, Varna. - Konferences rakstu krājums, 327.-332. lpp.

b) Bondars K., Korjakins A., Elaboration the model of heritage groined masonry arch for definition the safe exploitation limits// 10. starptautiskā konference, „Modern building materials, structures and techniques”, 2010. gada 19.-21. maijs. Lietuva, Viļņa. - Konferences rakstu krājums, 868.-873. lpp.

2. INVERSĀS INŽENIERIJAS PIELIETOŠANA BŪVKONSTRUKCIJU ANALĪZĒ

Promocijas darba ietvaros aprobēta inversās inženierijas pielietošana esošu ēku konstrukciju analīzē. Inversā inženierija nodrošina objekta pilnu dzīves cikla analīzi, ar mērķi uzlabot tā īpašības sekojošajiem izstrādājumiem.

Inversā inženierija plaši pielietota rūpniecībā, nodrošinot pilnu detaļu izstrādes un uzlabošanas ciklu, nodrošinot ekspluatācijas izmaiņu atgriezenisko saiti no dzīves cikla uzraudzības, sk. 2.1. attēlu.. Detaļu izstrādē plaši lietotā automatizētā sistēma CAD/CAE/CAM/PLM ietver detaļas projektēšanu – CAD (*Computer Aided Design*), detaļu datoraprēķinus – CAE (*Computer Aided Engineering*), detaļu datorizētu izgatavošanas vadību – CAM (*Computer Aided Manufacturing*) un detaļu pēcizgatavošanas un īpašību izmaiņu ilgstošu kontroli ar mērķi uzlabot izstrādājumu – PLM (*Product Lifecycle Management*).



Att. 2.1. Mašīnbūves detaļu inversā inženierija nodrošina analīzes atgriezenisko saiti.

Mašīnbūves inversā inženierija nodrošina izstrādājuma dzīves cikla izmaiņu atgriezenisko saiti, lai novērtētu izmaiņas un veiktu uzlabojumus. Inversā inženierija nodrošina arī oriģinālizstrādājumu virsmu ģeometrijas iegūvi to analīzes vai tiražēšanas nolūkos. Šāda prakse tiek pielietota mākslas priekšmetu tiražēšanā, zobu protēžu izgatavošanā, juvelierizstrādājumu izgatavošanā, naftas pārstrādes rūpniecības iekārtu inspekcijā u.t.t.

Saskaņā ar autora pētījumu, mašīnbūves inversās inženierijas būtiskās īpašības:

- a) stacionāri novietota skanējamā detaļa, kustīga skanēšanas iekārta;
- b) augsta skanējuma precizitāte;

- c) tieša sasaiste ar detaļas kvalitātes kontroles datorprogrammām un izgatavošanas tehnoloģiskajām iekārtām;
- d) testa rezultātu ģeometrisko izmaiņu analīze;
- e) specializēts datorprogrammu nodrošinājums nodrošina šauru uzdevumu loku risināšanu.

Inversās inženierijas sastāvdaļas esošu būvkonstrukciju analīzē ir atšķirīgas no izstrādājumu ražošanas un analīzes mašīnbūvē, un to integrācijas līmenis datoranalīzes sistēmās nenodrošina automatizētu datu transformāciju un apstrādi.

Inversās inženierijas aprobācija būvkonstrukciju analīzei tiek nodrošināta ar secīgi sakārtotiem etapiem:

- a) būvkonstrukciju virsmas digitalizācija – 3D lāzerskanēšana;
- b) virsmas skanējuma datu apstrāde, attīrīšana un labošana;
- c) tīkla modeļa izveide;
- d) modeļa transformācija būvkonstrukciju datoraprēķina programmās;
- e) materiāla definēšana, testējot mūra materiālus;
- f) konstrukcijas analīze;
- g) aprēķina modeļa un reālās konstrukcijas deformētā stāvokļa, un bojājumu dislokācijas analīze;
- h) konstrukcijas bojājumu attīstības prognoze, analizējot bojājumu attīstības monitoringa datus;
- i) rekonstrukcijas analīze un iegūto uzlabojumu analīze;
- j) pēcrekonstrukcijas uzraudzība un analīze.

Būvkonstrukciju inversās inženierijas noslēguma etapi atšķiras no mašīnbūves etapiem, būtiskā atšķirīgā pazīme ir iespēja atkārtoti izgatavot mašīnbūves detaļu ar jau uzlabotām īpašībām, turpretī esošo būvkonstrukciju īpašības iespējams uzlabot tikai rekonstrukcijas ceļā.

Izvērtējot inversās inženierijas īpatnības, noteiktas atšķirīgās iezīmes vēsturisko mūra konstrukciju analīzē:

- a) liela apjoma datu savietošana no vairākām skanēšanas stacijām;
- b) plakņu dublēšanās no blakus punktu kopām, radot virsmas atspoguļojumu ar dubultām plaknēm;
- c) skanera tiešajai redzamībai slēptas plaknes;
- d) skaneru stacijas novietojums grīdas līmenī, nenodrošinot pilnīgu virsmu skanējumu;
- e) manuāla modeļa korekcija, dzēšot apdares slāņus un interjera elementus;

- f) manuāla modeļa korekcija, modelējot slēptās plaknes;
- g) būvkonstrukciju analīzes programmu datu importa formātu neatbilstība;
- h) būvkonstrukciju datoranalīzes programmu modeļa izmēra ierobežojumi;
- i) lielāks skanējuma tīkla dalījums un zemākas prasības precizitātei;
- j) deformētās formas atkārtotas ģeometriskās inspekcijas automātiska analīzes iespēja;
- k) materiāla neviendabība un īpašību izkliede;
- l) konstruktīvo materiālu iekšējie defekti.

Līdzšinējā prakse ģeometrijas ieguvei esošu būvkonstrukciju analīzē raksturojama kā darbietilpīga uzmērījumu veikšana, pielietojot optiskos instrumentus. Latvijas mērogā ir zināmi precedenti, kuros esošu ēku un būvju virsmu ģeometrijas ieguvei izmantoti 3D lāzera skaneri [72]. Šie dati izmantoti būvju arhitektonisko elementu uzmērījumiem, ģeometrijas ieguvei rekonstrukcijas telpiskai plānošanai un datoraprēķinu modeļu ģeometrijas precizēšanai.

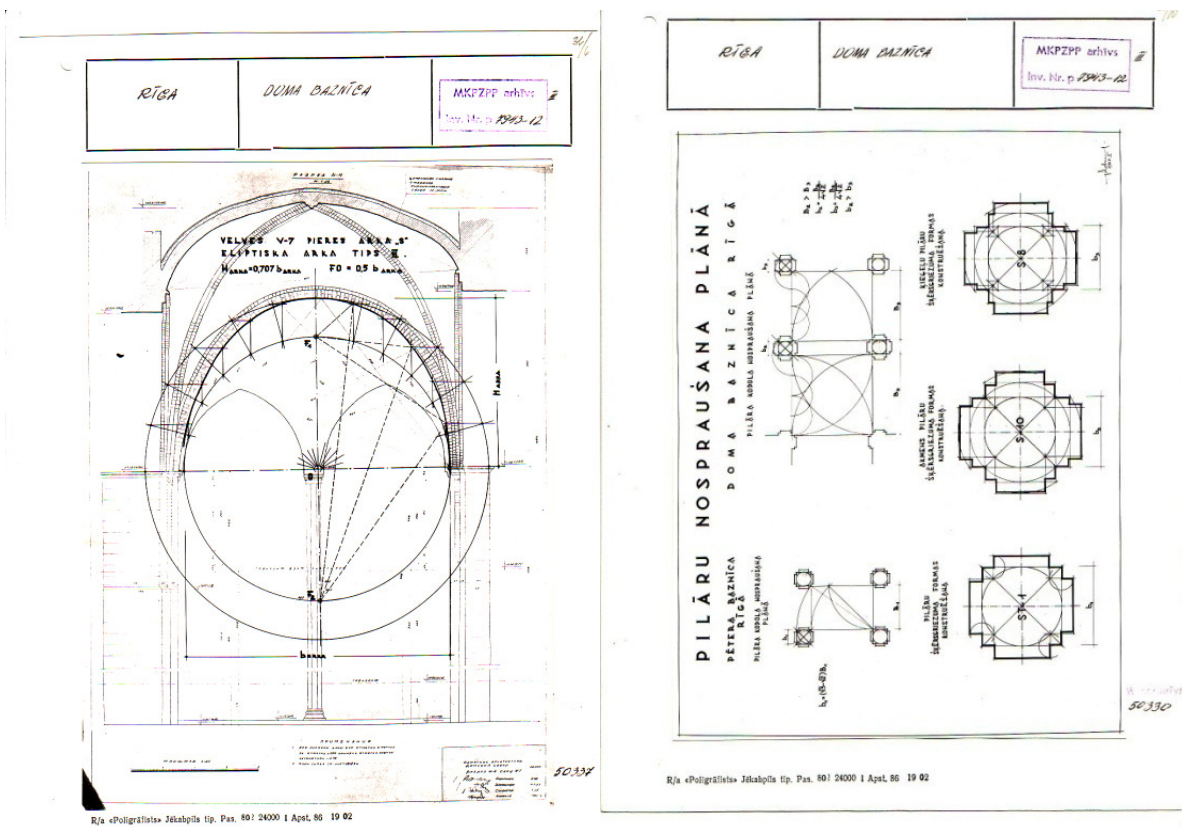
Promocijas darbā izstrādāta 3D lāzerskanēto esošo ēku virsmu transformācija datoraprēķinu modelī, pielietojot digitalizētu grafisko datu eksportu un importu starp skanēšanas, grafiskās apstrādes un būvkonstrukciju aprēķina programmām.

Esošu būvkonstrukciju virsmas 3D lāzerskanēšana un ģeometrijas datu transformācija par 70-80% samazina būvkonstrukciju analīzes modeļa izstrādes laiku un paaugstina modeļa ģeometrisko precizitāti.

Līdzšinējā ģeometrijas ieguve būvkonstrukciju aprēķiniem Rīgas Doma baznīcā balstīta uz optiskiem uzmērījumiem un ģeometrisko proporciju interpretāciju.

2.1 Optisko instrumentu uzmērījumi

1963. gadā Rīgas Doma baznīcas velvju proporcijas uzmērītas un veikti mēģinājumi piemeklēt šai ģeometrijai atbilstošas proporcijas. Šie proporciju meklējumi noveda strupceļā, jo tika konstatēts liels skaits dažādu ģeometrisko proporciju. Lai izmantotu šos datus analītiskā aprēķinā, būtu bijusi jāievieš vienota proporciju sistēma, kas radītu ģeometriskā modeļa kļūdu. Ģeometriskās kļūdas ietekme uz analītiskā aprēķina rezultātiem liktu apšaubīt aprēķina atbilstību reālās ēkas darbības modelim.



Att. 2.2. Ģeometriskās formas meklējumi velvju proporcijām. VKPAI arhīva Nr. 7943-12.

Velvju proporciju meklējumi, sk. 2.2. attēlu, analītisku aprēķinu nolūkā 1959. gadā parāda lielu pielietoto proporciju dažādību, izdalot 8 smailu arku proporciju tipus un četrus velvju proporciju tipus. Šis velvju analīzes ceļš novedis pētniekus strupceļā, jo tālāka ģeometriskā modelēšana saistīta ar liela skaita velvju tipu analīzi un savstarpējās ietekmes analītiskiem aprēķiniem.

Atsaucoties uz ievērojamu uzmērīšanas darbietilpību, kas saistīta ar gotisku sakrālo būvju uzmērīšanu, vairāki autori [7; 22] norāda uz optisko uzmērījumu neatbilstību būvkonstrukciju analīzes veikšanai. Nepieciešamās precizitātes nodrošināšanai viņu pētījumos ieteikts lietot fotogrammetriju vai lāzera skanēšanas tehnoloģiju. Fotogrammetrijas augstā precizitāte ir garants ēkas velvju ģeometrijai atbilstoša analīzes modeļa izveidei, taču saistīta ar lielu ģeometriskas modelēšanas darbietilpību.

Optiskās uzmērīšanas īpašību raksturojums:

- liela darbietilpība;
- retināts uzmērījumu tīkls;
- proporciju meklējumi mērījumu interpretācijā;
- virsmu formas idealizācija;
- manuāla datu pārvešana virsmu izveides datorprogrammās;

- f) virsmu raksturīgo punktu uzmērījumi.

Augsta optiskās uzmērīšanas darbietilpība radījusi nepieciešamību pēc alternatīviem uzmērīšanas veidiem un instrumentālā nodrošinājuma. Optisko mērījumu neprecizitātes liekto mūra velvju virsmu uzmērīšanā noved pie aprēķina kļūdas mūra čaulu iekšējo spēku analīzē.

2.2 Lāzerskanēšana, inversās inženierijas virsmu uzmērījumi

Esošu būvkonstrukciju virsmas 3D lāzerskanēšana un ģeometrijas datu transformācija par 70-80% samazina būvkonstrukciju analīzes modeļa izstrādes laiku un paaugstina modeļa ģeometrisko precizitāti.

Terrestiskie lāzerskaneri ir populārs virsmu uzmērīšanas veids daudzās tautsaimniecības nozarēs, kur nepieciešams iegūt objekta virsmas modeli modelēšanai. Lāzerskaneri kombinācijā ar tradicionālām fotogrammetriskām metodēm risina gandrīz visus objektu apstrādes jautājumus, tajā skaitā:

- a) objekta punktu koordinēšana;
- b) objekta ģeometrijas iegūšana;
- c) 3D vektora modelis;
- d) tekstūra;
- e) virsmas modelis;
- f) ortofoto.

Ar lāzerskaneri analizē reālās pasaules objektus un vidi, iegūstot datus par to telpiskiem apveidiem, tekstūru un krāsām. Lāzerskaneris izstaro lāzerstaru uz objektu un mēra distanci no lāzerskanera līdz objektam, lietojot izstarotā stara atgriešanās laiku.

Virsmu lāzerskanēšana plaši tiek lietota virsmu digitāla modeļa izveidei un ģeometrijas ieguvei:

- a) mašīnbūves detaļām;
- b) zobārstniecībā;
- c) mākslas priekšmetiem;
- d) juvelierizstrādājumiem;
- e) dizaina elementiem;
- f) arhitektoniskajiem elementiem;
- g) ēku virsmām;
- h) naftas pārstrādes rūpnīcu inženiertīkliem;
- i) zemes reljefam u.t.t.

Savā pētījumā Kern [75] izmantojis trīsdimensiju lāzera skaneri konstrukciju virsmu digitalizācijai. Henze [58] izmantoja lāzerskanerus virsmu digitalizācijai kultūras pieminekļu konservācijas projektiem.

Promocijas darba ietvaros veikta lāzerskaneru virsmu datu transformācija, ar mērķi šos ģeometriskos datus izmantot precīza ģeometriskā modeļa izveidei būvkonstrukciju datoranalīzes programmās. 2.3. attēlā parādīta punktu kopa, kas raksturo lāzerskanēšanas potenciālās iespējas ēku konstrukciju virsmu digitalizācijai.



Att. 2.3. Rīgas Doma baznīcas 3D modelis no punktu kopām [69].

Skanejuma rezultāts ir vairākas punktu kopas, kuras apvieno kopējā datu modelī. Trīsdimensiju lāzera skaneru ražotāji piedāvā datorprogrammas, kuras nodrošina:

- a) punktu kopu transformāciju no skanera iebūvētās atmiņas uz apstrādes datoru,
- b) dažādu skanēšanas staciju punktu apvienošanu kopējā modelī,
- c) datu apstrādi, radot virsmas plaknes un prezentācijas materiālus,
- d) attālumu mērīšanu starp plaknēm, plakņu slīpumu mērījumus un virsmu laukumu mērījumus,
- e) norakuma piebēruma tilpumu aprēķinu,
- f) ķermeņa skanejuma salīdzināšanu starp divos dažādos laikos veiktu skanejumu,
- g) mērķu identifikāciju, salīdzinot to ar atsauces objektu,

- h) punktu kopu filtrāciju un attīrīšanu no trokšņiem, ar mērķi samazināt kļūdas un piesārņojumu,
- i) digitālās fotogrāfijas uzklāšanu uz punkta kopas,
- j) slēpto plakņu virsmu ģenerēšanu,
- k) plakņu ģenerēšanu, atvērumu izveidi un plakņu tīkla definēšanu,
- l) skanētā objekta griezumam izveidi,
- m) punktu kopu eksports, papildinot to ar tekstūras, krāsas un tamlīdzīgu informāciju.

Leica trīsdimensiju lāzerskanera programnodrošinājums Cyclone 6.0 sniedz iespēju importēt datus arī no citu kompāniju lāzerskaneriem, kā arī nodrošina lielu skaitu grafisko datu apmaiņu standartus, sk. 2.4. attēlu.

Data Export	SCAN HDS2500	SCAN HDS3000	SCAN Scan-Station	SCAN Scan-Station 2	SCAN HDS4500	SCAN HDS6000	REGISTER	MODEL	SURVEY	PUBLISHER	Free VIEWER	VIEWER Pro
AutoCAD DXF R12	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆			◆
Cyclone Object Exchange (COE) format (to AutoCAD, MicroStation via COE Data Transfer)	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆			◆
ASCII (XYZ, SVY, PTS, PTX, TXT, Customized format)	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆			◆
Binary Point Cloud (PTZ)							◆					
BMP, TIFF, JPEG, PNG	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆		◆
Ortho Image, GeoTIFF, TWF (World File)	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆		◆
Sitemap, TruView										◆		
SDNF 3.0 (Intergraph Steel Detailing Neutral File)								◆				
PCF (Alias Piping Component File)								◆				
Leica System 1200								◆	◆			◆
LandXML								◆	◆			◆
Cyclone II TOPO *.cwf & *.pci	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆

Att. 2.4. Datorprogrammas Leica Cyclone 6.0 datu eksporta iespējas [143].

Lāzerskanera pielietošanas priekšrocības, salīdzinot ar fotogrammetrijas metodi [74]:

- a) detalizētāki rezultāti,
- b) augstāka punktu izšķirtspēja,
- c) iegūto 3D punktu (x, y, z, un RGB (red-green-blue) krāsās) pārvaldība,
- d) liela skaita punktu kopas uz skanētās virsmas iegūšana,
- e) izcila tehnika, aprakstot neregulāras virsmas (reljefu, skulptūras),
- f) rezultātu (telpiskās koordinātas) pieejamība ļoti īsā laikā.

Lāzerskanera pielietošanas priekšrocības, salīdzinot ar optiskās uzmērīšanas metodi:

- a) laukietilpības samazinājums, veicot līdzīga apjoma uzmērījumus (50 - 80%),
- b) augsta precizitāte ar regulācijas iespējām (~2mm uz 50m attālumu),
- c) regulējama leņķiskā mērījumu tīkla iestādīšana uz skanējamās virsmas, sasniedzot nepieciešamo mērījuma tīkla izmēru (20x20mm),
- d) cilvēka kļūdas izslēgšana pie mērījumu interpretācijas,
- e) telpiskas ģeometrijas modeļa iegūšana, konvertējot datus starp datorprogrammām.

Lāzerskaneru pielietošanas trūkumi:

- a) augstas tehniskās aparatūras un uzturēšanas izmaksas,
- b) liels izkliedētu punktu daudzums,
- c) apkārtējās vides ierobežojumi (laika apstākļi).

Lāzerskanēšanas produkts ir trīs dimensiju telpā definēta punktu kopa ar katra punkta telpiskām koordinātēm. Apstrādājot šos punktus, iegūstam telpiskus modeļus vai divdimensiju skatus un griezumus. Lāzerskanēšanas papildus informācija ir virsmas tekstūra un krāsa, kuru var uzklāt skanētās virsmas modelim.

Nepastāvot vienotam datu formātam starp lāzerskaneru ražotājiem, virsmas krāsu un tekstūru nevar pārnest starp vizualizācijas un modeļu apstrādes programmām. Datu transformāciju rezultātā, un pārejot uz citiem grafiskās informācijas formātiem, papildus informācija zūd.

Lāzerskanēšanai izvirza mērķi iegūt objekta ģeometrisko un vizuālo informāciju. Promocijas darba ietvaros lāzerskanējuma dati izmantoti virsmu ģenerēšanai, ar mērķi veidot reālajam objektam pēc iespējas tuvu digitālu modeli. Lāzerskanējuma transformācijas konstrukciju datoraprēķinu modelī ir inovatīvs risinājums būvkonstrukciju analīzē, taču plaši pielietots mašīnbūvē. Arhitektonisko objektu dokumentēšana ar lāzerskanēšanas metodi atrisina ne tikai objekta vizualizācijas iespējas, bet arī nodrošina rekonstrukcijai nepieciešamo informāciju un saglabā telpiskus datus par objekta ģeometriju. Papildus virsmu iegūšanai lāzerskanējums nodrošina datus atkārtotai objekta inspekcijai, ar mērķi salīdzināt rekonstruētā objekta ģeometriju ar oriģinālu.

Lāzerskanējuma izmantošana objektu vizualizācijā, prezentācijas materiālu izveidē, tūrisma industrijā, reklāmas industrijā, pilsētas arhitektūras un ēku modeļu izveidē ir šobrīd iespējamie pielietojuma veidi.

Lāzerskanera rezultātu ietekmē gan optiskie, gan ģeodēziskie un fiziskie faktori:

- a) lāzermērīšanas kļūdas,
- b) koordinātu sistēmas definēšanas kļūda,
- c) ģeodēziskā tīkla kļūda,
- d) kalibrēšanas parametri,
- e) subjektīvās operatora un datu apstrādes kļūdas,
- f) meteoroloģiskie faktori – saule, temperatūra,
- g) virsmas atstarošanas īpašības,
- h) konverģences kļūda,
- i) punktu daudzums uz laukuma vienību.

Lāzerskaneru precizitāte ir atkarīga no lāzestara diametra lieluma un lāzestara atgriešanās signāla kvalitātes. Šie faktori spēcīgi ietekmē objekta malu un šķautņu attēlošanu.

Lāzerskaneru mērīšanas kļūdas raksturo:

a) Leņķiskā precizitāte – iekārtas mehānisms lāzera impulsu (stara kūli) pagriež par noteiktu leņķisku lielumu, ko nodrošina ar optisku ierīci vai pagriešanas mehānismu. Leņķiskais pagrieziens nosaka punkta vektora piesaisti telpā. Iekārtas kalibrēšanas kļūda un darbības precizitāte summāri veido leņķiskās piesaistes kļūdu.

b) Attāluma precizitāte – nosaka punkta piesaisti uz lāzera stara. Lāzerskanējošās sistēmas, kas ir balstītas uz attālumu mērīšanu, mēra attālumu ar laiku pēc izejošā signāla vai arī salīdzinot fāzes starp izejošo un ienākošo staru.

c) Izšķirtspēja – skanējuma punktu blīvums uz virsmas nosaka punktu kopas atainoti virsmas detalizācijas pakāpi. Noteicošais parametrs izšķirtspējai ir lāzera punkta izmērs un telpas leņķiskais dalījums.

d) Robežefekti – lāzera staram krītot uz objekta šķautni, veidojas atstarotā punkta nospiedums uz divām plaknēm. Punkta piesaisti skaneris pieņem pēc vidējotā attāluma, radot punktu telpā, kurš nesakrīt ar nevienu no objekta plaknēm.

e) Virsmas atstarošanas spējas ietekme – no dažādas krāsas virsmām lāzera stars atstarojas ar atšķirīgu intensitāti. Izvēloties iekārtu kādas konkrētas virsmas skanēšanai, jāpievērš uzmanība lāzera stara parametriem un krāsai.

f) Apkārtējās vides ietekme. Ar tiešiem saules stariem izgaismotai objekta plaknei pasliktinās atstarošanas īpašības. Saules staru iedarbības rezultātā virsma var zaudēt atstarošanas spējas pilnīgi.

g) Temperatūras ietekme – temperatūra dod mazu ietekmi uz lāzerskaneru darbību, jo attālumi ir salīdzinoši mazi.

h) Atmosfēras ietekme – mērot īsus attālumus, gaismas izplatīšanās ātrums temperatūras svārstību un/vai atmosfēras spiediena dēļ neatstās lielu iespaidu uz mērīšanas rezultātiem. Mērot apstākļos, kad gaisā ir liela tvaika vai putekļu koncentrācija, iespējami rezultāti, kas ir līdzvērtīgi tādiem pašiem efektiem, kā šķautņu un malu uzmērīšanā.

i) Iekšējās izstarošanas avotu ietekme – lāzeri strādā diezgan šaurā frekvenču joslā, tāpēc uztveršanas modulī noteiktā frekvencē būtu jāizmanto signāla filtri. Ja no cita objekta nāk spēcīgi izstarojumi (saules gaisma vai mākslīgais apgaismojums), tad ievērojama daļa šo izstarojumu var iziet caur filtru un ietekmēt precizitāti vai pat kopējo darba izpildīšanas rezultātu.

Lāzerstara attālumu līdz objektam tiešā veidā ietekmē stara diverģence (izkliede no viena punkta). Lāzera stars veido nospiedumu uz objekta virsmas, kura izmērs ir atkarīgs no skanēšanas stacijas attāluma līdz objektam. Optimāls darba attālums sastāda 50 – 100m, kur punkta diametrs sasniedz atbilstoši 6 un 13mm [74].

Kļūdu rašanās iemesli, ģeodēziskās piesaistes punktu nenoteiktības dēļ, ir līdzīgi abām šīm uzmērīšanas metodēm. Ieviešot lāzera atbalsta markas, tiek noteikti piesaistes punkti, kurus izmanto punktu kopu savietošanai, tādējādi mazinot ģeodēziskā tīkla piesaistes kļūdu. Ieviešot koordināšu tīklu, tas jāpiesaista kādai no vēsturiskās ēkas sienu plaknēm, tādējādi definējot gan piesaistes tīklu asīm, gan galvenajām nesošajām konstrukcijām. Piesaistot objekta koordinātu atbalsta tīklu globālajai koordinātu sistēmai, skanētos objektus vieglāk apvienot pilsētībūvnieciska mēroga modelī.

Punktu daudzums uz laukuma vienību ir atkarīgs no skanējuma uzdevuma un lāzera skanera iestatījumiem. Skanera izšķirtspēju nosaka gan attālums no skanēšanas bāzes stacijas, gan leņķiskais solis. Skanējot lēzena liekuma velvju pārsegumus, nav nepieciešama augsta izšķirtspēja, toties, skanējot gotiskas velves ar krusta vai zvaigžņu velves ar velvju ribu izvirzījumiem, nepieciešama augstāka izšķirtspēja. [74] Pētījumā norādīts optimālākais punktu savstarpējais attālums uz skanējuma plaknes virsmas - 3 cm plakaniskai virsmai un 1,5cm liektām virsmām.

Datu un rezultātu iegūšanas posmus var sadalīt etapos [74]:

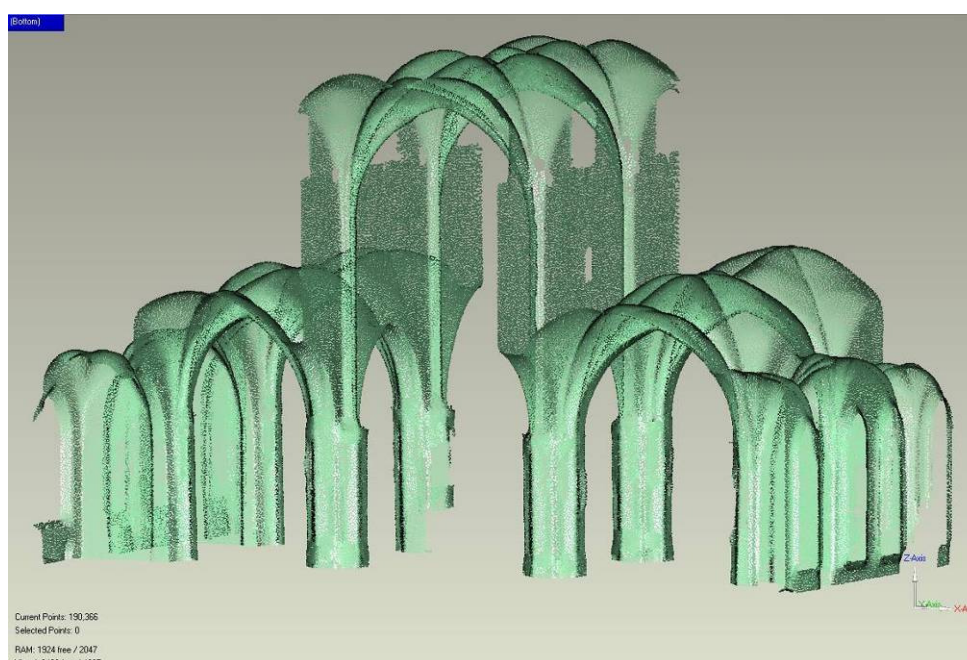
- a) skanējuma plānošana (skanēšanas staciju vietu izvēle, skanējuma blīvuma iestatīšana, punktu kopu pārklāšanās plānošana, koordinātu atbalsttīkla definēšana),
- b) uzmērīšanas darbu veikšana (atbalstpunktu uzmērīšana, virsmu lāzerskanēšana no izvēlētajām staciju vietām),
- c) 3D datu pirmapstrāde (mērījumu izlīdzināšana pret atbalsta punktiem, punktu kopu izlīdzināšana un rediģēšana),
- d) datu sagatavošana lietošanas mērķim (datu transformācija uz nepieciešamajiem grafiskajiem formātiem, mērījumi starp plaknēm, modeļa griezumu izveide un tamlīdzīgi, vadoties no darba uzdevuma).

3D lāzerskaneru rezultāts satur punktu kopu ar xyz koordinātām un katra punkta kopas elementa vizualizāciju ar objekta vai intensitātes krāsām, kas ir saistītas ar lāzeratstarošanas un fotoattēla datiem. Lāzerskanēšanas uzmērīšanas precizitāte ir saistīta gan ar objekta īpašībām, gan ar instrumentu tehniskām iespējām. Precizitāte ir robežās no 3-30 mm, attālumiem līdz 50 m.

2.3 Esošu mūra pārsegumu uzmērīšana

Virsmas lāzerskaneru precizitāte dod precīzu konstrukcijas ģeometrisko modeli un izslēdz modeļu neprecizitātes, aprakstot velves ar funkciju aproksimāciju vai ģeometriskām proporcijām. Virsmas datormodelēšana no skanēšanas datiem vēl joprojām ir attīstības stadijā un nav automātisku instrumentu ēku virsmu skanēšanas datu apstrādei. Lai gan pasaulē plaši pielieto datorprogrammas zem klasifikācijas „inverse engineering”, tām nepieciešami ļoti kvalitatīvi skanējuma dati un tās nav saistītas ar būvkonstrukciju datoraprēķina programmām.

Metodes pamatā ir lāzertālmēra mērījumi horizontālās joslās no bāzes punkta ar definētu vertikālo un horizontālo mērījumu leņķisko soli. Apvienojot skanēšanas bāzes punktus, veidojas 3D ēkas virsmas telpisks modelis.



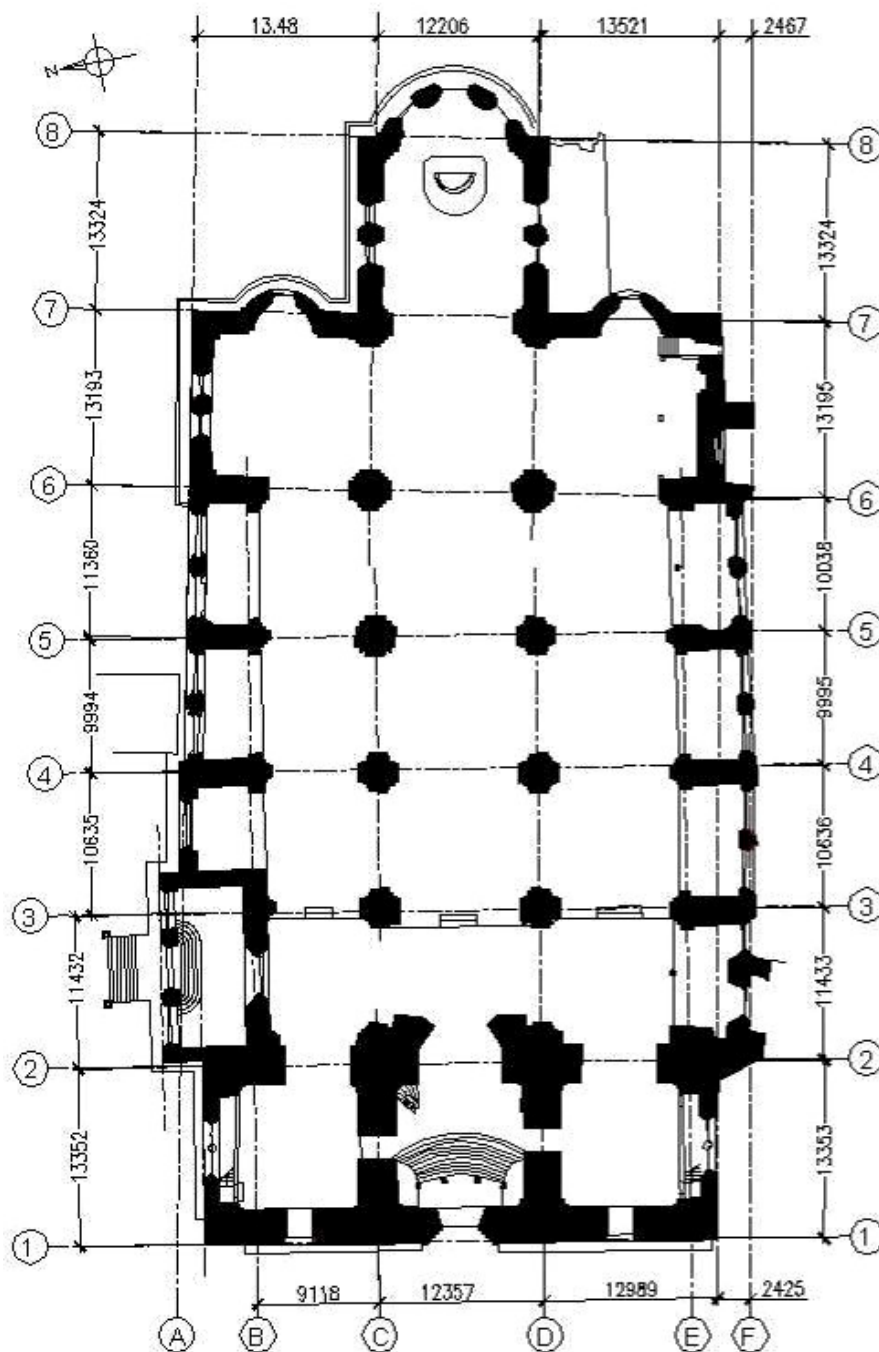
Att.2.5. Rīgas Doma baznīcas daļas lāzerskanējuma punktu kopa.

Paplašinot lāzerskanējuma datu pielietojšanas robežas un izmantojot Kaļiņkas pētījumā [70] iegūto skanējuma punktu kopu, sk. 2.5. attēlu, veidots Rīgas Doma baznīcas mūra konstrukciju virsmas modelis.

Būvkonstrukciju lielā izmēra un virsmu lielā attāluma dēļ skanēšanas precizitāte būtiski samazinās. Slēpto virsmu novietojums pret skanēšanas bāzes stacijas atrašanās vietu rada virsmas punktu iztrūkumu un tam sekojošu virsmas definēšanas apgrūtinājumu. Skanējot plaknes stūrus, daļa no tālmēra lāzera punkta atstarojas no tālākās plaknes tādējādi izkropļojot

attāluma mērījumu. Lai apstrādātu šādus datus, tiek izstrādātas adaptīvu virsmu formēšanas tehnoloģijas, taču detalizēta virsmu formēšana vēl joprojām ir cilvēku roku darbs.

Virsmas skanēšana dod augstas precizitātes telpisku modeli, no kura iespējams iegūt ēkas griezumu praktiski pa jebkuru vietu, kas ir ļoti noderīgi rekonstrukcijas projektēšanā. Šāds telpisks šķēlums ir daudz augstākas precizitātes modelis, kā jebkurš optisku instrumentu uzmērījums vai ģeometriskā virsmu interpretācija. 2.6. attēlā parādīts horizontāls Rīgas Doma baznīcas ēkas griezums ar reālajiem konstrukciju izmēriem.



Att.2.6. Rīgas Doma baznīcas pilna 3D modeļa horizontāls griezums pirmā stāva līmenī.

Lāzerskanējumā rezultātā iegūtais telpiskais ēkas modelis var kalpot gan prezentāciju mērķiem, gan konstrukciju analīzes mērķiem, gan rekonstrukcijas plānošanas mērķiem, gan vēsturisko elementu telpiskas uzmērīšanas mērķiem.

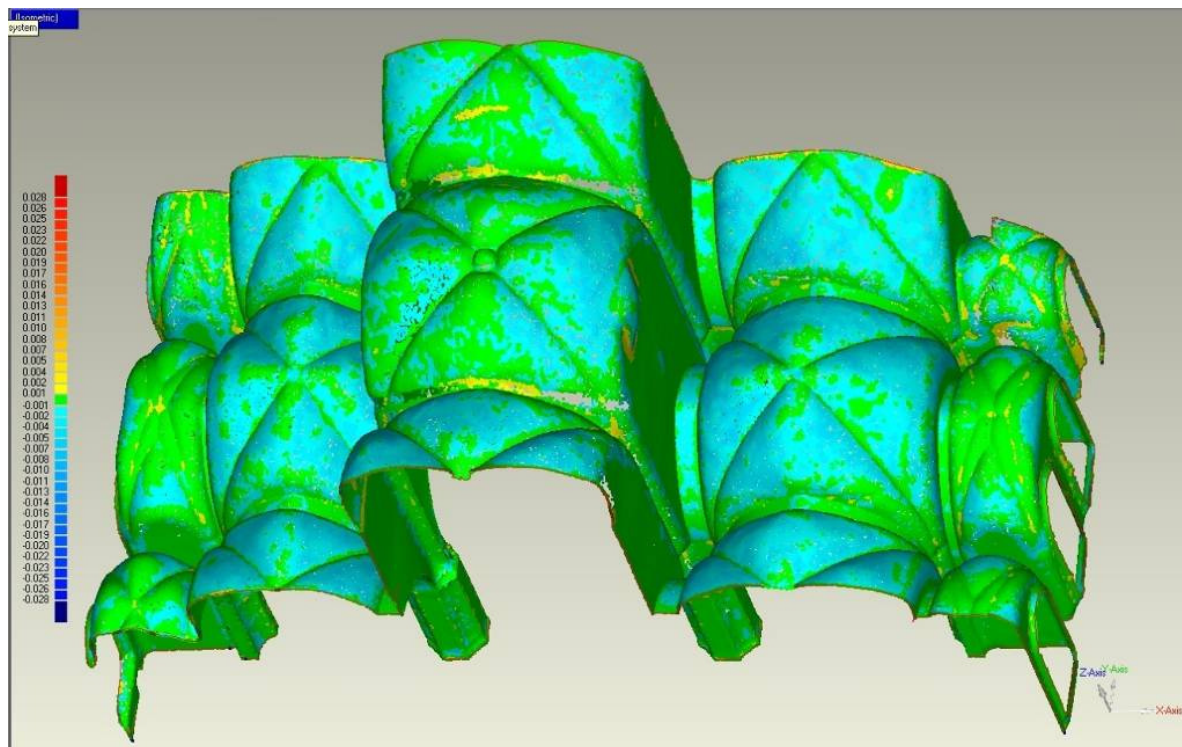
2.4 Uzmērījumu datu apstrāde

Promocijas darbā izstrādāta 3D lāzerskanēto esošo ēku virsmu transformācija datoraprēķinu modelī, pielietojot digitalizētu grafisko datu eksportu un importu starp skanēšanas, grafiskās apstrādes un būvkonstrukciju aprēķina programmām.

Viens no promocijas darba mērķiem ir ģeometriskā modeļa izveide konkrēta mērķa analīzes veikšanai. Lai īstenotu šo mērķi, tiek apskatīta trīsdimensiju lāzerskanēšanas iekārtas datu apstrādes, grafisko datorprogrammu un būvkonstrukciju datoranalīzes datorprogrammu sasaiste. Mašīnbūves inversās inženierijas un dentālās ķirurģijas uzdevumā datorprogrammu izstrādātāji attīstījuši produktu, kurš nodrošina pilnīgu pāreju no virsmu skanēšanas uz modeļa izveidi un tam sekojošu modeļa telpisku izdruku. Mašīnbūves detaļu lāzerskanējuma dati ir pilnīga punktu kopa, kura nodrošina slēgta modeļa izveidi. Apstrādājot lāzera skanējuma datus, būvkonstrukciju aprēķina datormodeļa sagatavošanai nākas saskarties ar interjera detaļām, apdares slāņiem un slēptajām nesošo konstrukciju virsmām. Leica lāzerskanējuma punktu kopas apstrādei tiek pielietota skanēšanas iekārtai piesaistīta datorprogramma Leica Cyclone 6.0 [143], kura nodrošina lāzerskanējuma datu apstrādi atbilstoši konkrētiem mērķiem, tādiem, kā objekta vizualizācijas, inženiertīklu inspekcija, pieminekļu dokumentācija, un tamlīdzīgiem mērķiem. Šī datu apstrādes programma orientēta arī uz ķermeņu skanējumu un naftas pārstrādes iekārtu vadu un tehnoloģijas inspekciju. Iekārtu ražotāji piedāvā lāzerskanējuma datu apvienošanas un apstrādes programmatūru. Ar Leica lāzerskaneriem iegūtos datus apstrādā ar datorprogrammu Leica Cyclone, kura, apvienojumā ar datu transformāciju datorprogrammu Leica CloudWorx [142], nodrošina pilnu pirmapstrādes posmu.

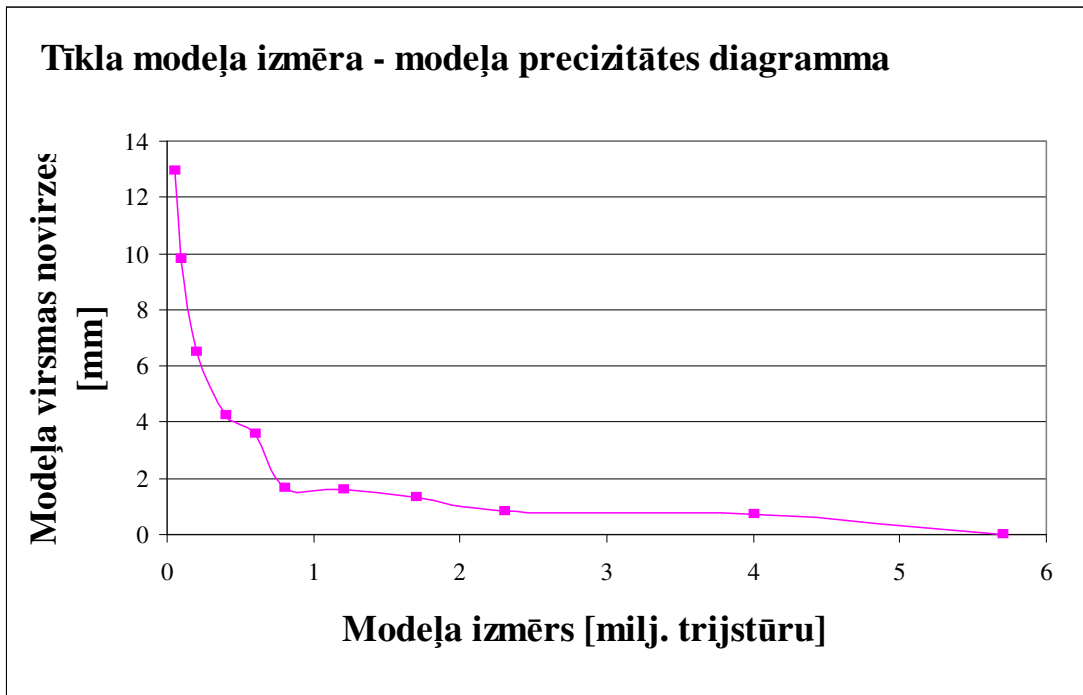
Lai vispārinātu promocijas darba ietvaros izstrādātās metodes pielietojamību, ieviesti kritēriji, sk. 2.5 nodaļu, kuru ievērošana dotu iespējami plašu šīs metodoloģijas pielietojumu, nepiesaistot to konkrētu ražotāju lāzerskanēšanas iekārtām un datu datorapstrādes programmu iespējām. Tendencioza viena ražotāja produktu izvēle un iestrāde šī darba ietvaros izveidotajā metodoloģijā novestu pie sašaurinātām promocijas darba ietvaros izstrādātās metodoloģijas pielietošanas iespējām.

Virsmu apstrādei izvēlēta plaša pielietojuma ģeometriskās modelēšanas datorprogramma Geomagic Studio. Rīgas Doma baznīcas mūra iekšējo virsmu atkāpes analīzi no skanējuma punktu kopas sk. 2.7. attēlā. Veikta atkāpju regulācija ar inversās inženierijas datorprogrammu Geomagic Studio 11, liektām velvju virsmām, definējot atkāpes pielaidi < 5mm.



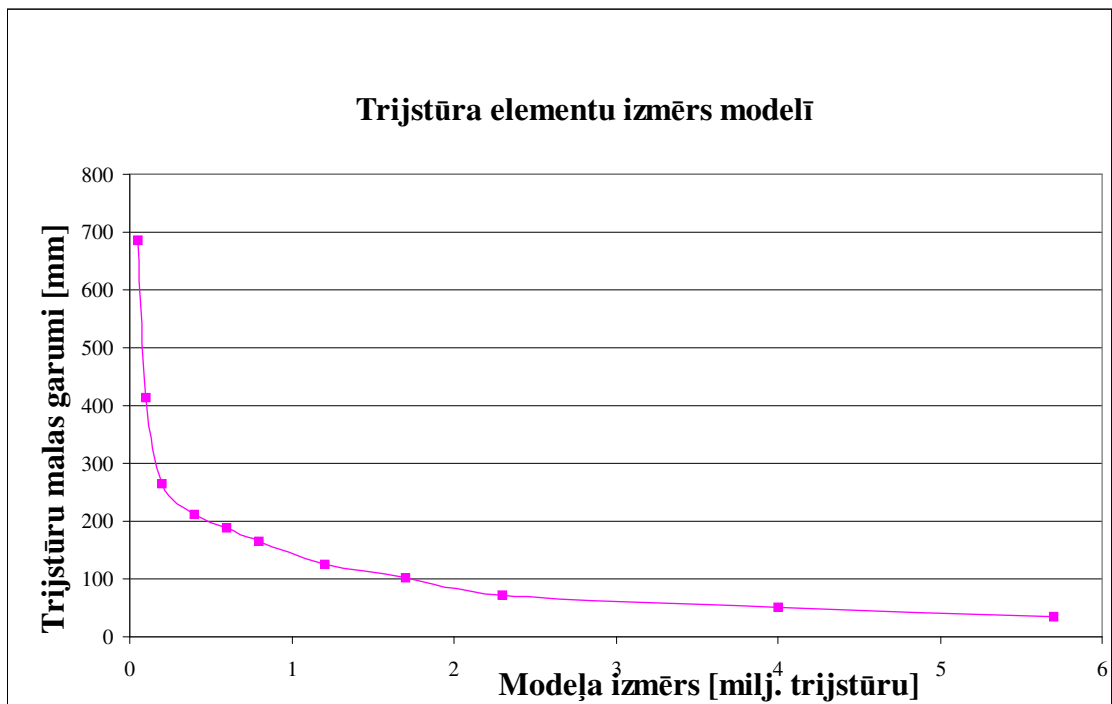
Att.2.7. Tīkla modeļa atkāpes no skanējuma punktu mākoņa.

Kalibrējot virsmas novirzes zem 13,4mm, iegūts tīkla modeļa izmērs 97000 trijstūru. Modelī ietverta ēkas daļa, kura nodrošina velves stūra balsta nevienmērīgu deformāciju analīzi. Ģeometriskā tīkla dalījuma izmēru pieaugums nosaka liektas virsmas modeļa precizitātes samazinājumu. Krusta velves čaulas virsmas modeļa ģeometriskās precizitātes sasaiste ar modeļa precizitāti, sk. 2.8. attēlu. Iestādot tīkla modeļa izmēru, izvērtēts elementu skaita izmaiņu iespaids uz aprēķinu rezultātu precizitāti.



Att.2.8. Modeļa izmēra kalibrēšana mainot tīkla elementu skaitu.

Kalibrējot tīkla modeļa elementa izmērus, analizēta tīkla elementa izmēra ietekme uz modeļa izmēru, sk. 2.9. attēlu. Modeļa izmēra un precizitātes kalibrēšana, mainot tīkla elementu izmēru un sasniedzot būvkonstrukciju datoraprēķinu programmu modeļu limitus.



Att.2.9. Modeļa izmēra un precizitātes kalibrēšanas rezultātu diagramma.

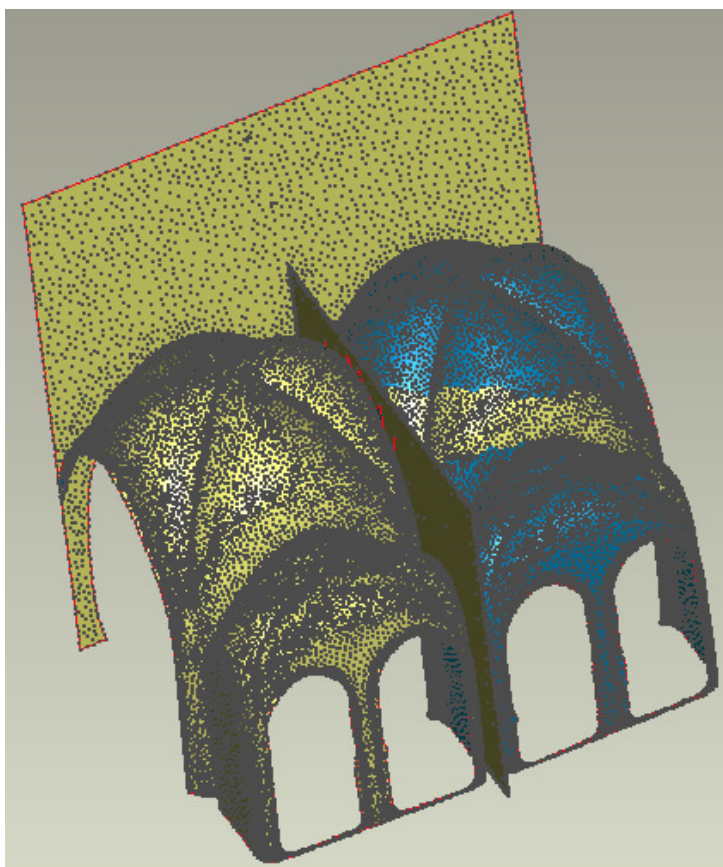
Modeļa precizitātei jānodrošina pietiekama aprēķinu precizitāte, tādējādi novirzes no čaulas virsmas ģeometrijas nedrīkst pārsniegt 1/40 no čaulas biezuma, kas apskatāmajam modelim sastāda 13,4mm. Analītiskā modeļa izmēru ierobežojumi, no vienas puses un virsmas aproksimācijas precizitāte, no otras puses, ir GEM datoranalīzes iespēju robežlielumi.

Promocijas darba inversās inženierijas metode apbēta Latvijas apstākļos plaši lietotām būvkonstrukciju datoraprēķinu programmām, tādām kā Staad Pro V8i un Sap 2000 v14.2. Komerciālās būvkonstrukciju datoraprēķinu programmas nav piemērotas liela apjoma modeļu apstrādei, to limitējošie modeļu izmēri ir:

- a) 225000 elementu – Staad Pro V8i,
- b) 100000 elementu – Sap 2000 v14.2.

Velvju pārseguma modelēšanā ar Staad Pro lietots lineāri elastīga materiāla modelis, trijstūrveida plātnes galīgais elements un hibrīdelementu formulējums.

Analizējot tīkla modeļa trijstūru elementu skaita un precizitātes sakarības, iegūta optimāla modeļa izmērs. Velves atbalsta konstrukcijas balsta deformācijas uzdevumam, sk. att. 2.10, analizēta tīkla dalījuma ietekme uz virsmas modeļa novirzi no skanējuma punkta mākoņa.



Att. 2.10. Velves balsta deformācijas analīzes modelis, Rīgas Doma baznīcas sānu joma fragments.

Ierobežotā piekļuve būvkonstrukciju virsmām nosaka ievērojamu roku darba apjomu skanējuma virsmu apstrādē. Veidojot virsmas modeli būvkonstrukciju datoranalīzes programmām, jāveic arī virsmas slēpto plakņu veidošana. Šis process modelēšanā nosaukts par virsmas „ūdensnecaurlaidības” (watertightness) – modeļa nepārtrauktības nodrošināšanu. Slēpto plakņu veidošana un punktu kopas attīrīšana no interjera objektiem ir viens no darbietilpīgākajiem datu apstrādes etapiem, kura automatizācija ir neliela. Optimizējot virsmas tīklu, ievērojami samazinās ģeometriskās virsmas digitālā modeļa atbilstība ēkas reālajai ģeometrijai. Būvkonstrukciju analīzes datorprogrammu importa apjoma ierobežojums ir šī brīža būtiskākais šķērslis pilna izmēra ēku analīzei.

Promocijas darba ietvaros iespējama neliela ēkas daļas modelēšana, importa apjoma ierobežojumu dēļ. Promocijas darbā aprobētais datu transformācijas ceļš nodrošina skanētas ēkas konstrukciju plakņu transformēšanu uz konstrukciju analīzes datorprogrammām.

2.5 Digitalizētu virsmu transformācija

Promocijas darbā tika salīdzinātas datu transformācijas programmas, parādot transformācijas procesus, datu apjomu un procesam patērēto laiku. Tika izstrādāts un aprobēts datu transformācijas ceļš ar minimālu laika patēriņu un datorprogrammu savstarpēju savietojamību.

Atšķirībā no mašīnbūves inversās inženierijas skanējuma punktu kopas apstrādei izvirzāmas papildus prasības un veicamas papildus manipulācijas datu apstrādes procesā.

Promocijas darba metodes vispārīnājumam uz plašu būvkonstrukciju analīzes datorprogrammu klāstu izvirzīti datu transformācijas kritēriji:

a) lai nodrošinātu plaša spektra trīsdimensionālo lāzerskaneru pielietošanu, datu transformācijas izejas formātam jāsaturs punktu koordināšu dati bez papildus informācijas par virsmas krāsu, tekstūru un tamlīdzīgi. Visu lāzerskaneru ražotāju atbalstīts datu transformāciju formāts *.xyz, nodrošina punktu koordinātu datu importu,

b) punktu kopu apstrādei nepieciešama specializēta datorprogramma, kuras ietvaros var:

- a. dzēst punktus, kuri atrodas ārpus skanējuma plaknēm,
- b. apvienot punktus vienotās plaknēs, mazinot punktu diverģenci pret plakni,
- c. dzēst interjera un apdares slāņus raksturojošos punktus,
- d. aizvietot apšuvuma un interjera detaļu vietas ar konstrukciju virsmu plaknēm,

- e. apvienot atsevišķas plaknes vienotā virsmas elementā,
 - f. kopēt virsmas paralēli skanējuma punktu kopas plaknei,
 - g. griezt plaknes pret aprēķina modeļa robežām vai simetrijas plaknēm,
 - h. transformēt virsmu uz režģa modeli,
 - i. samazināt virsmu raksturojošo plakņu elementu skaitu, nesamazinot virsmu precizitāti,
 - j. apstrādāt liela izmēra grafiskos failus,
 - k. nodrošināt plašu saikni ar būvkonstrukciju datoraprēķinu programmām, atbalstot galvenos datu transformācijas failu veidus.
- c) datu transformācijas formātam un datu saturam jāatbilst inženieraprēķinu praksē plaši lietotu būvkonstrukciju analīzes datoraprēķinu programmu importa iespējām,
- d) konstrukcijas modelim jānodrošina katras konkrētās būvkonstrukciju datoranalīzes programmas iespējas, nepārsniedzot importa elementu apjomu, pielāgojoties galīgo elementu tipiem un nodrošinot analīzes tipu (lineāri elastīgajās robežās, elastīgi plastiskajās robežās vai sabrukuma teorijas robežās),
- e) veicot konstrukciju analīzi, jānodrošina katram analīzes tipam nepieciešamo materiālu raksturlielumu noteikšanas iespēja,
- f) datorsimulācijai jābūt izvirzītam uzdevumam, piemēram, iekšējo spēku pārbaude, deformāciju pārbaude, sabrukuma drošības līmeņa pārbaude un tamlīdzīgi.

2.2. tabulā parādīta datu transformācija starp promocijas darbā aprobētajām programmām, parādot transformācijas procesus, datu apjomu un procesam patērēto laiku. Datu transformācijas process aprobēts, sagatavojot aprēķina modeli Rīgas Doma baznīcas balstu deformāciju aprēķinam.

2.2. tabula

Datu apstrādes un transformāciju procesi

Program-nodrošinājums	Process	Procesa ilgums	Faila formāts	Datu veids	Datu apjoms
Leica Cyclone 6.0	Datu imports no skanera	3 st.	„ZFS”, „SC2” „SCAN”	Punktu kopa	
	Punktu mākoņu savietošana	72 st.			
	Ģeometrijas transformācija	20 min	„XYZ”	Punktu koordinātes	6,5 milj. punktu
Geomagic Studio 9.0	Punktu koordināšu imports	20 sec	„XYZ”		6,5 milj. punktu
	Punktu mākoņu savietošana, ja tas nepieciešams		„WRP”	Telpisks punktu mākonis	6,5 milj. punktu
	Ārpus plakņu punktu izslēgšana	5 sec			6,0 milj. punktu
	Skanējuma trokšņu līmeņa	1 min			3,8 milj.

	pazemināšana				punktu
	Apšuvumu un interjera detaļu manuāla dzēšana	2 st.			1 milj. punktu
	Punktu savietošana plaknē	1 min			1 milj. punktu
	Punktu apvienošana plaknēs	2 min		Telpiskas, savstarpēji savienotas plaknes	5,6 milj. trijstūru
	Atvērumu aizpildīšana, veidojot iztrūkstošās plaknes	5 min			5,6 milj. trijstūru
	Plakņu robežu labojumi	2 min			5,6 milj. trijstūru
	Virsmas tīkla izveide	10 min		Telpiski trijstūri, kas apraksta savietoto plakņu ģeometriju	5,6 milj. trijstūru
	Virsmas tīkla optimizācija	1 min			50 tūkst. trijstūru
	Trijstūra tīkla modeļa transformācija	10 sek.	„DXF, IGS”		50 tūkst. trijstūru
Staad Pro 2007	Telpiska virsmas modeļa imports	10 min	„DXF, STD”	Virisma	50 tūkst. trijstūru
Sap2000	Telpiska virsmas modeļa imports	20 min	„DXF”	Virisma	50 tūkst. trijstūru
	Punktu apvienošana tilpuma elementā	3 st.	„SDB”	Ķermenis	
Solid Works 2008	Telpiska virsmas modeļa imports	15 min	„IGS”	Virisma	50 tūkst. trijstūru
	Punktu apvienošana tilpuma elementā	2 st.	„SLDPRT”	Ķermenis	

Procedūra pakārtota Latvijas tirgū plaši pielietotām būvkonstrukciju aprēķina datorprogrammām, lai izveidotu universālu instrumentu ar pēc iespējas plašāku pielietošanas iespēju. Datu transformāciju procesā bieži ir gadījumi, kad programmnodrošinājuma norādītie datu formāti nenodrošina datu eksportu un importu, kas izpaužas kā dažādas paaudzes programmu vienādu formātu nesaderība. Šī iemesla dēļ ģeometrisko datu imports veikts ar būvkonstrukciju datoraprēķina programmu Staad Pro un caur šīs programmas eksporta iespējām datormodelis transformēts citās būvkonstrukciju datoraprēķinu programmās.

2.6 Datormodeļu izveide būvkonstrukciju aprēķinu programmām

Jebkurā galīgo elementu datoraprēķinu programmas paketē tiek piedāvāts vairāk vai mazāk ērts preprocesors, ar kura palīdzību var nodrošināt aprēķina modeļa izveidi. Šie preprocesori veidoti, lai atvieglotu modeļa izveidi un modeļa parametru ievadi, taču, veidojot sarežģītu konstrukciju modeļus, nereti izdevīgāk izmantot grafiskās programmas. Grafiskajās

programmās veidot rasējumus trijās dimensijās ir daudz ērtāk un parocīgāk. Vairums būvkonstrukciju aprēķinu datorprogrammu atbalsta modeļa ģeometrijas importu vai parametriska modeļa importu.

Plašāk lietotie formāti:

a) *DWG/DXF* ir programmas *AutoCAD* patentēts datņu formāts. Tas tika izstrādāts firmā *Autodesk* vairāk kā pirms 25 gadiem un ir kalpojis par pamata formātu *Autodesk* programmatūrai un uz *AutoCAD* balstītiem produktiem. To pamatā izmanto, lai saglabātu *AutoCAD* vidē izveidoto projektu informāciju. Šis formāts pieder *Autodesk*, tā arī to attīsta un atjauno. Ņemot vērā programmas *AutoCAD* popularitāti, jau ilgu laiku *DWG* formāts kopā ar citu *Autodesk* firmas formātu *DXF ASCII* variantā ir "de facto" standarts *2D CAD* informācijas apmaiņai.

b) *IGES (Initial Graphics Exchange Specification)* ir neitrāls datu formāts, kas ļauj digitālas informācijas datu apmaiņu starp *CAD* sistēmām. Lietojot *IGES*, *CAD* lietotājs var saglabāt datus gan kā karkasmodeļa, gan telpiskas virsmas, gan cietķermeņa formā. *IGES* datu faili tiek uzskatīti par bāzes standartu, ja nepieciešams pārnest virsmu modeļus.

c) *STEP (Standardized Exchange of Product)* - viens no pirmajiem speciāli izstrādātajiem, no konkrētas projektēšanas sistēmas neatkarīgajiem datu apmaiņas standartiem, kas sevī satur ģeometrisko datu informāciju par izstrādājumā ietilpstošajām detaļām, kopsalikumiem un izstrādājumu kopumā.

d) *PARASOLID* (Siemens PLM solutions produktu bāzes matemātiskais kodols) - datu formāts, kas pārnes gan telpiskas virsmas, gan cietķermeņa modeļus. Tā kā vismaz puse no *CAD/CAM/CAE* sistēmas izmanto šo kodolu, datu pārnese šajā gadījumā starp šīm sistēmām notiek bez zudumiem.

e) *STL* ir neitrāls datņu tips, kas raksturīgs *CAD* programmām, un daudzas programmas spēj importēt un eksportēt *STL* datnes, taču šo formātu neizmanto precīzās ģeometrijas pārvešanai. Šis formāts apraksta trīsdimensionāla objekta virsmas ģeometriju ar triangulēta karkasa palīdzību, taču neapraksta krāsu, tekstūras vai arī citus izplatītus *CAD* modeļu atribūtus. *STL* datne apraksta rupju nestrukturētu virsmu, kas sastāv no trīsstūriem, izmantojot Dekarta koordinātu sistēmu. *STL* datnes bieži izmanto datu pārvešanai uz *CAE* sistēmām un prototipēšanas iekārtās.

f) *VRML* (jeb *.wrl*) ir teksta datnes formāts, kurā *3D* poligonu punktus un līnijas apraksta ar visu virsmas krāsu, tekstūrām, tonalitāti, spilgtumu, caurspīdību utt. Daudzas *3D* modelēšanas programmas var saglabāt objektus *VRML* formātā. Šo formātu neizmanto precīzās ģeometrijas pārvešanai.

Kā vispopulārāko ģeometrijas importa formātu galīgo elementu aprēķinu programmās lieto *.dxf (Drawing Interchange Format), bet ķermeņu modeļu importam piemērotāki ir Solid Works (*.sldprt) vai ACIS failu formāti (*.sat). DXF formātu var veidot vairumā grafisko programmu, tādās kā ArhiCad, AutoCad, Micro Station, Visual Draw, Solid Works un citās. Latvijā visplašāk pielietotās būvkonstrukciju aprēķinu galīgo elementu programmas ir Lyra, un Staad Pro, taču šīs programmas nodrošina konstrukciju analīzi elastīgajā un elastīgi – plastiskajā stadijās. Galīgo elementu aprēķina programmas parasti sastāv no datu ievades programmas daļas jeb preprocesora, kura uzdevums ir izveidot aprēķina modeli un aprakstīt tā parametrus, tādus kā elementu tipu, mezglu koordinātes, materiālu, sloojumu, deformācijas lielumu, pārvietojumu ierobežojumus, aprēķinu lielumus un parametrus, un tamlīdzīgi. Šādi sagatavota informācija veido datu ievada failu, kurš var tikt aprēķināts ar aprēķina moduli. Viena no priekšrocībām ir tā, ka šādā preprocesora radītā failā informācija tiek ierakstīta teksta veidā un to var labot, vai pārkopēt no viena, esoša faila otrā. Postprocesors nodrošina aprēķina moduļa izveidotā faila grafisko atspoguļošanu un atskaites sastādīšanu. Viens no svarīgākajiem un darbietilpīgākajiem darbiem ir tieši modeļa izveide un parametru ievads. Tādēļ lietotāja ērtībām tiek izstrādātas dažāda veida modeļa importēšanas iespējas.

Optimizējot virsmas tīklu, ievērojami samazinās ģeometriskās virsmas digitālā modeļa atbilstība ēkas reālajai ģeometrijai. Būvkonstrukciju analīzes datorprogrammu importa apjoma ierobežojums ir šī brīža būtiskākais šķērslis pilna izmēra ēku analīzei. Promocijas darbā piedāvātais datu transformācijas ceļš nav jāuzskata par vienīgo iespējamo. Darbā izstrādātā metodika datu transformācijai ļauj pielietot vairākus ceļus, kuri nodrošina esošu mūra pārsegumu analīzi ar dažādām būvkonstrukciju datoranalīzes programmām.

Liela nozīme ir datorprogrammu spējai izmantot vairākus procesora kodolus, piemēram, Geomagic Studio 11 un SAP 2000 izmanto vairākus procesora kodolus, turpretī Solid Works 2008 un Staad Pro 2008 - vienu no procesora kodoliem. Vairāku procesoru iesaistīšana datu apstrādes, datu transformāciju un datoranalīzes nodrošināšanā ļauj samazināt datu apstrādes laukietilpību.

Modeļu sagatavošana GEM būvkonstrukciju analīzes datorprogrammai Staad Pro

Kā vienu no visbiežāk pielietotajām STAAD Pro programmas iespējām, var minēt trīs dimensiju ģeometrijas importu DXF formātā. Ar AutoCad iespējams izveidot ne tikai līnijelementu modeli, bet arī trīs dimensiju plātņu modeli, to DXF formātā importējot aprēķinu programmā. STAAD Pro atbalsta arī QSE ASA formāta faila modeļu importu un eksportu. Staad Pro paredzēta plātņu un stieņu sistēmu aprēķiniem lineāri elastīgajā vai

elastīgi plastiskajā stadijā. Cietķermeņu modeļu aprēķini šajā datorprogrammā ir visai apgrūtināti un nesniedz ieguvumu pret plātņu elementu modeļiem. Staad Pro ir plaši izplatīta Latvijas būvkonstrukciju projektēšanas birojos un ērti lietojama, tādēļ šīs analīzes programmas pielietošanai mūra konstrukciju aprēķinos pievērsta papildus uzmanību šī promocijas darba ietvaros.

Modeļu sagatavošana programmai LS-Dyna un Nastran.

Šī galīgo elementu aprēķinu programma domāta ķermeņu aprēķinam, modelējot to deformācijas un pārvietojumus laikā. Kā vairumam programmu, arī šai preprocesors veidots pilnīgi atsevišķi no aprēķina moduļa un postprocesora. Programmai ir ne visai parocīgs preprocesors, kurā var veidot telpiskus ķermeņu modeļus, datu ievadīšana jāveic ar koordināšu palīdzību. Lai atvieglotu šo uzdevumu, iespējams importēt cietķermeņu rasējumus no vairākām citām programmām, tādām kā IDEAS, NASTRAN un IGES. Iespējams arī līnijekumu imports DXF formātā, taču tās var kalpot tikai kā vadlīnijas ķermeņa konstruēšanai. Šāda veida programmu galvenais uzdevums ir mašīnbūves elementu vai citu veidu telpisku ķermeņu aprēķini lineāri elastīgajā vai elastīgi plastiskajā stadijā.

Modeļu sagatavošana programmai SAP2000.

Šī galīgo elementu aprēķinu programma paredzēta aprēķiniem lineārajā un nelineārajā stadijās. Tajā izmantota vairāku skatu iespēja, tādējādi atvieglot elementu rasēšanu. Programma domāta nelineāriem modeļu aprēķiniem un tiek plaši pielietota būvkonstrukciju nelineārajos un sabrukuma aprēķinos. Promocijas darba metodikas ietvaros tiek piedāvāts tieši šo datorprogrammu izmantot mūra konstrukciju deformētās stadijas modelēšanai.

Modeļu sagatavošana programmai ABAQUS.

Šī programma ir viena no visuniversālākajām galīgo elementu aprēķinu programmām. Tajā ir vairāki aprēķinu moduļi ar dažādu aprēķinu specializāciju, piemēram, lineāriem aprēķiniem izotropiem materiāliem, tādiem kā metāliem un citiem kristāliskiem vai amorfiem materiāliem. Programmas nelineārie aprēķina moduļi tiek lietoti elastīgu materiālu aprēķiniem, piemēram, gumijas. Daži programmas aprēķinu moduļi domāti biomehānikas aprēķiniem, piemēram, kaula un protēžu mijiedarbības modelēšanai. ABAQUS preprocesors ir visai ērts un nodrošina trīs dimensiju modelēšanu. Ļoti plašas ir modeļa importa iespējas, piemēram, Solid Works (*.sldprt), ACIS formāts (*.sat), I-Deas IGES (*.igs) formāts, STEP (*.step) formāts un VDA-FS formāts. Ķermeņa rasējumu iespējams radīt arī izmantojot

ierastākas programmas, tādas kā AutoCad, veidojot *.dwg formāta failu un tad konvertējot to nepieciešamajā formātā, izmantojot Xchange Works, Link CAD vai citu konvertācijas programmu.

Lai vispārinātu promocijas darba ietvaros izstrādātās metodes pielietojamību, ieviesti kritēriji, kuru ievērošana dotu iespējami plašu šīs metodoloģijas pielietojumu, nepiesaistot to konkrētu ražotāju lāzerskanēšanas iekārtām un datu datorapstrādes programmu iespējām:

a) metodikai jāsaturs lokāli pieejamu 3D lāzerskanēšanas iekārtu datu formātu apstrādes instrumenti vai to apstrādes modulim jābūt instrumenta programnodrošinājuma komplektācijā,

b) virsmu modeļu izveidei jābūt maksimāli automatizētai,

c) tīkla modeļa transformācijai jānotiek caur būvkonstrukciju datoraprēķinu programmu preprocesorā plaši atbalstītu datu formātu,

d) konstrukciju datormodeļa izmēram un veidam jānodrošina aprēķina uzdevuma nosacījumi un prasības,

e) jāizvirza lietojamības robeža būvkonstrukciju datoraprēķina programmām, nosakot risināmā uzdevuma veidu un aprēķina pieņēmumus,

f) būvkonstrukcijas datoranalīzes programmām jānodrošina etapu analīze, ievērtējot būvniecības etapu un rekonstrukcijas ietekmes analīzi.

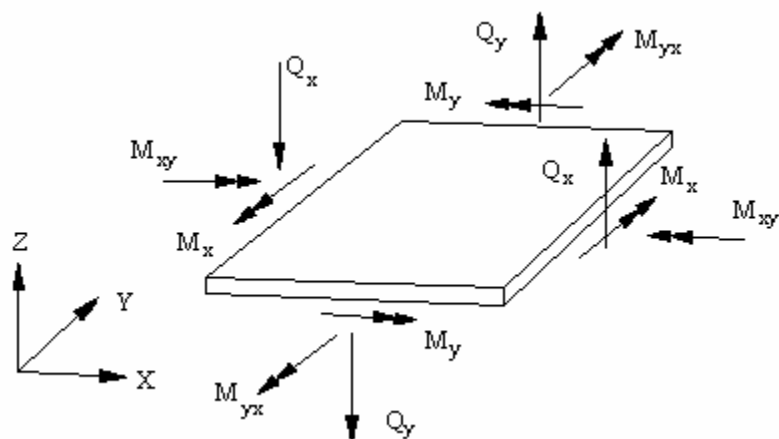
Lai ievērtētu esošu ēku ekspluatācijas slogojumu un analizētu konstrukciju tehnisko stāvokli, bez konstrukciju ģeometriskajiem datiem nepieciešama tāda papildus informācija, kā būvniecības etapi, pielietotā mūru būvniecības tehnoloģija, ēkas iepriekšējo rekonstrukciju efektu izvērtēšana, iekšējie konstruktīvie defekti u.t.t.

Promocijas darbā, esošu mūra pārseguma analīzes nodrošināšanai, izvēlētas būvkonstrukciju datoraprēķinu programmas, liektās pārseguma virsmas aprakstot ar plātņu elementiem. Apjomīgu modeļa analīzes iespēju paver būvkonstrukciju datoraprēķina programma Staad Pro, plātnes elementu definējot ar hibrīdelementa formulējumu [148].

Staad Pro hibrīdelementa formulējums:

Stinguma matricas formulējums balstīts uz sprieguma lauka līdzsvara pieņēmumiem apvienojumā ar elementa un elementa bāzes salīdzinātajām pārvietojumu formām uz elementa robežas. Metode minimizē spriegumu neatbilstību pa elementa robežu. Sprieguma neatbilstība pa elementa robežu un elementā negarantē spriegumu nepārtrauktību. Uz elementa robežām iegūtie blakus elementu spriegumi ievērojami atšķiras galīgo elementu tīkla rupjā dalījumā.

Izkliedes izcelsme saistīta ar virtuālā darba formulējumu un minimizējama ar galīgo elementu tīkla dalījuma smalkāku dalījumu.



2.11. att. Iekšējo spēku formulējums plātnes hibrīdelementam.

Plātnes elementā pieņemts kvadrātisks spriegumu sadalījums plātnes lieces slogojuma gadījumam, sk. attēlu 2.11.

Hibrīdelementa atšķirīgās īpašības:

- pārvietojumu saderība starp viena elementa plakanā sprieguma komponenti un blakus elementa lieces komponenti, kurš novietots leņķī pret pirmo elementu,
- no elementa sprieguma plaknes uz āru vērstu rotācijas stinguma daļu neuzskata par fiktīvu,
- neskatoties uz rotācijas stinguma ievērtējumu, elementi pilnīgi apmierina atrisinājuma konverģenci,
- elementi tiek veidoti kā trīsstūra vai četrstūra plātnes elementi, stūru mezglos definējot sešas brīvības pakāpes,
- plātnes elementi ir taisnas plaknes,
- plātnes elementi var savienoties ar plakaniskiem vai telpiskiem rāmja līnijelementiem, nodrošinot pilnu pārvietojumu saderību,
- no plātnes uz āru vērstu bīdes enerģija hibrīdelementu formulējumā tiek ievērtēta kā plātnes lieces komponente,
- plātnes elementu robežnosacījumi atbilst Puasona stāvoklim, kas ir precīzāki, salīdzinot ar Kirhofa robežnosacījumiem,
- plātnes lieces daļas ievērtēšana nodrošina plānu plātņu un biezu plātņu teorijas atbalstu, nodrošinot hibrīdelementu plātņu plašu pielietojumu. Plātnes biezuma efekts tiek ievērtēts kā bīdes komponente pret plātnes plakni,

- j) plātnes formulējums nodrošina spriegumu vērtības kā mezglu, tā arī jebkurā citā plātnes elementa punktā.

Definējot modeli būvkonstrukciju datoraprēķina programmai SAP 2000, iespējama speciāla uzdevuma modeļa analīze, pielietojot biezo plātņu (Mindlin/Reissner formulējums) teoriju, kas nodrošina elementu šķērsdeformāciju stinguma ievērtēšanu. Integrēšana tiek veikta pa plātnes elementa virsmu un biezumu. Plātnes stinguma integrēšanas formulējumam pielietota mainīga, četru līdz astoņu punktu integrēšana. Spriegumi, iekšējie spēki un momenti elementā tiek iegūti izmantojot divi uz divi Gausa integrācijas punktus, elementa lokālajā koordinātu sistēmā, un ekstrapolēti uz elementa mezglu punktiem. Spriegumu, iekšējo spēku un momentu orientējošā kļūda tiek novērtēta no rezultātu atšķirībām vienā mezglā savienotiem elementiem. Kļūdas lielums parāda dotās galīgo elementu aproksimācijas precizitāti un tiek pielietots galīgo elementu tīkla pārdefinēšanai aprēķinā.

Būvkonstrukciju datoranalīzes programmām jānodrošina telpisku mūra čaulu analīze, ievērtējot stingumu un šķērsspēka komponenti plātnes biezuma virzienā. Objekta pārsegumu analīzei nevar tikt pielietots plānas plātnes vai membrānas elements.

2.7 Analīzes objekta raksturojums

Promocijas darba ietvaros analizēti Rīgas Doma baznīcas mūra velvju pārsegumi. Izmantoti Rīgas Doma baznīcas velvju ģeometrijas lāzerskanējuma un plaisu monitoringa dati. Analizējot esošos konstruktīvos bojājumus, uzmanība pievērsta objekta būvniecības etapiem.

Apliecinot baznīcas visvarenību, bīskaps Alberts pavēlējis uzsākt Rīgas Doma baznīcas būvniecību, sk. 2.12. attēlu, 1211. gada 25. jūlijā, liekot baznīcas pamatakmeni. Rīgas vēsturiskais novietojums upes deltā nosaka arī nosacīti sliktas nestspējas pamatņu esamību būvju pamatnēs. Daugavas deltai pārvietojoties, uzkrājušies upju nogulumu, veidojusies slāņaina pamatnes struktūra. 13gs. būvniecības tehnoloģijas nebija tik attīstītas, lai panāktu vienmērīgu spriegumu sadalījumu zem visas ēkas pamatiem, panākot vienmērīgu spiedienu uz būvpamatni. Lai varētu uzsākt mūra darbus uz zemas nestspējas smilšainām un mālainām pamatnēm, 13gs., kā sagataves klājs, plaši tika lietoti koka pāļu puduri. Ar organiskām vielām piesātināti upju noguluma slāņi un to izplatība Daugavas deltā ietekmējusi apbūvējamās teritorijas Rīgas pilsētā. Šī apstākļa dēļ liels skaits teritoriju tiek apbūvēts tikai šodien, izmantojot mūsdienīgas būvniecības tehnoloģijas.



2.12. att. Doma baznīcas ziemeļu un austrumu fasādes [autora foto]

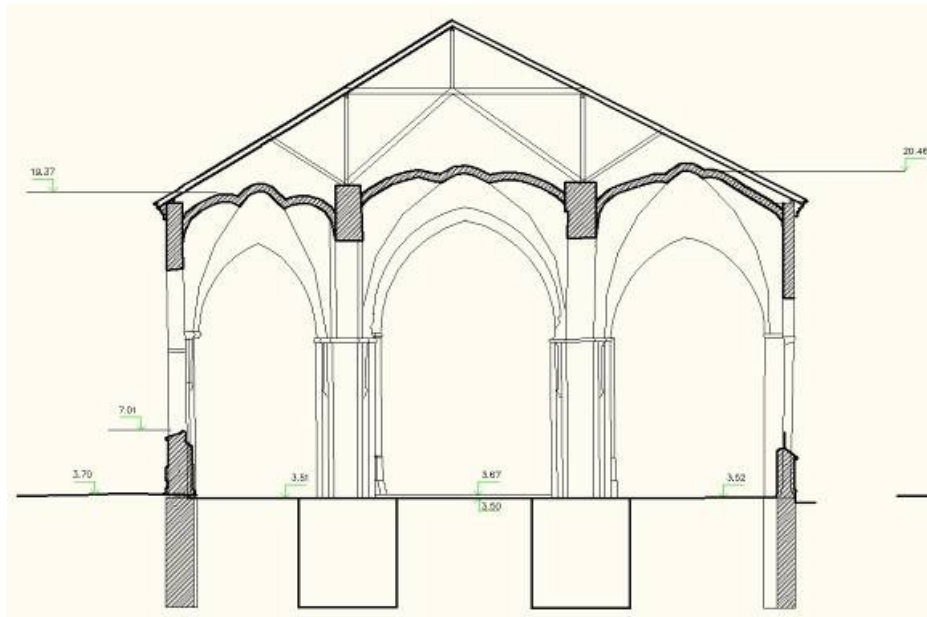
Lai gan tiek uzskatīts, ka koka ilgmūžība zem gruntsūdens līmeņa tiek nodrošināta, pārsniedzot ēku ekspluatācijas laiku, Rīgas Doma baznīcas pamatu apsekošana parāda koka pāļu sliktu tehnisko stāvokli [101]. 800 gadu ekspluatācijas laikā koksne zem gruntsūdens līmeņa pakļauta koka erozijas baktēriju (*Cytophaga-Flavobacterium-Bacteroides (CFB) kompleks* un arī *Pseudomonas Cellvibrio un Brevundimonas grupas*) iedarbei [80], kas būtiski mainījušas pāļu koksnes mehāniskās īpašības. No inženierģeoloģiskās izmeklēšanas firmas „CM GIB” izpētes datiem varam secināt, ka koka pāļu elastības modulis šķiedru virzienā samazinājies vairākus tūkstošus reižu. Vājas nestspējas grunts, piedūņoti smilšu slāņi un koka pamata degradācija zem Rīgas Doma baznīcas pamatiem pēdējās desmitgadēs izsauc nedziestošas sēšanās deformācijas.

Pamatnes dažāda noslogojums un pāļu pamatu sliktais stāvoklis novedis pie nevienmērīgu balstu deformācijām, kas izpaužas baznīcas velvju pārsegumos plaisu veidā. Struktūras vājā sasaiste un deformāciju izraisīta šķērsriezuma pārslodze, dinamiskas vibrācijas, balstu sēšanās, iekšējo un ārējo virsmu temperatūras izraisītas deformācijas rada mūra ēkas bojājumus un konstrukcijas sadalīšanos savstarpēji nobalstošos mūra apjomos. Promocijas darba 3. nodaļā izvērtēta šo efektu ietekme uz esošu mūra pārsegumu ekspluatācijas drošības robežu, kuru pārsniedzot var attīstīties progresīvs konstrukciju sabrukums [29].

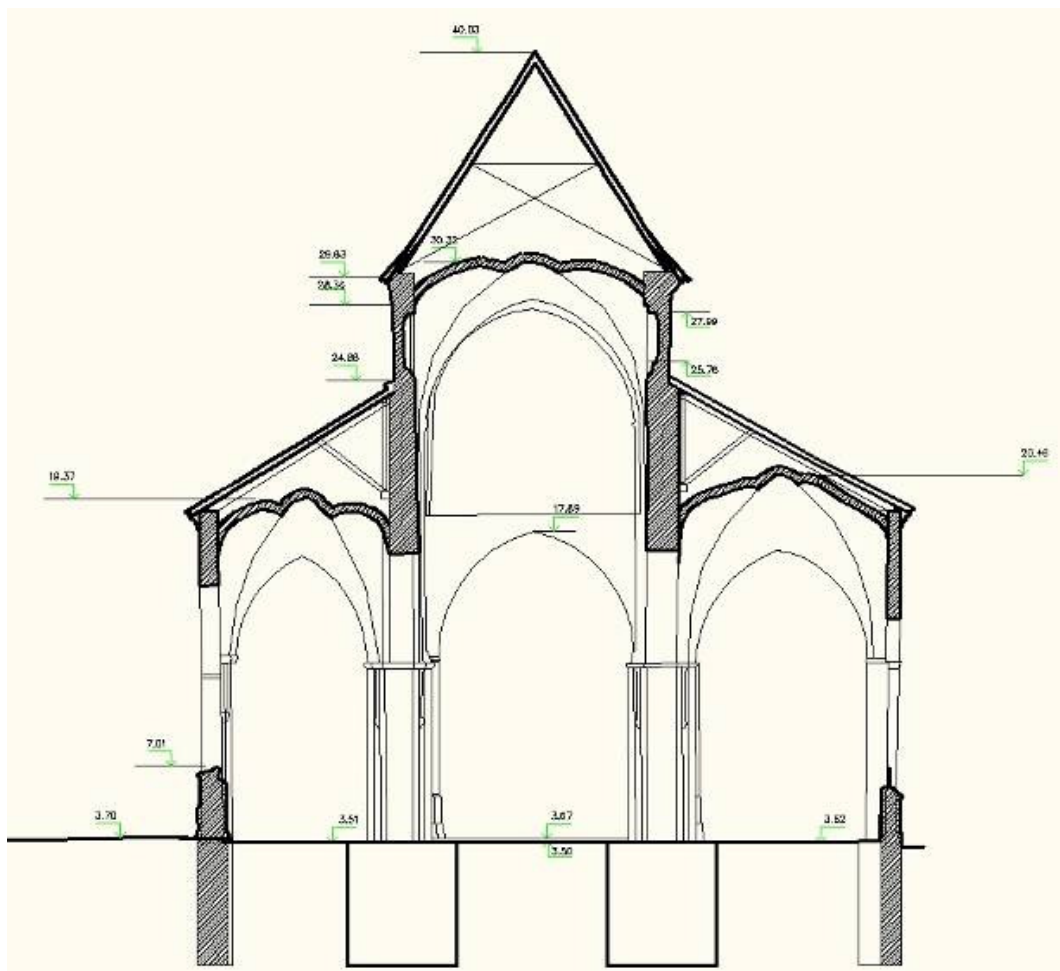
Rīgas Doma baznīca ir viena no senākajām sakrālajām būvēm Latvijas galvaspilsētā. 13gs. celtā baznīcas pamatu konstrukcijās izmantoti māla ķieģeļi un vietēju iegulu dolomītu

akmeņi, bet gotiskās arkas būvētas no blīviem māla ķieģeļiem. Kā mūra pārseguma čaulu veidi gotiska stila sakrālajās būvēs plaši tika lietotas krusta un zvaigžņu velves. Ilgstošais būvniecības process, ēkas plānojuma un apjomu izmaiņas būvniecības nobeiguma posmā bija parasts blakus „efekts” celšanas procesam simtiem gadu atpakaļ. Dažādi būvēšanas etapi, būvapjoma palielināšana un pilsētas prasību izmaiņas izraisījušas būtiskas korekcijas mūru apjomā. Tornis un jumta daļas tika zaudētas ugunsgrēkā, kurš notika 1547. gadā. Krusta un zvaigžņu velves cieta lielgabalu apšaudē Zviedru un Krievu karā, 16.gs. Lodes caursita baznīcas jumta konstrukciju un bojāja mūra velvju pārsegumu.

Pēdējos gados Rīgas Doma baznīcas izpētei pievērsta liela uzmanība un savākta liela apjoma informācija par ēkas ekspluatācijas apstākļiem un būvkonstrukciju tehnisko stāvokli. Pēdējā būtiskā Rīga Doma baznīcas rekonstrukcija veikta 1963. gadā. Rekonstrukcijas ietvaros veiktā velvju apdares slāņa atjaunošana ir kā atskaites punkts, no kura var mērīt velvju deformācijas lielumus un nevienmērīgas sēšanās deformācijas savstarpējās attiecības starp atsevišķiem balstiem, analizējot plaisu atvērumu apdares slānī. Mūra velvju pašobeles daļas mūra konstrukcijas un apdare nav labota nevienā no ēkas rekonstrukcijām un šeit veiktie mērījumi [102] parāda kopējo mūra daļu deformāciju visā ēkas ekspluatācijas gaitā. Rekonstrukciju un nostiprināšanas darbu rezultātā bieži tiek slēpti defekti, kuriem pēcāk neattīstoties, tie vēlākās apsekošanās netiek fiksēti. Jebkura pārbūve un atjaunošana maina sākotnējo ēkas darbību un ievieš korekcijas idealizēta homogēna mūra materiāla izpratnē. Sākotnējais ģeometrisko proporciju princips, būvējot Rīgas Doma baznīcas velvju pārsegumus, ir ticis izjaukts, jo vēlāko gadu gaitā veikto rekonstrukciju iespaidā mainījusies velvju ģeometriskā forma, jomu augstums un kontrforsu sistēma. Sākotnēji iecerētais bazilikas tipa šķērsriezums, 2.13. attēls. 15.gs. sākuma rekonstrukcijas laikā baznīca pārveidota par halles tipa ēku, 2.14 attēls.

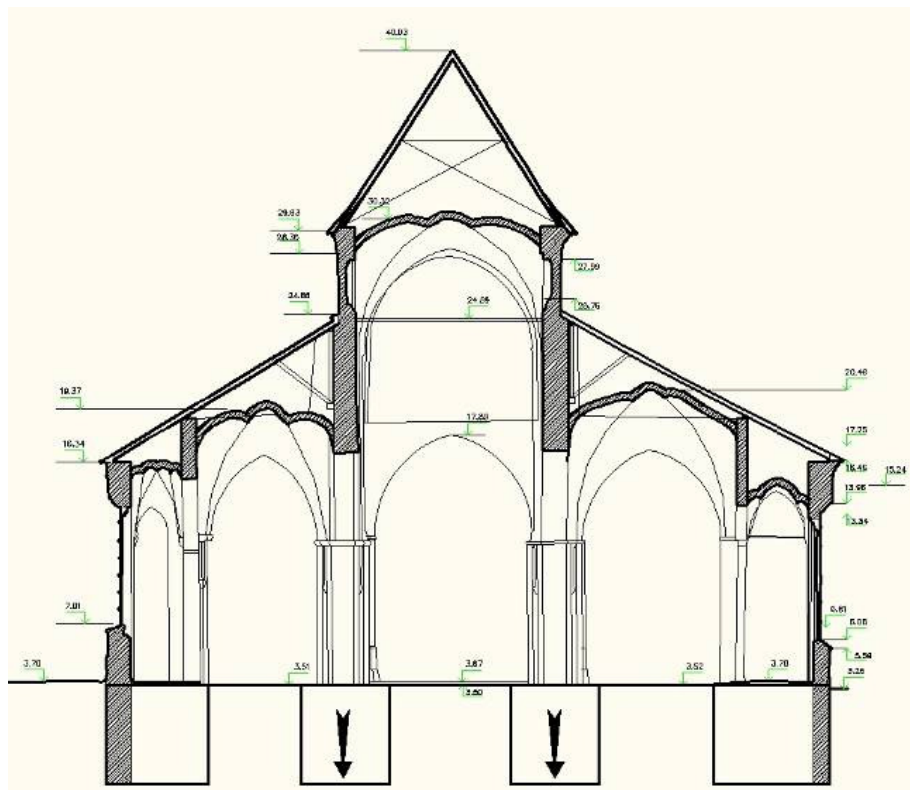


Att. 2.13. Halles tipa ēkas šķērsriezuma kompozīcija.



Att. 2.14. 15.gs sākuma šķērsriezuma kompozīcija.

Analizējot konstrukcijas šķērs griezumu, konstatēts, ka centrālā joma balstbīdi uzņem kontrforsis zem jumta plaknes. 15.gs beigās baznīcas sānu malās tiek piebūvētas kapelas un baznīca iegūst mūsdienu šķērs griezuma kompozīciju. Attēlā 2.15. parādīta mūsdienu šķērs griezuma kompozīcija, 15.gs beigās piebūvējot sānu kapelas nojauc kontrforsus un uzstāda savilces.



Att. 2.15. 15.gs beigu šķērs griezuma kompozīcija.

Būvniecības procesā veiktās projekta izmaiņas novedušas pie dažāda pamatnes noslogojuma. Tā, piemēram, sākotnēji projektēto divu torņu vietā uzbūvēts viens. Mainot risinājumu būvniecības gaitā, iegūti neadekvāti lieli mūra masīvi un pamati baznīcas torņa daļā un atvieglota stabveida balstu konstrukcija vidusjoma kolonu pamatos. 15gs. piebūvējot sānu celles un paceļot vidusjomu, mainījies spriegumu stāvoklis pamatnē un palielinājies spriegums būvpamatnē zem centrālā joma kolonu rindas. Veicot baznīcas pārbūvi pēc karadarbības 18gs., būtiski tiek mainīts horizontālo spēku uzņemšanas princips, nojaucot kontrforsus ēkas sānu jomu bēniņu daļā un uzstādot savilces centrālajā un sānu jomos. Būvniecības vēsturiskā izpēte veikta ar Rīgas Doma pārvaldes atbalstu un izmantojot Valsts Kultūras Pieminekļu Aizsardzības inspekcijas arhīva informāciju.

Rīgas Doma pārvalde jau vairākus gadus veic vispusīgu ēkas tehniskā stāvokļa novērtēšanu, slēdzot līgumus par mikroklimate pētījumiem, mūru ķīmiskā piesārņojuma analīzi, pamatu un pamatnes izpēti, plaisu deformāciju mērījumiem, konstrukciju radioradara skanēšanu, mūra virsmu lāzerskanēšanu un gruntsūdens līmeņa mērījumiem. Šādu līgumdarbu ietvaros RTU Būvniecības fakultātes Būvmateriālu un būvizstrādājumu profesoru grupas eksperti iesaistījās Rīgas Doma baznīcas velvju pārseguma defektu un to deformācijas dinamikas izpētē. Ekspertu grupa piedāvāja attīstīt modernu plaisu monitoringa automātisko sistēmu, pielietojot optiskās šķiedras tenzometrus, lai nodrošinātu regulārus plaisu pārvietojuma mērījumus. Citu Vecrīgas vēsturisko ēku tehniskā stāvokļa novērtēšanai netiek veltīta tik liela uzmanība. Pateicoties Rīgas pilsētas pašvaldības atbalstam, tiek veikti plaisu dinamikas mērījumi un ēkas pamatnes deformāciju mērījumi, kā arī analizēta šo deformāciju ietekme uz mūra čaulu konstrukciju noturību.

2.8 Līdzšinējā prakse apsekošanā

Mūsdienu tehnoloģijas ir attīstījušās dzelzsbetona un tērauda konstrukciju tehniskā stāvokļa novērtēšanai, taču mūra ēku apsekošana ir uz pieredzi balstīta analīze un mūra bojājumu subjektīva interpretācija. Līdzšinējā apsekošanas prakse sniedz nozīmīgu informāciju par ēkas konstrukciju stāvokli, bet konstrukciju analīze prasa augstu pieredzi un kvalifikāciju. Novērtējot bojājumus un to raksturu mūra ēku konstrukcijās, var izdarīt secinājumus par pamatnes sēšanos vai cita veida deformāciju izcelsmi. Vizuāla kontrole un plaisu atvēruma kontrole ar mehāniskiem tenzometriem ir līdzšinējā mūra apsekošanas prakse. Šāda akciju veida stāvokļa nofiksēšana nedod pilnīgu priekšstatu par procesiem starpposmā starp apsekošanām.

Katras apsekošanas uzdevums ir nedaudz atšķirīgs un ne vienmēr informatīvi turpina uzsāktos novērošanas procesus. Veicot nolasījumus ne ar pietiekamu biežumu, nav iespējams fiksēt lokālas ekstrēmas vērtības, jo nolasījumi, kā likums, iekrīt vienā diennakts periodā un nav saistīti ar apkārtējo apstākļu ekstrēmām izpausmēm. Lai fiksētu vides ietekmi uz ēkas konstrukcijām, pēdējo gadu laikā Rīgas Doma baznīcā tiek veikta vairāku ārējo faktoru reģistrācija. Rīgas Doma pārvalde saviem spēkiem reģistrē temperatūru un mitrumu ēkas iekšējās [108], lai risinātu jautājumus, kuri saistīti ar koka elementu konservēšanu un ilgmūžību, kā arī ar ēkas apkuri un ventilāciju. SIA „Balt-Ost-Geo” veic gruntsūdens līmeņa monitoringu un mikrobioloģiskās vides novērtējumu [79; 80], lai izvērtētu draudus pamatu pāļu konstrukcijām. SIA „CM GIB” veic vairāku pakāpju pamatnes inženierģeoloģisko un

pamata tehniskā stāvokļa izpēti [122], kas ļauj modelēt pamatnes deformācijas pašsvara ietekmē. Līdzšinējās apsekošanas slēdzienos [101] parādījušies kopējās ēkas sēšanās deformācijas lielumi līdz 16cm, kas aptuveni sakrīt ar skanēšanas datu uzrādīto ēkas sasvērumu. Vairumā no līdzšinējiem pētījumiem atskaites kvalitāti ietekmējis cilvēciskais faktors gan mērījumu nolasījumu kvalitātes ziņā, gan mērījumu apstrādes ziņā. Analizējot ēkas konstrukciju deformācijas [101], veidots plakniskais uzdevums un izmantota datoranalīzes programma Plaxis, kuras galvenā pielietošana nozare ir grunšu un konstrukcijas mijiedarbības un grunšu aprēķini, ievērtējot plasticitāti un pārvietojumus. Plakniska mūra velvju analīze dod visai apšaubāmu velvju darbības analīzi. Plakniskais uzdevums sniedzis Rīgas Doma baznīcas šķērsrāmja deformēto stāvokli grunts elastīgo un plastisko deformāciju ietekmē, parādot, kādas deformācijas veidojas pasliktinoties pamata konstrukcijas tehniskajam stāvoklim.

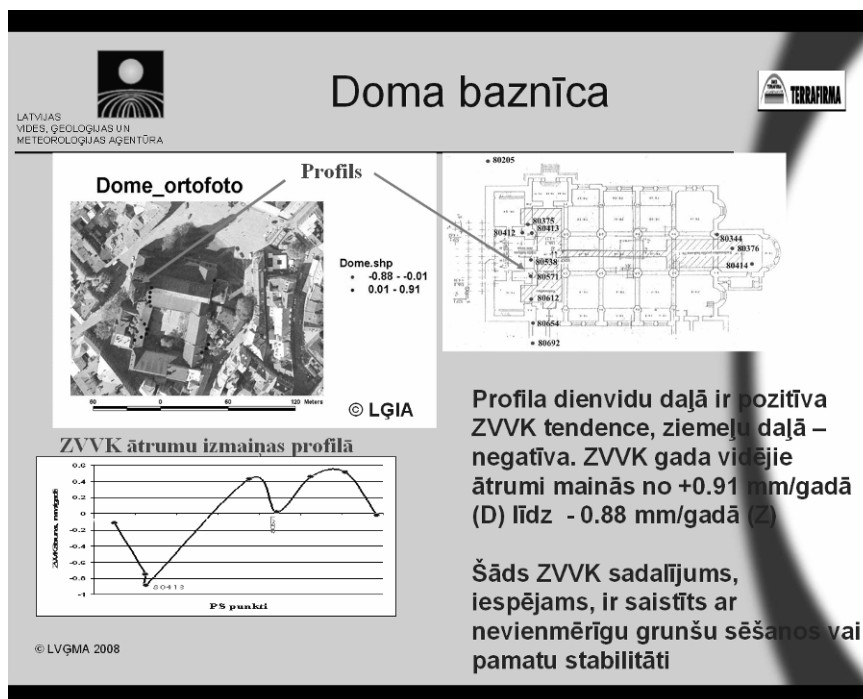
2.9 Ēku monitoringa attīstības virzieni

Jaunākās tehnoloģijas konstrukciju monitoringā ir saistītas ar automatizētu kontroles sistēmu izveidi, kuru vadību kontrolē ar datoru, tādējādi pēc iespējas mazinot cilvēka kļūdas iespēju. Kontrolēt iespējams gan mehāniskus pārvietojumus, gan vibrācijas, gan ekspluatācijas apstākļus, gan ķīmiskus procesus.

Atkarībā no mērāmā parametra pielieto atbilstošas mērīšanas sistēmas:

- a) plaisu pārvietojumus mēra ar optiskās šķiedras, pjezoelektriskajiem vai pretestības tenzometriem [48],
- b) sēšanās deformācijas mēra ar radariem vai automatizētas darbības multimērķu lāzera tālmēriem [141],
- c) virsmas vibrācijas nolasa no atstarota lāzera stara skaneri, paātrinājuma devējiem vai ģeofonu [33].

Automatizētās sistēmas var kontrolēt minētos procesus nepārtrauktā režīmā un cikliski. Kā vienu no daudzsolīgākajiem būves globāla monitoringa veidiem un attīstības virzieniem jāpiemin satelītu radaru sistēmas, kuras fiksē būvju vai to daļu pārvietojumus. Pateicoties kompānijas TerraFirma prezentācijas materiāliem [146], ir pieejami Rīgas Doma baznīcas vertikālo deformāciju ātrumi, sk. 2.16. attēlu.



Att.2.16. Deformāciju ātruma mērījumi ar satelīta radaru [146].

Apstrādājot satelīta radara mērījumus, iegūst ne tikai pārvietojumus, bet arī deformēšanās ātrumu vertikālā un horizontālā virzienā.

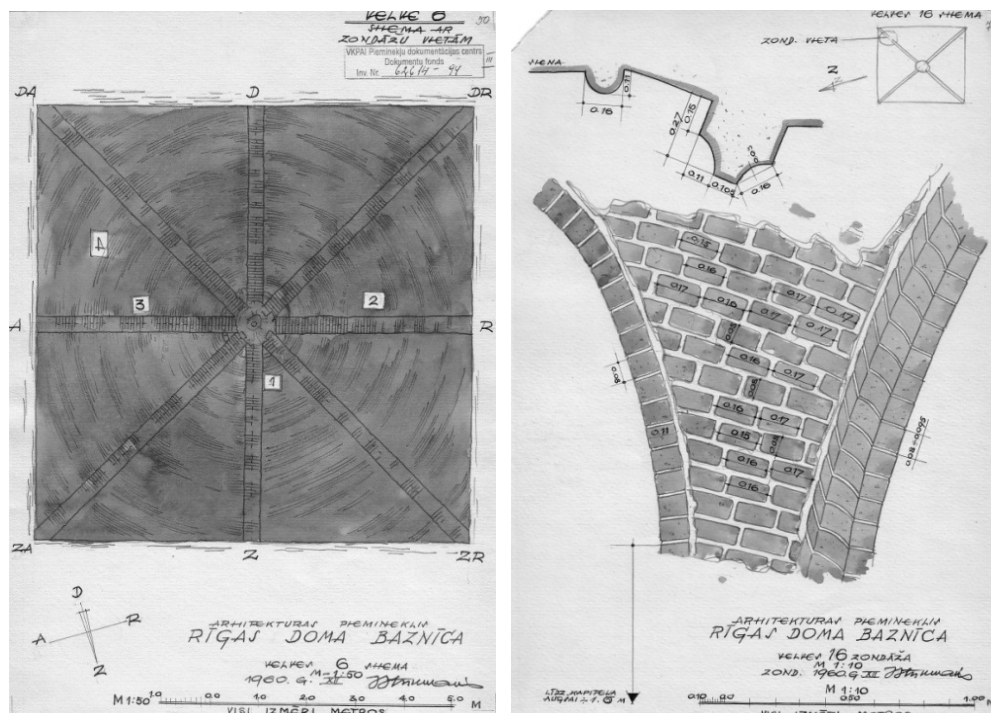
Šobrīd tiek risinātas pārrunas par baznīcas iekļaušanu Eiropas satelītu radara skanēšanas sistēmā, lai mērītu ēkas daļas pārvietojumu ātrumus.

2.10 Apsekošanas un monitoringa attīstība Rīgas Doma baznīcā

Pēc otrā pasaules kara Rīgas Doma baznīca tika pārveidota par koncertzāli. Padomju valdība veica lielus kapitālieguldījumus, lai pārvērstu dievnamu par ideoloģijai atbilstošu ēku. No 1959. gada saglabājusies velvju defektu foto fiksācija. Var uzskatīt, ka šis ir plaistu monitoringa izejas informācijas punkts. Foto fiksāciju veica Valsts Kultūras Pieminekļu Aizsardzības inspekcijas darbinieki. Fotografijās redzamas nozīmīgas velvju plaisas. Veicot rekonstrukcijas darbus, plaisas no telpu puses tika apslēptas zem apdares slāņa, kas mūsdienās ļauj novērtēt plaistu veidošanos pēdējo 50 gadu laikā.

1960. un 1961. gados pēc Valsts Kultūras Pieminekļu Aizsardzības inspekcijas pieprasījuma tika veikta mūra pārseguma velvju zondāža un aprakstīšana. Nozīmīgu apjomu velvju uzmērījumos un konstrukcijas izpētē ieguldījis J. Stukmanis [VKPAI arhīva Nr.: 7943-11], uzmērot gan velvju ribas, gan pielietoto akmens materiālu izmērus. VKPAI arhīvā

saglabājušies dati par katras Rīgas Doma baznīcas pārseguma velvi, tās konstrukciju, akmens materiālu izmēriem, plaisām un ribu šķērsgriezumiem. Fiksējot šo informāciju rokas skicēs, sk. 2.17. attēlu, un noformējot vairāku desmitu lapu biezā atskaitē, J. Stukmanis līdz mūsu dienām ir saglabājis izejas datus monitoringa programmas izstrādei un attīstības prognozei.



Att. 2.17. Velvju konstrukciju uzmērījumi un zondāža VKPAI arhīva Nr.: 7943-12.

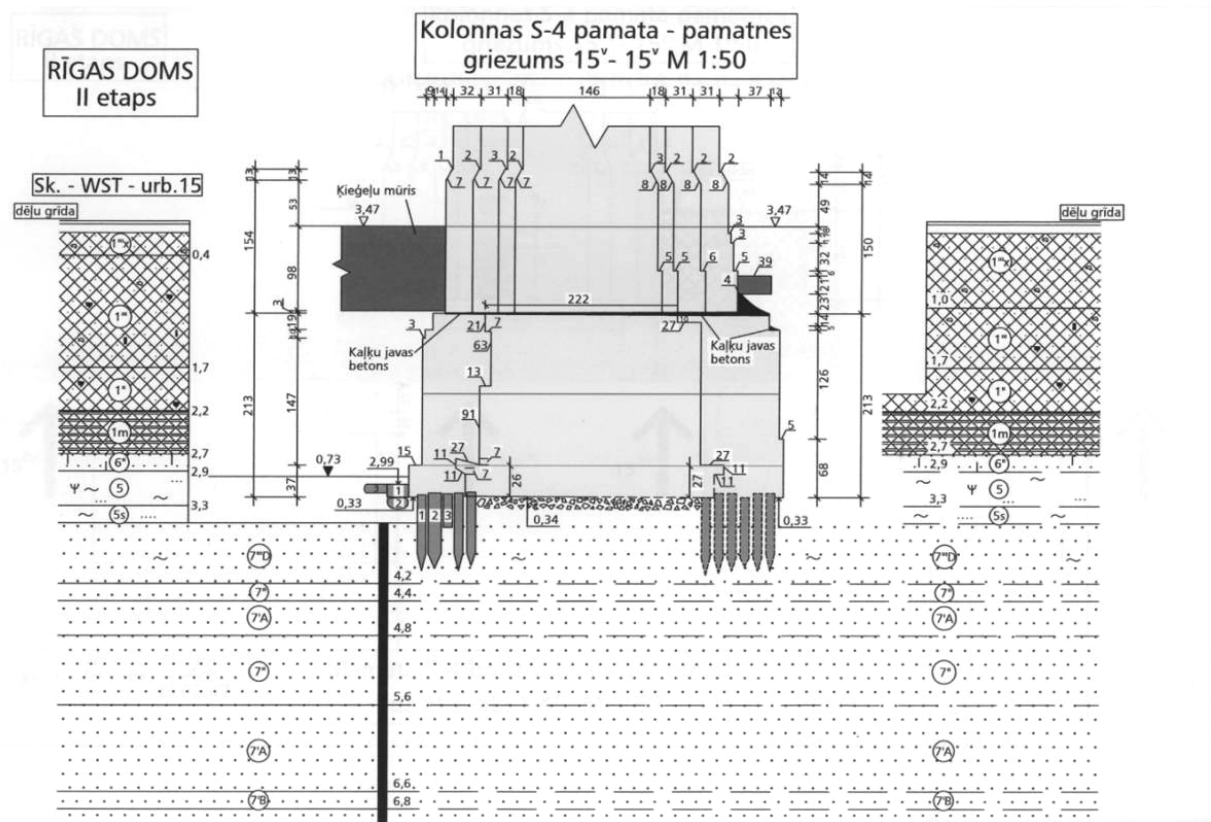
2005. gadā SIA „LBS Konsultants” veiktā pārseguma velvju apsekošana [102] parādīja, ka plaisu attīstība turpinās un nepieciešamas modernākas plaisu kontroles iekārtas un regulāri uzmērījumi. Jaunas plaisu monitoringa programmas izveide un tenzometru uzstādīšana pamatota ar plaisu atvēršanās dinamikas pieaugumu un jaunu plaisu veidošanos pēdējo 50 gadu periodā. Mūra masīvu deformēšanās virzienu noteikšana no plaisu virziena izmantota par pamatu konkrēto mērījumu vietu izvēlei.

2006. gada maijā uzstādītā SOFO tipa optisko tenzometru sistēma ir optimāla plaisu pārvietojuma kontroles sistēma, lai fiksētu plaisu deformācijas un varētu izvērtēt datormodelēšanas atskaites datus.

Šobrīd baznīcas iekšienē tiek veikti arheoloģiskie izrakumi, analizēts mūru ķīmiskais piesārņojums, veikta ērģeļu restaurācija un citi ar būvkonstrukciju pastiprināšanu un apsekošanu nesaistīti pētījumi. Vairākas būvkonstrukciju apsekošanas un analīze veikta vidusjoma jumta un torņa daļas koka konstrukcijām.

2.10.1 Ēkas pamatnes izpēte

No 2004.gada pa vairākiem etapiem tiek veikta baznīcas pamatnes un pamata konstrukcijas izpēte. SIA "LBS Konsultants" [101] noslēgusi līgumu ar Rīgas Doma pārvaldi par inženierģeoloģisko izpēti. No izpētes materiāliem iegūstama plaša informācija par problēmām pamatu kontakta virsmā ar pamatu. Konstatētie koka pāļu pamati cietuši no koksnes erozijas (*Cytophaga-Flavobacterium-Bacteroides (CFB) kompleks*s un arī *Pseudomonas Cellvibrio un Brevundimonas grupas*) baktēriju ietekmes un ievērojami samazinājusies koka pāļu elastība. Kolonas zonas „L” (kolona S-4) pamata griezumu sk. 2.18. attēlā.



Att.2.18. Vidusjoma kolonas zona „L” (kolona S-4) pamats [101].

Līgumdarba ietvaros SIA „CM-GIB” veica urbumus pamata materiālā un pamatnē. Izmeklēšanā apstiprinājās, ka zem mūrētajiem pamatiem un 0,6-1,0m joslā ap tiem atrodas koka pāļi. Pamatu mūrētai daļai ir tendence pazemināties virzienā uz Doma laukumu (starpība 48 cm, kas gan nenožīmē, ka var droši apgalvot par šādu pamatu nosēšanās starpību). Arī vizuālās pazīmes (plaisu raksturs un ķieģeļu kārtu līmenis) norāda uz baznīcas sēšanās palielināšanos šajā virzienā. Pamatu veido ļoti cieta ($R_{sp}=60...90$ MPa) dolomīta (Pļaviņu

svītas) dažāda lieluma skaldīti akmeņi kaļķu javā. Kaļķu javai ir augsta spiedes stiprība ($R_{sp} \leq 37$ MPa) un saiste ar dolomītu. Spiedes pārbaudes, veiktas kopā dolomīta un javas materiāla kubiem, arī uzrāda ļoti augstu stiprību ($R_{sp} = 48 \dots 64$ MPa). Pamatu kaļķu betona un pamatu mūrējuma stiprība ir ievērojami zemāka ($R_{sp} = 7,6 \dots 26,9$ MPa). Dažviet ārpusē konstatētas kavernas (izbrukumi) līdz 40 cm, aizpildīti ar degradētu javu un būvgružiem. Uz tām tiek norādīts arī iepriekšējās izpētes materiālos 1959.gadā. Zem pamatu mūrētās daļas atrodas koka pāļi (priedes un egles) 10-32 cm diametrā un 1,15-1,35 m garumā; pāļi atrodas arī blakus pamatiem 0,6-1,0 m joslā, augšas atzīmes par 5-15 cm augstākas; pāļu galu līmeņi savstarpēji atšķiras par 3-7 cm; pāļu savstarpējie attālumi 2-20 cm robežās, zem pamatiem līdz 5-10 cm; pāļi bez režģoga, blakus pamatiem uz tiem tieši kaļķu java ar dolomīta gabaliem, dažviet būvgruži, kā arī balstās 1962.-1963. gadā izbūvētā betona grīda.

Pāļi iedzīti nemizoti, ar ļoti nosmailinātu galu $\sim 15^\circ$ leņķī. Tie izdzīti cauri organogēnam mālam līdz pašlaik ļoti blīvām smiltīm; starp pāļiem – smilšmāla materiāls, kas, iespējams, sākumā bijušas dūņas, pašlaik sajaukts ar smilti, vietām augšdaļā ar dolomītu šķembām un kaļķu javas materiālu; vietām starp pāļiem ir sacementēta smiltis ($R_{sp} \sim 0,35$ MPa), apakšdaļā ļoti blīvas un blīvas smiltis.

Pāļi atrodas zem pastāvīga gruntsūdens līmeņa, to galiem ir dažādas pakāpes vizuāli redzami bojājumi, bojājumi vizuāli konstatēti ar pāļu vidus un apakšdaļā izvilktajiem pāļiem (pāļi kļuvuši mīksti), kā arī slīpajos urbemos (no sajauktiem serdes gabaliem).

Uz koka pāļiem, kas iedzīti caur dūņu slāni vidēji blīvās smiltīs, lēni būvētās baznīcas smilšaino grunšu deformācijas, ko izraisīja sākumā relatīvi vienmērīgās slodzes, zem pāļiem beigušās. Notiek dziļāk gulošo smilšmāla un māla šļūdes relatīvi vienmērīgas, nelielas intensitātes deformācijas.

Pēc vēsturiskās izpētes datiem, tornis bijis augstāks par pašreizējo un tā slodze uz pamatiem varētu būt lielāka par pašreizējo 0,7...0,75 MPa, kura varētu pārsniegt pamatnes grunšu nestspēju (noturību). Iespējama erozijas baktēriju darbības rezultātu ietekmes sēšanās. Grunšu sablīvēšana starp pāļiem notikusi pēdējo gadsimtu laikā, kad pasliktinājies koka pāļu tehniskais stāvoklis.

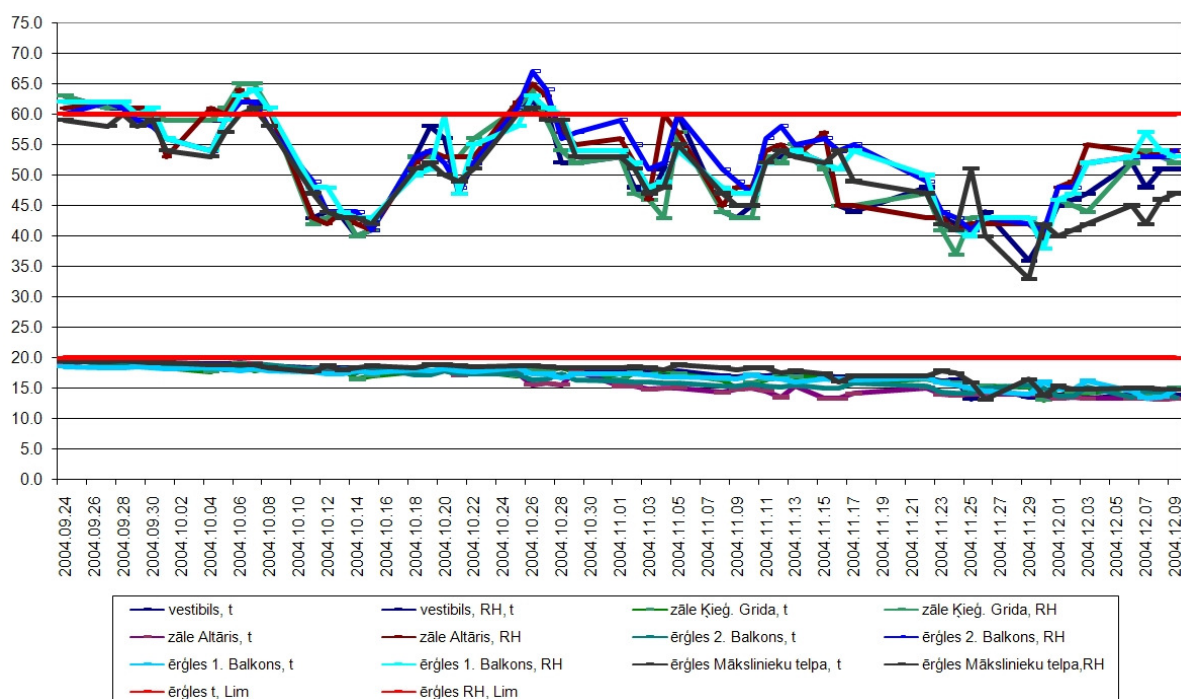
Pašreizējā situācija: smiltis grunšu pamatnes deformācijas noslēgušās, notiek mazas intensitātes šļūdes deformācijas mālainās organogēnās gruntīs (mikrobioloģiski procesi, organisko vielu sadalīšanas ietekme u.c.); koka pāļiem plaši erozijas baktēriju bojājumi, tie faktiski nepilda pamatu daļas funkciju, bet kā komponents iekļaujas kopējā grunšu kompleksā zem mūrētiem pamatiem – bojātie pāļi – relatīvi nesablīvēts smilšmāls – smiltis, koku mizas, dolomīta šķembas starp pāļiem. Notiek šī kompleksa zem mūra daļas pamatiem atšķirīgas

deformācijas zem dažāda noslogojuma, kurā galvenie deformējamie komponenti – bojātie koka pāļi un relatīvi nesablīvēts smilšmāls, kas ir galvenais pašreizējo plaisu rašanās un attīstības cēlonis.

2.10.2 Ēkas mikroklimata mērījumi

Ēkas ekspluatācijas mikroklimats nozīmīgi ietekmē būvkonstrukciju īpašības un to izmaiņas laikā. Rīgas Doma pārvaldes personāls saviem spēkiem vairāku gadu ilgā periodā veicis iekštelpu mikroklimata mērījumus, šo mērījumu analīze atspoguļota U. Pelītes [108] pētījumā. Veicot mērījumus vairākās baznīcas iekštelpu vietās, sk. 2.18. attēlu, veidota datu bāze par temperatūras un relatīvā mitruma izmaiņām vairāku gadu garumā.

Doma baznīcas mikroklimata monitorings organizēts, lai pētītu mikrobioloģisko procesu norisi. Mikrobioloģiskie procesi saistīti ar mūra materiāla degradāciju un koka konstrukciju bojāšanu. Grafiki ar ēkas iekštelpu mitruma režīmu un temperatūras svārstībām sniegti 3.19. attēlā, paskaidrojumi grafikiem sniegti 2.3. tabulā.

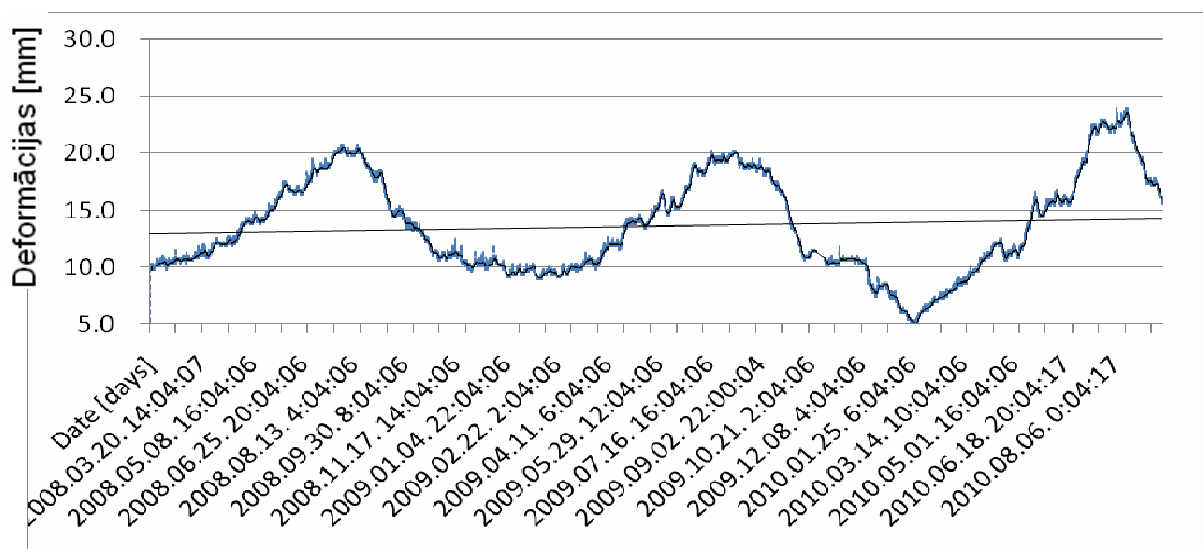


Att. 2.19. Temperatūras un relatīvā mitruma mērījumi no 2004.gada septembra līdz 2004.gada decembrim.

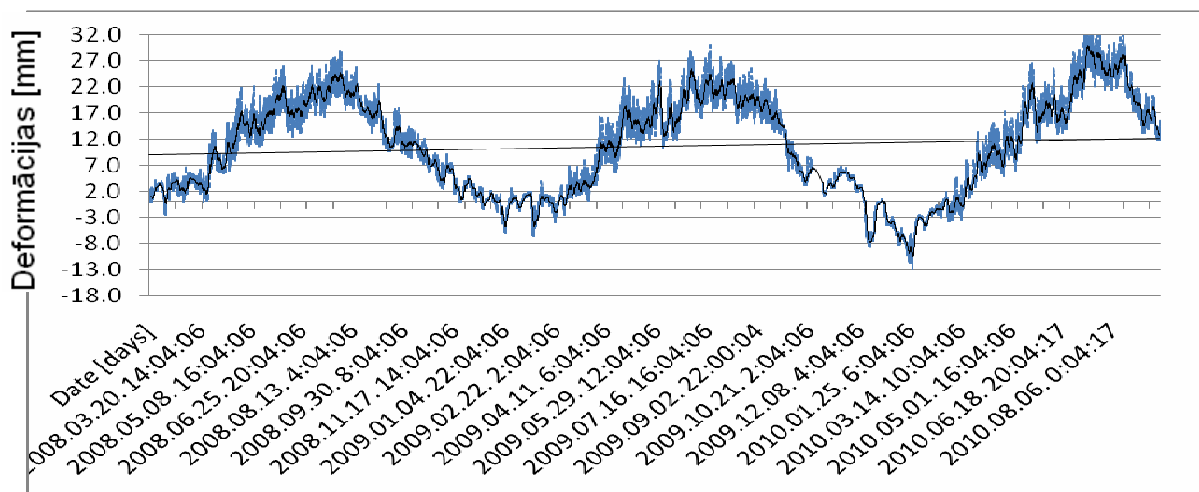
Paskaidrojumi grafikiem, 2.19. attēlā

Temp, A	Temperatūras sadalījums, °C
RH, A	Gaisa relatīvā mitruma sadalījums, %
TempLim	Mikrobioloģisko sēņu attīstībai optimālās attīstības temperatūras apakšējā robeža, °C (20 °C)
RHLim	Mikrobioloģisko sēņu attīstībai optimālās attīstības relatīvā mitruma apakšējā robeža, % (60 %)

Velvju zonu neietekmē kapilārais mitrums, kurš paceļas no pamatiem pieguļošās grunts. Velvju mūru materiāls pakļauts gaisa mitruma ietekmei. Mitruma mērījumi velves mūrī, iepriekšējo apsekojumu ietvaros, nav veikti. Temperatūras monitorings uzskatāmi parāda, cik liela ir temperatūras starpība starp iekšējām un apkārtējo vidi. Vēsturisko monumentālo ēku temperatūras režīmi nesošajās konstrukcijās krasi atšķiras no izolētu, mūsdienu ēku darba apstākļiem. Kopš 2008. gada automātiskā monitoringa sistēmas ietvaros gan iekšējās, gan nesošo sienu ārpusē notiek automātiski temperatūras mērījumi, sk. 2.20 un 2.21 attēlu. Temperatūras atšķirības starp mūra konstrukciju iekšējo virsmu un ārējo sastāda $\Delta t = -15$ līdz $+8$ °C. Šajā darbā tiek izvirzīts pieņēmums, ka temperatūras iedarbe ir otrais nozīmīgākais mūra konstrukciju slogojums aiz pamatnes deformācijām.



Att. 2.20. Iekšējpu temperatūras grafiks no 2008. gada februāra līdz 2010. gada oktobrim



Att. 2.21. Apkārtējās vides temperatūras grafiks no 2008. gada februāra līdz 2010. gada oktobrim

Temperatūras diference maina zīmi atbilstoši gadalaikiem, tādējādi temperatūras slogojums konstrukcijā iedarbojas kā pagarinājums un saīsinājums cikliski 2 reizes viena gada laikā.

Papayianni un Stefanidou [107] pētījumā par Bizantijas perioda mūra materiāliem tiek sniegta analīze par sāļu koncentrāciju ķieģeļos un to ietekmi uz mūra materiāla īpašībām. Mitruma migrācija sienās nav tiešs ēkas būvkonstrukciju slogojums, taču mitrums izsauc mūra javas saistvielu sairšanu un sāļu kristālu veidošanos. Mūra materiāla īpašības ir laikā mainīgas, tādēļ vēsturisko ēku būvkonstrukciju analīzes metodoloģijā liela uzmanība pievērsta mūra degradācijai.

Mitruma ietekme uz kaļķa javas šļūdi pētīti [18; 20], kur uzskatāmi parādīta paaugstināta mitruma ietekme uz javas plastiskajām īpašībām. Analizējot ilglaicīgu mūra spriegumstāvokli spiedē, spriegumiem pārsniedzot 70% no mūra nestspējas spiedē, jāievērtē kaļķu javas plasticitātes radītie efekti. Sākotnējās plastiskās deformācijas, kuras attīstās jaunizveidotā mūrī, homogenizēta mūra materiāla modelī ievērtētas ar mūra deformāciju moduļa samazinošu koeficientu, sk. 2.12 nodaļu. Bratasz veiktais pētījums [36] par mikroklimata ietekmi uz vēsturisko mūra ēku materiālu ilgmūžību parāda materiālu degradāciju ekspluatācijas apstākļu ietekmē.

2.10.3 Mūra masīvu ķīmiskā piesārņojuma izpēte

2005. gada mūra masīva pētījuma ietvaros, pētīta sāļu migrācija Rīgas Doma baznīcas mūru vertikālajā daļā. Virspamata mūru masīvos konstatēti šķīstoši sāļi, no kuru apjoma CI

sastāda 20 %, nitrāti NO_3^- - 36 % un sulfāti SO_4^{2-} - 44 %. Šo sāļu kristalizācija mūra ķieģeļu elementos izsauc iekšējo spriegumu punktveida pieaugumu sāļu izplešanās rezultātā un var novest pie ķieģeļa daļēja sabrukuma. Promocijas darba ietvaros nav modelēta šāda lokāla sprieguma koncentratora ietekme uz mūra nestspēju.

2.10.4 Mūra materiāla viendabības analīze

Viens no būtiskākajiem parametriem mūra konstrukciju apsekošanā ir mūra materiāla homogēnums. Lai gan sākotnējā attīstība bija virzīta uz ultraskaņas, rentgena un radioloģijas tehnoloģijām, mūsdienu skaneru attīstība mūra konstrukcijām balstīta uz radioviļņu radara skaneru tehnoloģijām. Skaņas viļņu izplatību mūra konstrukcijās un uz šī principa pamatotu testa metodi izstrādājis Russo [118]. Akustiskās emisijas principu pielietošana mūra ēku bojājumu analīzei aprakstīti Carpinteri [43] vēsturisko mūru analīzē.

Monitoringa, datormodelēšanas un materiālu testu savstarpējā savietojamība kompleksas analīzes nolūkos apskatītas vēsturisko mūru [116; 119] pētījumos. Šie pētījumi nesniedz skaidru un viennozīmīgi interpretējamu sasaisti starp minētajām metodēm.

Radara skenēšana ir inovatīva tehnoloģija, kuras pielietošana konstrukciju skanēšanai plaši pētīta [15; 16; 17; 39; 40; 41; 125; 126; 132] pēdējos gados. Ģeoradara pielietošana konstrukciju skanēšanai sniedz informāciju par materiāla neviendabību, slēptiem konstruktīviem defektiem un konstruktīvajiem slāņiem. Tikai pēdējos gados GPR (ground penetrating radar) tiek plašāk lietots vēsturisko mūra ēku izpētē, kā nesagraujošā testa metode.

Iekārtas darbība pamatojas uz 500 MHz – 1 GHz diapazona radiosignāla iestarošanu mūra konstrukcijā un atstarotā signāla uztveršanu.

Pielietojot radio radara skanēšanu mūra konstrukcijām, iegūst:

- a) lielu ieslēgumu vai kavernu lokalizāciju;
- b) bojājuma apjomu un pakāpi;
- c) veiktā remonta apjomu;
- d) mitruma piesaistes līmeni;
- e) materiāla sadalīšanos slāņos, apjomu.

Radara darbības princips balstās uz radioviļņa iestarošanu materiālā un atstarotā signāla uztveršanu. Izmērot atstarotā signāla saņemšanas laiku un zinot viļņu ātrumu materiālā, ar datoranalīzes programmu konstruē ehogrammu. Reālajā parauga testēšanā viļņu izplatības ātrums materiālā ir nezināms, un tā ātrumu ietekmē izmaiņas materiālā, ieslēgumi un kavernas. Viļņu ātrums sausā materiāla paraugā ir lielāks [25; 26] kā paraugā ar paaugstinātu

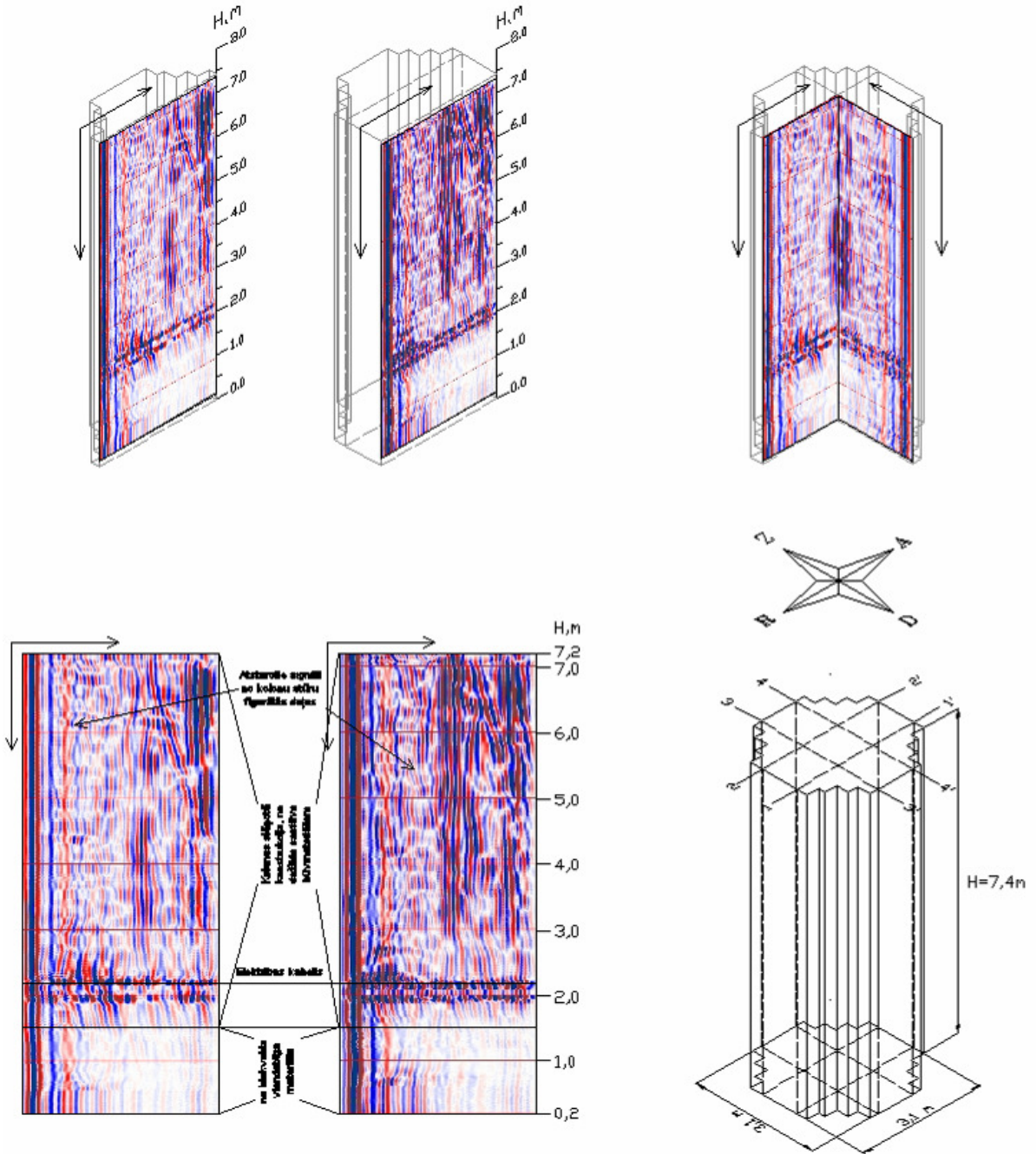
mitrumu. Šis apstākļis nosaka, ka katra iekārta ir jākalibrē pirms skanēšanas darbu uzsākšanas. Kalibrācijas parametru pētījumi [123; 124; 127; 137] parāda, ka tiem jānodrošina signāla stipruma un frekvences pielāgošana pētāmā materiāla biezumam un viļņu izplatības īpašībām tajā.

Ar radaru palīdzību skanētas arī Rīgas Doma baznīcas kolonas, atklājot defektus kolonu iekšienē. Lai interpretētu radara ehogrammas, nepieciešama īpaša sagatavotība, un šajos nolūkos vienmēr tiek piesaistītas specializētas kompānijas. Rīgas Doma grīdas, kolonu (zona „L”, sk. 3.15. attēlu) skanēšana, sk. 2.22. attēlu, 2004. gadā noveda pie pastiprinājuma risinājuma izstrādes un īstenošanas aptveru veidā.

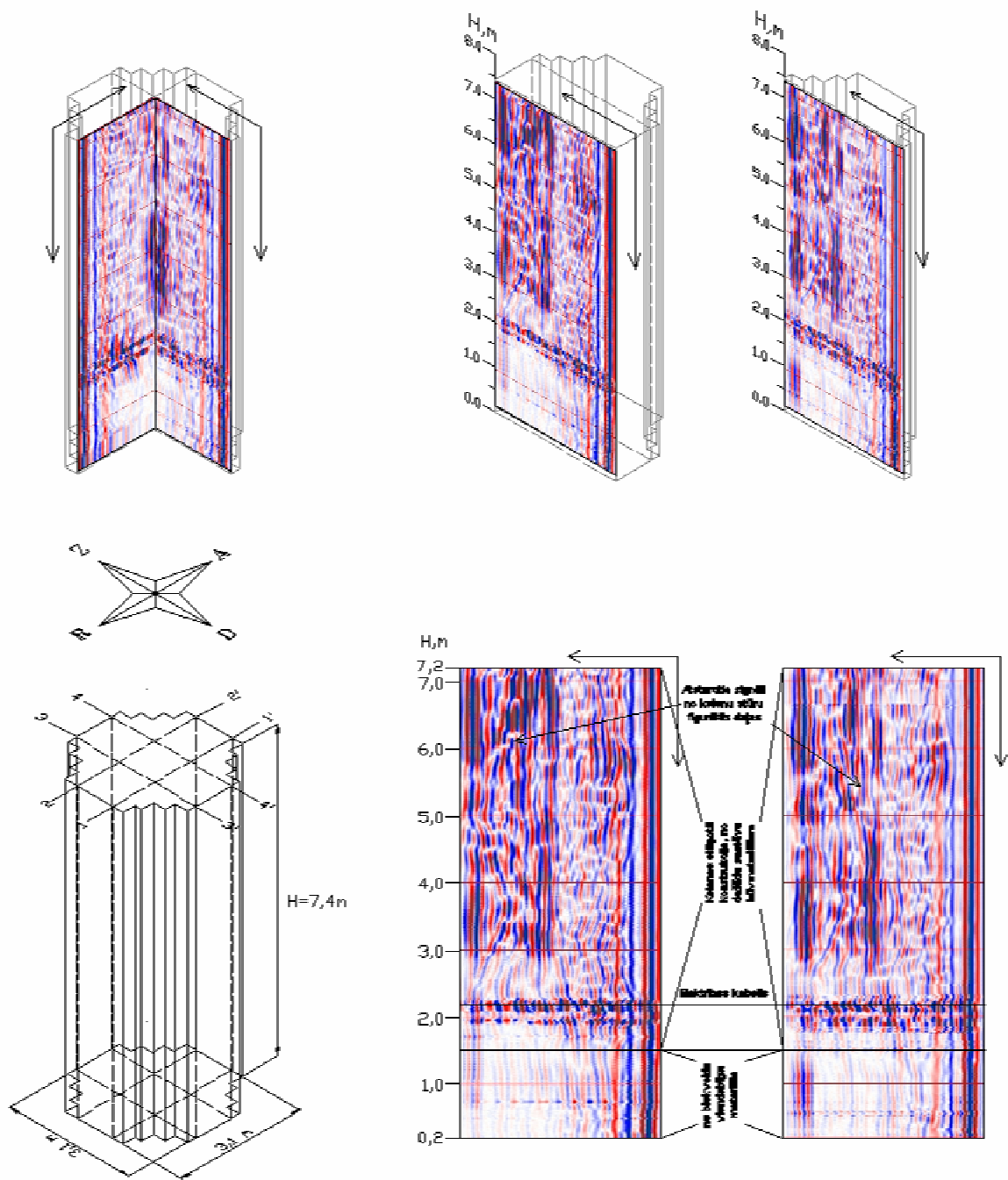


Att. 2.22. Kolonas (zona „L”) skanēšana ar ģeoradaru [81].

Rīgas Doma baznīcas vertikālo konstrukciju skanēšanu veica SIA „BALT- OST- GEO” [81], parādot kolonas (zona „L”) nenožīmīgu neviendabību un atspoguļojot tās ehogrammu veidā savstarpēji perpendikulārās plaknēs, sk. 2.23. un 2.24. attēlus.



Att. 2.23. Kolonas (zona „L”) ehogramma rietumu / austrumu virzienā [81].



Att. 2.24. Kolonas (zona „L”) ehogramma ziemeļu / dienvidu virzienā [81].

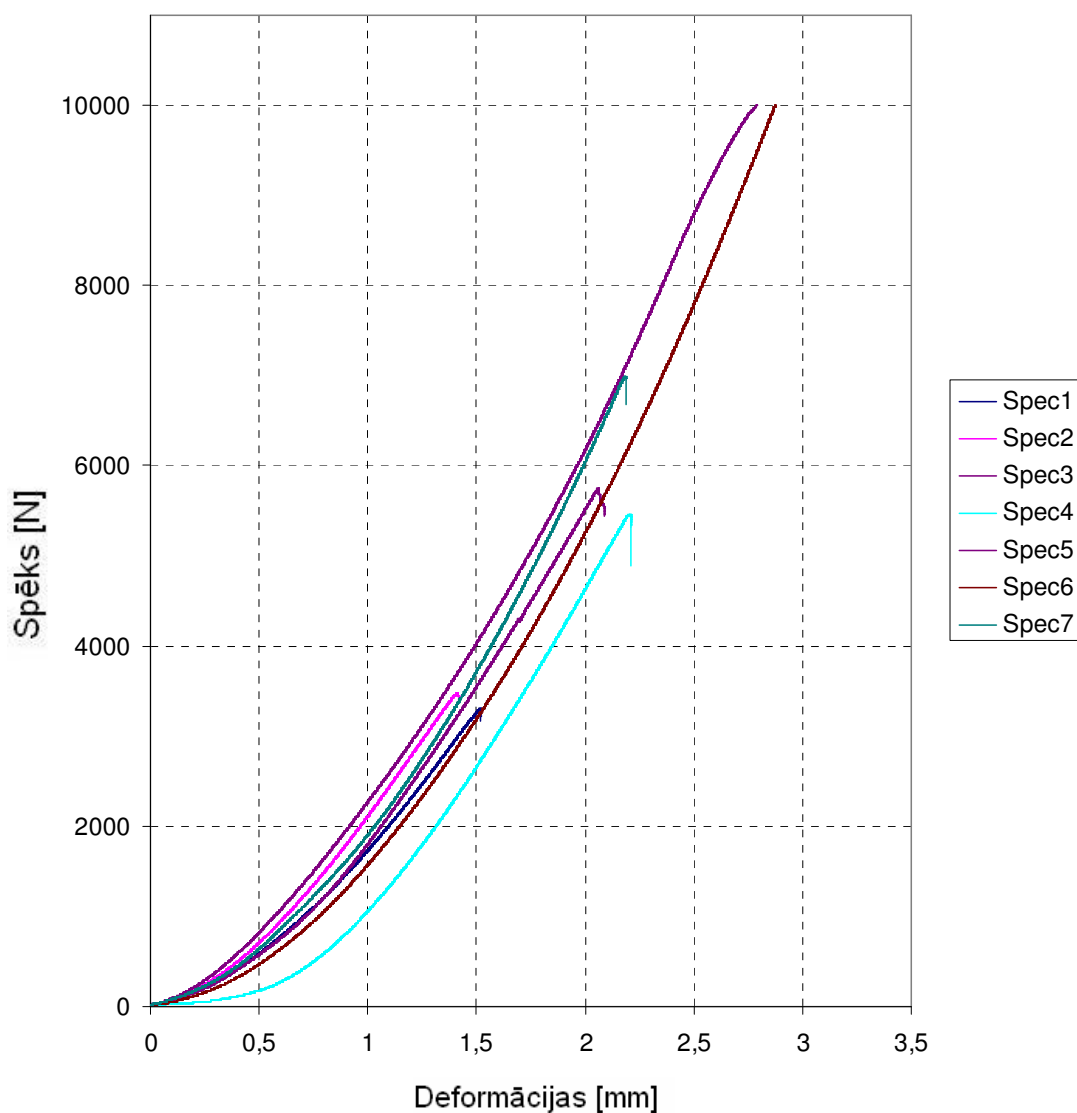
Mūra pārsegumu skanēšana ar ģeoradaru ir pilnīgi neapgūta un šādu darbu veikšana ir apgrūtināta sarežģītās ģeometrijas un atrašanās vietas dēļ. Mūra velvju radiatora zondāža nav nozīmīga, salīdzinot ar vertikālo atbalstošo konstrukciju skanēšanu. Mūra tehnoloģija velvju pārsegumiem vienmēr pieprasījusi augstāko darbu veikšanas standartu, mūra šuvju aizpildījuma ideālu kvalitāti un gados uzkrāto proporciju un pārsiešanos ievērošanu.

Sonogrāfijas pielietošana mūra skanēšanā apskatīta plašos pētījumos [132; 137; 138; 139; 140] un šīs metodes attīstība norisinās ļoti strauji. Tomogrāfija, kura sākotnēji attīstījies medicīnas nozares vajadzībām, arvien plašāk tiek pielietota dažādu telpisku ķermeņu un grunts izpētei. Par ļoti nozīmīgu šīs tehnoloģijas attīstības virzienu jāuzskata trīs dimensiju skanējuma iegūšana skanēšanas ehogrammu apstrādes rezultātā. Atstarotā signāla nospiedums ir telpisks un to apstrādājot ar filtriem, iegūst defektu, iestrēgumu un nevienādību telpisku virtuālu modeli. Izšķir TT tomogrāfiju, kuras pamatā ir signāla pārvietošanās laika mērījumi, un AT tomogrāfiju, kuras pamatā ir signāla absorbcijas mērījumi materiālā.

2.10.5 Mūra materiālu izpēte

Rīgas Doma baznīcas mūra materiālu īpašību izpēte un zinātniskajos rakstos publicētās laboratorisko pētījumu atskaites ir devušas priekšstatu par homogenizēta mūra materiāla elastīgajām un plastiskajām īpašībām. Testējot mūra paraugus, iegūta robežstiprība spiedē: $R_{\min} = 4.2 \text{ MPa}$, $R_{\text{vid}} = 5.82 \text{ MPa}$ un $R_{\max} = 9.2 \text{ MPa}$.

Promocijas pētījuma ietvaros veikti trīs punktu lieces testi, lai noteiktu Rīgas Doma baznīcas mūra ķieģeļu materiāla stiprības raksturlielumus. Trīs punktu lieces tests parāda galveno tendenci ar kuru būs jāastopas mūra konstrukciju analīzē – mūra materiāla nevienādību un trauslu sagrūvuma raksturu. Testētie materiāli sadalās vairākās grupās, kuru lieces stiprība atšķiras par 50%. Kā iemesls šādai materiālu īpašību izkliedei, jāmin primitīvais ķieģeļu izgatavošanas process, nenodrošinot izejmateriāla viendabību un izgatavošanas procesa nemainīgumu.



Att. 2.25. Māla ķieģeļu trīspunktu lieces testa grafiki.

7 ķieģeļu trīspunktu lieces tests [34], pētot vēsturiskos ķieģeļus no Rīgas doma baznīcas karnīzes daļas, parāda materiāla deformatīvās īpašības un lieces pretestību mūra akmens materiālā. Attēlā 2.25., atspoguļotie testa grafiki, parāda vēsturisko ķieģeļu materiālu ievērojamu lieces pretestības izkliedi.

Vēsturiskais ķieģeļu ražošanas process un tā zemā industrializācija nosaka materiāla sabrukuma robežas rezultātu izkliedi 1,7 reizes.

Dažādi ražotāji un lokālo mālu iegulu atšķirības ir lielās izkliedes pamatā. Izejmateriālu izvēle lielā mērā ir atkarīga no lokāli pieejamajiem materiāliem [1]. Jau Romas impērijas laikos arhitekts un inženieris Vitruvijs savos būvniecības likumos “de Architectura” [132] aprakstīja māla materiāla atlases svarīgumu, lai nodrošinātu izgatavoto ķieģeļu stiprību un ilgmūžību. Rīgas Doma baznīcas pamati un vertikālās konstrukcijas veidotas apdedzinātu

māla ķieģeļu un dolomīta akmeņu mūrī, lietojot kaļķu javu. Dolomīta akmens uzskatāms par vietējas izcelsmes būvmateriālu un tā ieguve veikta Rīgas apkaimē, piemēram, Saulriešos.

Apsekojot Rīgas Doma baznīcas mūrus, pēc ķieģeļu izmēriem varam izdalīt vairāk kā četrus atpazīstamus ķieģeļu ražotājus. Pēc vietēja marķējuma var atpazīt „Pēterceplā” ražotos ķieģeļus, par ko liecina speciāls reljefa zīmogs. Pārējo izmēru tipu ražotāji nav atpazīstami, jo nav saglabājušās katra ražotāja izmēru specifikācijas. Pēc VKPAI arhīva datiem, ķieģeļi ievesti arī no Gotlandes un Hamburgas.

Restaurācijas institūts 1990. gadā veicis Rīgas Doma baznīcas mūra javai ķīmiskās analīzes, lai pētītu saistvielu galvenās raksturojošās komponentes [109]. Šī pētījuma dati paver iespēju izstrādāt vēsturiskajai mūrjavai atbilstošas kaļķa javas recepti un veikt jaunizveidotu paraugu laboratoriskas analīzes.

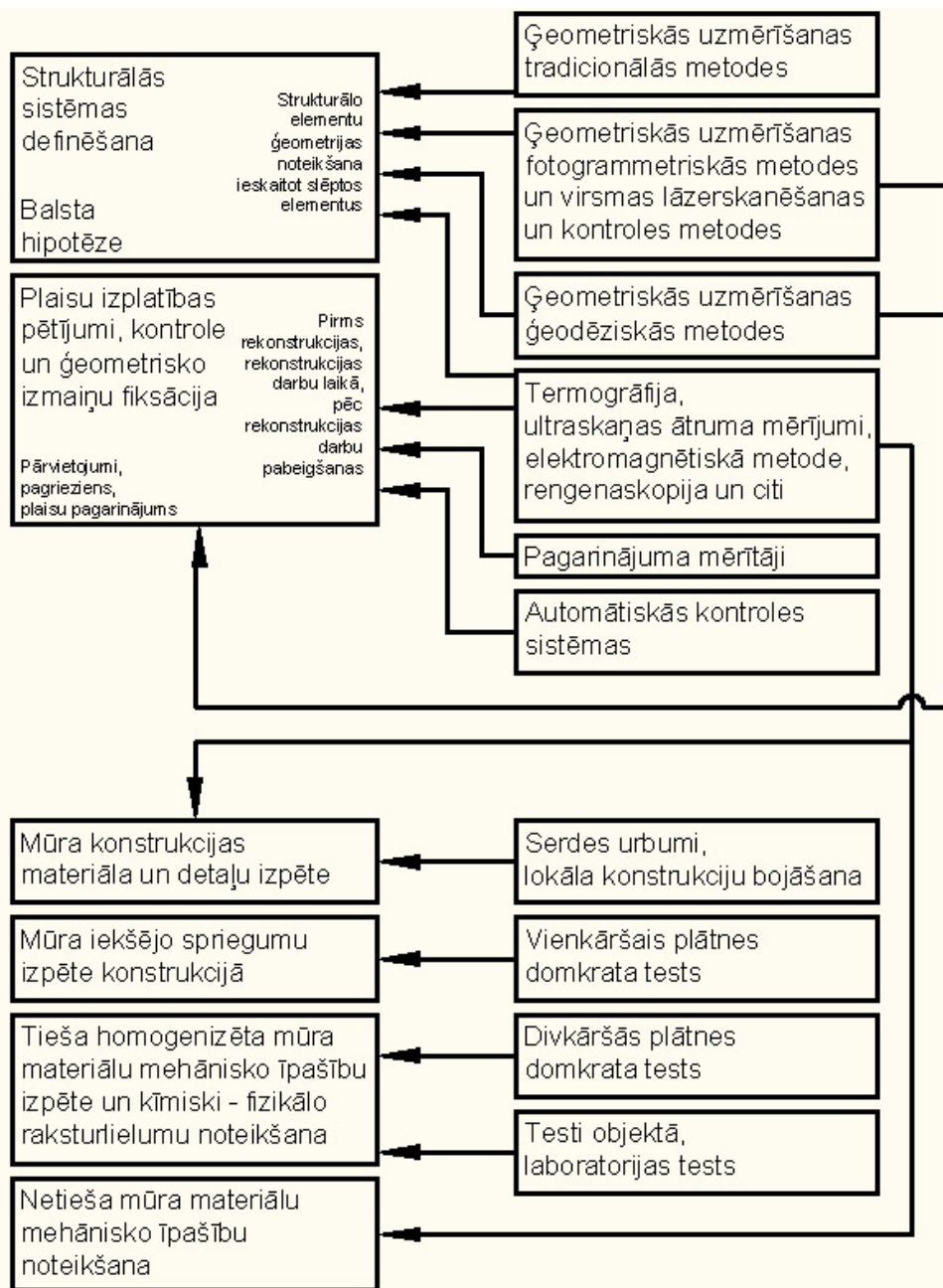
2.11 Esošu mūru materiālu testēšanas metožu izvēle

Mūris ir kompozīts materiāls, kurš sastāv no mūra akmeņiem un mūrjavas. Katra materiāla nošķirta izpēte dod ķieģeļu un javas mehāniskās īpašības. Nošķirti izpētot katru mūra materiālu, to īpašības varam lietot diskretizētā mūra aprēķina modeli. Modelējot mūra elementus, lietojot diskretu mūra materiāla modeli, iegūstam spriegumstāvokli mūra masīva iekšienē un materiālu atšķirīgo deformatīvo īpašību radītos efektus. Mūra stiprības un elastības raksturlielumu iegūšanai pielieto laboratoriskos un esošās konstrukcijas testus uz vietas.

Promocijas darbā izdalīti esošu mūra konstrukciju pētījuma mērķi:

- a) konstrukcijas drošības līmeņa noteikšanai,
- b) būves rekonstrukcijas gadījumā,
- c) rekonstrukcijas risinājumu efektivitātes izvērtēšanai,
- d) ilgtermiņa būves ekspluatācijas monitoringa izvērtēšanai.

Materiālu īpašību noteikšana un noteikšanas metodes aprakstītas [4; 5] pētījumā par mūra konstrukciju analīzes metodiku, sk. 2.26. attēlu.



Att. 2.26. Pētījumā [4] norādītā shēma par nepieciešamajiem datiem un atbilstošajām izpētes metodēm.

Mūra paraugu iegūšana un laboratoriskā testēšana bieži vien ir pārāk dārga, ierobežota no vēsturisko ēku saglabāšanas noteikumiem un neraksturo visu mūra materiālu kopumā. Di Tommaso pētījumā [50] izstrādāta metodika, kā pielietot nesagraujošos testus mūra homogenizētu īpašību noteikšanai. Nosakot mūra materiālu fizikālās un mehāniskās īpašības, jālieto vairākas nesagraujošo testu metodes, kuru rezultātiem jāveic savstarpēja kalibrācija.

Apkopojot augstāk minēto pētījumu atziņas, promocijas darbā izvirzītas galvenās vēsturisko ēku materiālu īpašību iegūšanas un testēšanas problēmas:

- a) liels skaits dažādu izmēru materiālu pielietojums mūra konstrukcijā, kas nosaka gan dažādas elastības, gan stiprības raksturlielumus;
- b) liels skaits dažādu īpašību materiālu pielietojums vienā mūra konstruktīvajā elementā, kas nosaka materiāla īpašību ievērojamu izkliedi;
- c) datoranalīzei nepieciešamo datu ieguve gan no laboratoriskiem testa datiem, gan no pētnieciskās literatūras, kas rada kļūdas materiālu īpašību definēšanā;
- d) lielas būvkonstrukcijas, kuru iekšienē bieži pielietoti citas kvalitātes būvmateriāli, bērti būvgruži vai iestrādāts pildbetons, kas nosaka atšķirīgus sabrukuma principus pret homogenizētu mūra materiālu;
- e) dobumu atrašanās lielu masīvu iekšienē, kas rada sabrukuma iniciācijas zonu;
- f) plaša raksturlielumu izkliede ar rokām ražotiem materiāliem, kas nosaka paaugstinātu nepieciešamo mūra materiālu testu skaitu;
- g) laboratorijas un vietas testu sadārdzinājums, lielās materiālu īpašību izkliedes dēļ;
- h) dažāds būves tehnoloģiju pielietojums vienas būves ietvaros, kas nosaka atšķirīgu konstrukcijas daļu mijiedarbību;
- i) pārrāvumi būvniecības procesā, projekta izmaiņas un pārbūves, kas nosaka sprieguma stāvokļa izmaiņas pret viendabīgu mūra masīvu;
- j) vispārējas stabilitātes problēma no esošās, deformētās konstrukcijas, kas nosaka mūra daļu kontaktu un konstrukcijas pārtrauktību;
- k) neatbilstība mūsdienu analīzes metodēm un slodžu principiem, kas nosaka nelineāras analīzes pielietošanu esošu mūru analīzē;
- l) ierobežota mūsdienīgu rekonstrukcijas materiālu un tehnoloģiju pielietošana, kas nosaka ierobežotu materiālu un konstruktīvo risinājumu pielietojumu rekonstrukcijas risinājumiem.

Lai novērtētu mūra materiālu mehāniskās īpašības esošu vēsturisko ēku konstrukcijās, ieteicams lietot nesagraujošās testa metodes. Tās sniedz drīzāk kvalitatīvu informāciju, nevis precīzas skaitliskas materiālu īpašību vērtības. Dinamiskais un deformāciju monitorings, infrasarkanā termogrāfija, radara un ultraskaņas skanēšana un ultraskaņas ātruma mērījumi ir visbiežāk lietotās nesagraujošās testa metodes objekta izpētei uz vietas.

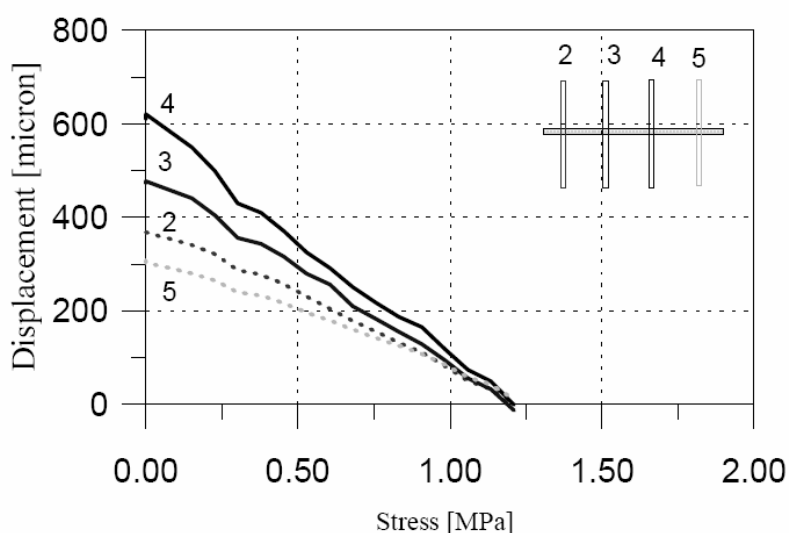
Nesagraujošie testi var tikt lietoti šādu iemeslu dēļ:

- a) slēpto konstruktīvo elementu noteikšanai;
- b) mūra materiālu identificēšanai;
- c) bojājumu izplatības zonas noteikšanai plaisājušās konstrukcijās;
- d) tukšumu un kavernu noteikšanai konstrukciju iekšienē;

- e) mitruma piesātinājuma lokācijai;
- f) virsmas vai mūra slāņu delaminācijas noteikšanai.

Mūra materiālu mehānisko īpašību korelācija starp nesagraujošajiem testiem un laboratorijas testu datiem ir visnotaļ apgrūtināta [139].

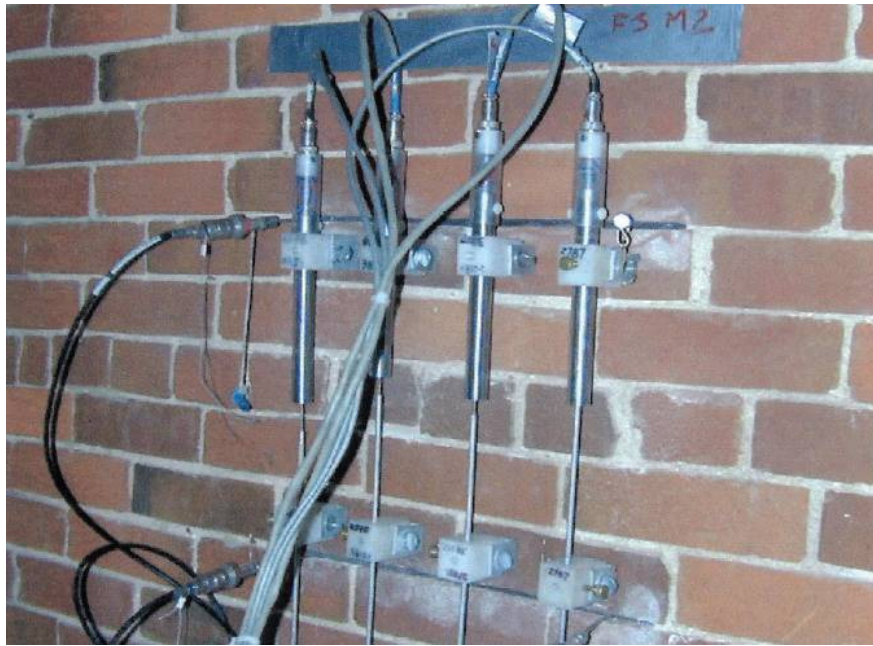
Plakanā domkrata tests ir spriegumu noteikšanas metode reālā objekta konstrukcijā. Pirmo reizi šāda veida testi tika veikti 1982. gadā un atspoguļoti pētījumu atskaitēs [110; 111; 113; 114; 115], aprobējot šo testa metodi vēsturisko mūra konstrukciju izpētei. Tests noris izfrēzējot šuvi un frēzējuma vietā ievietojot plātnes domkratu. Šī testa metode pieskaitīta [30] pie daļēji graužošajiem testiem, jo tiek bojāts mūris nelielā apjomā un šo bojājumu ir viegli labot. Testa principiālās darbības pamatā ir spriegumu atbrīvošanās un to izraisīts materiāla pārvietojums frēzējuma vietā. Uzstādot deformāciju mērierīces pirms frēzējuma veikšanas, tiek veikts nolasījums, kurš parāda deformētā materiāla spriegumstāvokli pie konstrukcijā esošā slogojuma. Metodes pamatā ir ASTM, 1991 metodika [6]. Veidojot mūra šuves frēzējumu apkārtējā mūra elementā samazinās iekšējie spriegumi un frēzējuma vietu saspiež.



Att. 2.27. Tenzometru nolasījumi, veicot vienkāršā plātnes domkrata testu Monza Tower [30].

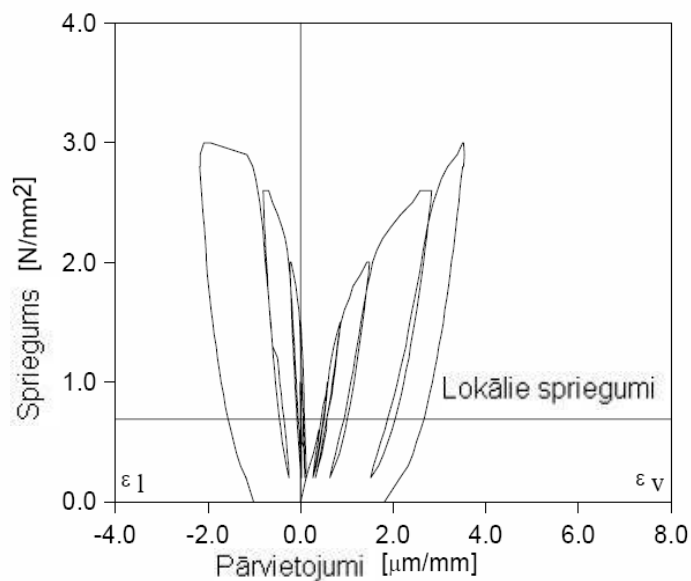
Frēzējumā, ievietojot plakano domkratu un paaugstinot tajā hidraulisko spiedienu, veido atgriezenisku deformāciju sprieguma relaksācijas deformācijām, sk. 2.27. attēlu. Testa metodi lieto, lai noteiktu mūra materiāla deformatīvās īpašības.

Lai veiktu mūra materiāla deformāciju mērījumus un noteiktu homogenizēta mūra materiāla elastīgās īpašības, iepriekšējos pētījumos [12; 24; 113] izveidota metodika dubulto plakano domkratu testu pielietošanai, sk. 2.28. attēlu.



Att. 2.28. Dubulto plakano domkratu testa aprīkojums ar tenzometru izvietošanu [24].

Iegūtie grafiki parāda mūra iecirkņa sprieguma deformāciju diagrammu reālajā mūra konstrukcijā, sk. att. 2.29.



Att. 2.29. Dubulto plakano domkratu un deformāciju mērītāju pārvietojumu grafiks [24].

Ievietojot mūra konstrukcijā divus savstarpēji paralēlus plakanos domkratus, mūra ietvertā daļa tiek slogota vienass spiedē. Deformāciju mērītājus izvieto gan testa iecirkņa garenvirzienā, gan šķērsvirzienā. Dubulto plakano domkratu tests ļauj noteikt mūra materiāla īpašības pietiekami lielā apgabalā, lai šīs īpašības varētu attiecināt uz mūri, kā kompozītu

materiālu. Izmērītās deformatīvās īpašības homogenizēta mūra aprēķina modeļi apraksta ar vairāku posmu elastības diagrammu.

Laboratorijas testi ir destruktīvie, jo vienmēr ir saistīti ar paraugu iegūšanu no apskatāmā objekta. Paraugu iegūšana vienmēr izraisa bojājumus esošo vēsturisko mūru konstrukcijās.

Laboratorijas testu mērķi ir sekojoši:

- a) noteikt materiālu fizikālā īpašības;
- b) noteikt materiālu mehāniskās īpašības;
- c) noteikt materiālu ķīmiskās īpašības;
- d) noteikt materiālu izcelsmi;
- e) noteikt materiālu savstarpējo kompozīciju, lai projektētu atbilstošus remonta materiālus;
- f) testēt remonta materiālu ietekmi uz vēsturisko mūra materiālu, lai izslēgtu nelabvēlīgu remonta materiālu ietekmi.

Laboratorijas testu nepieciešamībām sagatavot paraugus no jauniem materiāliem nesastāda grūtības un iespējams izveidot parauga ģeometriju atbilstoši testa metodikas noteiktajām dimensijām. Mūra paraugu iegūšana eksistējošās vēsturiskās ēkās saistīta ar ierobežojumiem gan no materiālu raksturojošo paraugu viedokļa, gan no to dimensiju variācijām.

Testa paraugiem tiek izvirzītas prasības:

- g) paraugi jāņem respektējot esošās būves vēsturisko vērtību;
- h) paraugu apjomam un ģeometrijai jāatbilst izvēlētajai testa metodikai;
- i) testējot materiālu degradāciju, paraugiem jāraksturo gan degradēto materiālu zona; gan bez degradācijas efekti;
- j) parauga relatīvajam mitrumam ir jāprezentē reālā situācija vēsturiskās ēkas daļā konkrētajā parauga ņemšanas vietā;
- k) paraugu apjomam jānodrošina datu statistiskā apstrāde ar pietiekamu varbūtības līmeni.

Javas paraugu materiālu īpašību noteikšanai nav standartizētas testa metodikas, kura attiektos uz esošām ēkām. Paraugu ņemšana nenodrošina nepieciešamos paraugu izmērus un sniedz informāciju tikai par javas saistvielu degradācijas pakāpi. Mūrjavas ķīmiskā analīze ir viena no raksturlielumu noteikšanas metodēm, kura sniedz pastarpinātu informāciju par javas mehāniskajām īpašībām. Ķīmiskās analīzes ietvaros var noteikt saistvielas tipu, pildvielu tipu, saistvielu / pildvielu attiecību, kaļķu karbonizācijas pakāpi, papildus ķīmisko reakciju

produktu saturu. Ķīmisko reakciju produktus pētījis Baronio [10], tos apskatot detalizēti un izdalot pucolāna reakcijas, saistvielas / pildvielu reakcijas un sārmu / saistvielu reakcijas.

Ņemot javas paraugus un pētot tos laboratoriski, pētījumā [9] noteikts pildvielu granulometriskais sastāvs. Kaļķu javas sastāvā ietilpstošās silīcija pildvielas ķīmiskā atdalīšana no saistvielām un granulometriskā šķirošana ļauj noteikt javas pildvielu un saistvielu proporcijas. Šādi veikta javas ķīmiskā analīze dod iespēju restaurēt vēsturiskā mūra javas recepti un veidot metodikai atbilstošus javas mehānisko īpašību noteikšanas testus, kā arī pielietot šo sastāvu vēsturiskās ēkas renovācijā.

Visplašāk pielietotā daļēji sagraujošā testa metode ir Šmita virsmas cietības tests [51; 103]. Ar Šmita āmuru varam novērtēt mūra materiālu virsmas cietības rādītājus proporcionāli pret citu šīs pašas ēkas mūra virsmu. Esošiem vēsturiskajiem mūriem ieteicamas daļēji sagraujošās testa metodes, kā:

- a) Šmita virsmas cietības tests [51; 103];
- b) enkura griezes tests [134];
- c) urbšanas tests [133];
- d) PNT-G urbšanas zondes penetrācijas tests [52; 133].

No pašreiz pieejamajām esošo ēku mūra javu testa metodēm izvēlēta urbšanas penetrācijas testa metode PNT-G. Metodes procedūra, kalibrācija, metodes validācijas un instrumentālā nodrošinājuma apraksts doti vairākos pētījumos [54; 55; 56]. Metodes pamatā ir 4 mm urbja penetrācijas enerģijas mērījumi, urbi iedziļinot mūra šuves javā 5mm dziļumā. Testa metode labāko korelāciju ar sagraujošajiem testiem uzrāda vājām mūra javām.

Katrai no daļēji sagraujošajām testa metodēm ir trūkumi un ierobežojumi:

- a) Šmita āmurs var tikt lietots kaļķa javas šuvju testiem, taču cementa javas šuvēm paredzētā sitiena enerģija un rezultātu kalibrācijas kartes ir neatbilstošas;
- b) ar penetrācijas zondi var testēt raksturīgās mūra vietas, taču pētījuma rezultātus ietekmē izmaiņas mūra akmeņu materiālā vai apslēpti mūra iestrēgumi un tukšumi;
- c) enkuru izraušanas testi var tikt lietoti mūra akmens materiālu testiem.

Mūra akmens materiāls aprēķina modelī jādefinē, kā trausls materiāls, uz ko norāda RTU laboratorijās veiktie trīs punktu ķieģeļu lieces testi [34]. Vēsturiskajās ēkās pielietotā kaļķu java nodrošina mūra plasticitāti pa šuves materiālu un javas kontaktvirsmu ar ķieģeli. Testa rezultāti parāda šļūdes veidošanos mūra masīvā, kurus rada mūra javas plastiskās deformācijas.

Kā vēl viena materiāla definēšanas problēma jāmin dažādu akmens materiālu pielietošana vēsturiskajām būvēm, piemēram, pamatu zona mūrēta no dažādas stiprības, neregulāras formas dolomīta akmeņiem, velvju ribas no speciālas formas tēstiem granīta akmeņiem un formētiem ķieģeļiem. Mūra šuvju materiāla variācijas arī ir nozīmīgas, piemēram, lietojot dažādās karjerās raktus kaļķus iegūtas atšķirīgas saistvielas, katrā izgatavošanas apjomā nedaudz mainīga komponentu dozācija un šuvju biezuma variācijas. Rīgas Doma baznīcas kolonu radarskanēšana parādīja, ka kolonu iekšienē sastopams pildbetons un kolonā zonā „L” [sk. 3.15 attēlu] neliela izmēra kaverna.

Vairumā literatūras mūra aprēķina metodes balstītas uz elastības teoriju, lietojot mūra materiāla homogenizācijas principu un plātņu elementu datorsimulācijas metodi. Šādu paņēmieni var lietot lielos mūra apjomos, kuros iekšējie spriegumi ir zem 50% no spiedes pretestības, bet velvju pārsegumos, kur spriegumi tuvojas spiedes pretestībai, jālieto plasticitātes teorija.

Apstrādājot laboratorisko pētījumu datus, mūrim tiek pieņemti tabulā 2.4. apkopotie parametri, kuri lietoti datorsimulācijā, pielietojot būvkonstrukciju komerciālo datoranalīzes programmu Staad Pro.

tabula 2.4

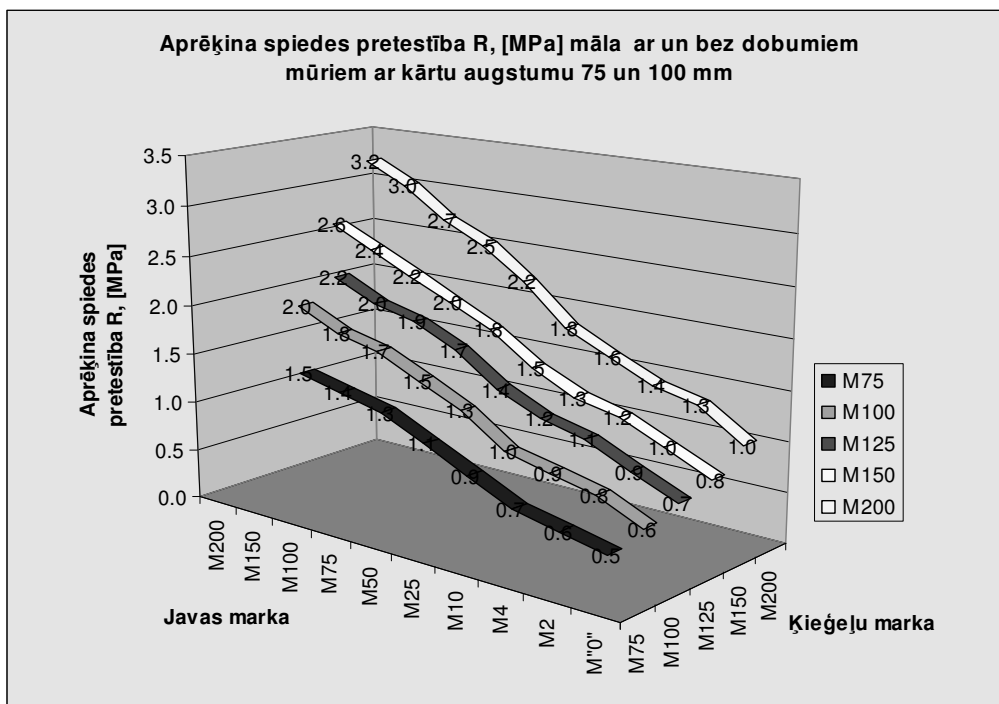
Pieņemtie, homogenizēta mūra materiāla raksturlielumi.

Sākotnējais elastības modulis	$E_0 = 3.6 \text{ GPa}$
Vidējais elastības modulis	$E_{\text{vid}} = 818 \text{ MPa}$
Junga modulis	$G = 1.2 \text{ GPa}$
Puasona koeficients	0.2
Termiskās izplešanās koeficients	$\alpha_t = 0.000005 \text{ 1/grāds}$
Akmens materiāla (ķieģeļa) spiedes stiprība	$R_1 = 4.5 \text{ MPa}$
Mūra javas spiedes stiprība	$R_2 = 2.5 \text{ MPa}$
Mūra spiedes pretestība	$R = 1.1 \text{ MPa}$
Mūra centriskas stiepes pretestība	$R_t = 0.05 \text{ MPa}$
Mūra cirpes pretestība pa gala šuvi	$R_{\text{sq}} = 0.11 \text{ MPa}$
Mūra stiepes pretestība liecē pa gala šuvi	$R_{\text{tb}} = 0.08 \text{ MPa}$
Mūra pretestība galvenajiem stiepes spriegumiem	$R_{\text{tw}} = 0.08 \text{ MPa}$
Rukuma efekta koeficients	$\nu = 2.2$
Mūra materiāla tilpumsvars	$\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$

Blīva māla ķieģeļu mūra materiālu homogenizēto īpašību diagrammas, atkarībā no ķieģeļu stiprības un mūra javas stiprības, dotas 2.30. un 2.31. attēlos

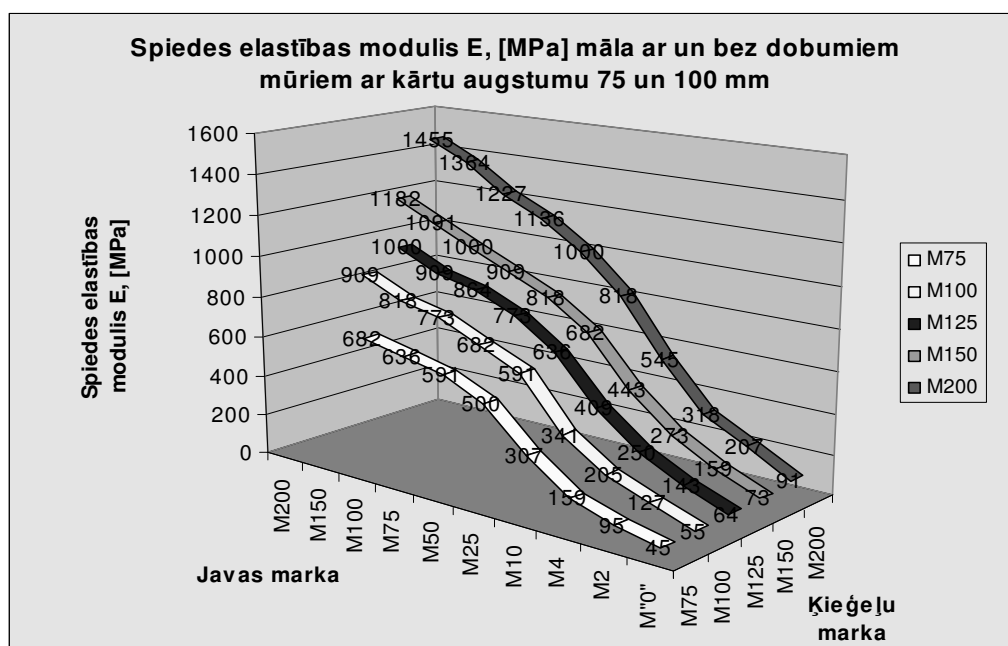
Latvijas būvnormatīvs [83] nosaka mūra stiprības un elastības raksturlielumu sakarības, analizējot mūra materiālu īpašības. Stiprības un elastības raksturlielumi atkarīgi no ķieģeļa un

javas robežstiprības spiedē. Apkopojot Latvijas būvnormatīvā [83] sniegtās māla ķieģeļu mūra spiedes pretestības, izveidots grafiks, sk. 2.30. attēlu, kurā parādīta mūra homogenizēta materiāla spiedes pretestības atkarība no mūra akmens un javas spiedes pretestībām.



Att. 2.30. Spiedes pretestība blīva māla ķieģeļa mūra konstrukcijām.

Mūra, kā homogenizēta materiāla, elastīgās īpašības analītiskiem aprēķiniem un datoraprēķiniem elastīgajā stadijā pieņemtas pēc Latvijas būvnormatīvos [83] definētās metodikas, sk. att. 2.31. Metodika nosaka lineāru elastības moduļa pielietošanu mūra konstrukciju aprēķinos, ievērtējot mūra šļūdes un rukuma efektus.



Att. 2.31. Elastības modulis blīva māla ķieģeļa mūra konstrukcijām.

Latvijas būvnormatīvs [83] nosaka maksimālos pieļaujamos tangensiālos spriegumus mūra šķērssgriezumā. Formulā 2.1 definēta plaisu veidošanās robeža no šķērsspēku iedarbes.

$$\tau_{red} \leq R_{sq} + 0.8 * \mu * \sigma_0 \quad (2.1)$$

,kur $\mu = 0.7$ – ķieģeļu un javas kontaktvirsmas berzes koeficients;

σ_0 – konstrukciju pašsvara radīti normālspriegumi ar koeficientu 0.9.

Konstrukciju datoraprēķinu programmas pieprasa materiālu elastīgo vai plastisko īpašību definēšanu. Lieces tests parāda mūra akmens materiālu trauslas īpašības, bet kompleksi mūra bloku pētījumi parāda plasticitātes iespaidu, ko rada spēku pārdalīšanās caur mūra šuves javu. Mūra konstrukciju plastiskie efekti var tikt definēti vai nu ar mūra materiāla homogenizācijas paņēmieni [83], vai ar kontaktvirsmu definēšanu starp atsevišķiem mūra akmens elementiem, pielietojot mūra diskretizācijas metodi. Lai gan diskreta materiāla darbības apraksta metode dotu daudz augstāka līmeņa analīzes iespējas [87], tai nepieciešams mūra materiāla dalījuma atbilstošs mūra akmens elementu dalījums, kas pie liela apjoma modeļiem ir praktiski nerealizējams. Darba ietvaros Rīgas Doma baznīcas velves modelētas ar mūra materiāla homogenizācijas metodi, ievērtējot šuvju plastiskos efektus un plīsuma formēšanās nosacījumus.

2.12 Homogenizēta mūra materiāla definēšana datoraprēķinos

Materiāla homogenizācija, ievērtējot kaļķa javas nelinearitātes efektus, ir pats populārākais mūra materiāla modeļa uzstādījums deformētu mūra konstrukciju datoranalīzē. Dažādu mūra materiāla virzienu neviendabība var tikt ievērtēta, aprakstot mūri kā anizotropu materiālu. Rots [117] izstrādājis metodi šādu mūra nelinearitāšu ievērtēšanai. Plaisu veidošanās mūra konstrukcijās balstīta uz trausla materiāla plīsuma mehāniku. Makro modelēšanas tehnikas, kuras izstrādājuši Lourenco un Rots [93], ir atzītas mūra analīzes pētījumos visā pasaulē un iekļauj mūra šuvju nelinearitātes efektus ar kompozīta interfeisa modeli.

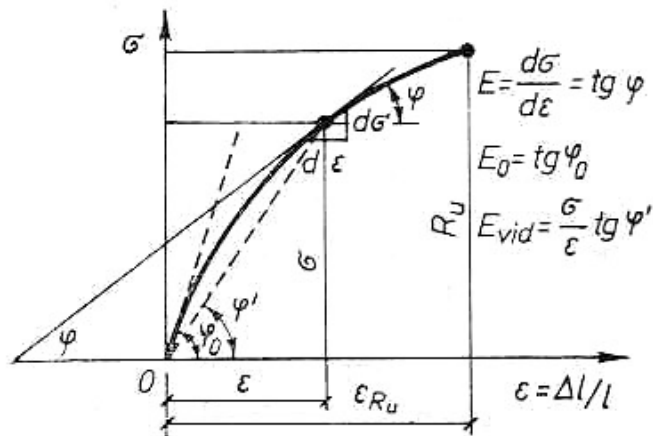
Šis modelis izskata trīs mūra plaknes vai konstrukcijas sabrukšanas mehānismus. Tīras stiepes sabrukums pa mūra šuvi:

- a) kolumba berzes spēku sabrukums pa šuvi no tangensiālajiem spriegumiem;
- b) eliptiskais normālspriegumu sabrukums;
- c) tangensiālo spriegumu kompleksā spriegumstāvokļa sabrukums.

Skaitliska mūra ēku modelēšana ar moderniem skaitļošanas rīkiem pieprasa papildu materiālu parametrus, piemēram, plīsuma stigrības koeficientu, elastības moduļa funkciju, robežstiprību katrā mūra virzienā, mūra materiāla blīvumu, sasaisti, akmens un kaļķa javas bīdes pretestību, berzes leņķi un plaisas enerģiju. Saplaisājis mūra karkasa daļu kontakts jādefinē ar berzes koeficienta ievērtēšanu kontaktvirsmā starp ķieģeli un kaļķa javu.

Šļūdes ietekmes un rukuma ietekmes ievērtēšana materiāla elastības rādītājos, ir vienkāršiem līdzekļiem realizējama analīzes metode. Mūris tiek pieņemts kā elastīgs izotropus materiāls ar lineāriem deformācijas moduļiem. Šo materiāla pieņēmumu un elastīgu aprēķina metodi izmanto vairums būvkonstrukciju projektētāju, neievērtējot mūra plasticitāti. Mūsdienu inženieru pretestība plasticitātes teorijai mūra aprēķinos ir līdzīga inženieru pretestībai elastības teorijai tās attīstības pirmsākumos. Mūra aprēķinu normatīvi [83] analītiskos aprēķinos pieļauj lineāri elastīgu mūra konstrukciju aprēķinus, jo mūra nestspēja tiek izmantota 50% robežās. Līdz šai robežai mūri var uzskatīt par lineāri elastīgu materiālu.

Spiedes elastības modulis mūra konstrukcijām ir tieši atkarīgs no mūra stiprības materiāla, garenstieģrojuma un šķērsstieģrojuma, slodzes lieluma un ilguma. Mūra deformācijas modulis ir nelineāra funkcija un Latvijas būvnormatīvos [83] sākotnējais deformācijas modulis aprēķinu atvieglošanai pieņemts divas reizes mazāks kā sākuma spiedes elastības modulis, sk. 2.32. attēlu. Mūra elastības moduļa un bīdes moduļa aprēķiniem var pieņemt Latvijas būvnormatīvā [83] sniegtās sakarības, kuras aprakstītas ar formulām 2.2; 2.3; 2.4 un 2.5.



Att. 2.32. Mūra spiedes elastības moduļa diagramma.

$$E = 0.5 * E_0 \quad (2.2)$$

,kur E – aprēķina elastības modulis homogenizētam mūra materiālam

E_0 – sākuma spiedes elastības modulis

Statiski nenoteicamās mūra konstrukcijās

$$E = 0.8 * E_0 \quad (2.3)$$

,kur E – aprēķina elastības modulis homogenizētam mūra materiālam

Bīdes modulis mūra konstrukcijām tiek pieņemts kā

$$G = 0.4 * E_0 \quad (2.4)$$

,kur G – Bīdes modulis

Mūra relatīvo deformāciju, ievērojot šļūdi, nosaka pēc formulas:

$$\varepsilon = \sigma * \nu / E_0 \quad (2.5)$$

,kur: ε – mūra relatīvā deformācija

σ - spriegums, pie kura nosaka relatīvo deformāciju

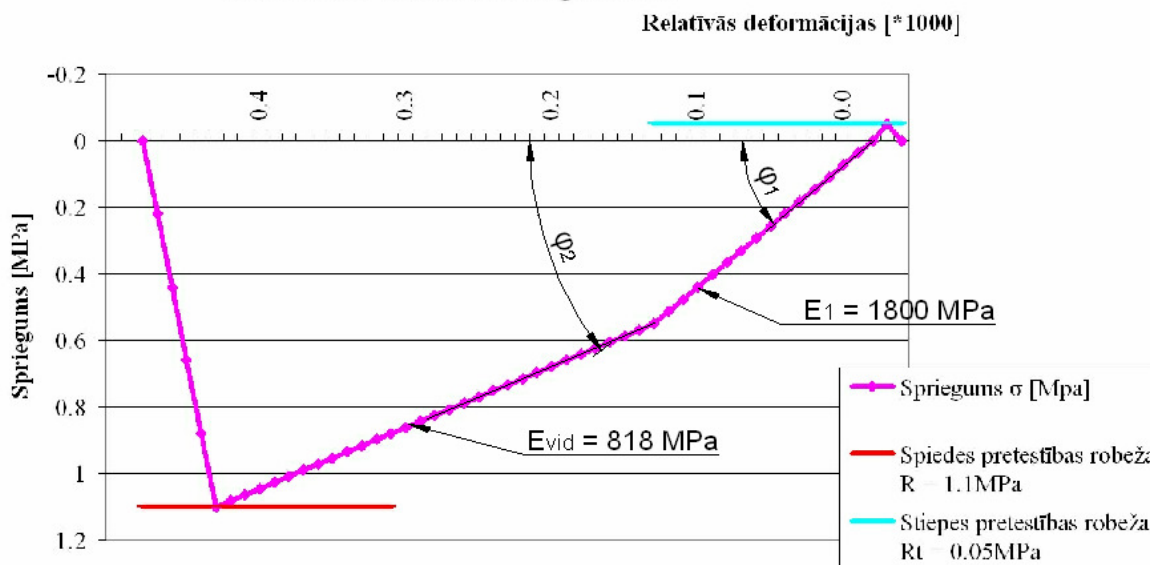
$\nu = 2,2$ mūrim no ķieģeļiem, kas izgatavoti ar plastiskas vai pussausas presēšanas metodi;

Šļūdes ietekmē mūra konstrukciju relatīvā deformācija palielinās 2.2 reizes. Šis raksturlielums jāievērtē arī datoraprēķinu modeļos, kā materiālu elastības raksturlielumu E pazeminošs koeficients. Šļūde norisinās 6 – 12 mēnešus pēc konstrukciju izveides un vēlāk var pilnībā apstāties.

Mūru tehnoloģija, veidojot telpiskas pārseguma konstrukcijas, homogēnā materiāla modelī ieviesīs korekcijas, jo mūrim dažādos virzienos ir dažādi elastības un stiprības

raksturlielumi. Ja tradicionālās mūra konstrukcijās var pieņemt horizontālas šuves virzienu un gala šuvi, tad mūra pārseguma čaulās mūra orientācija vērsta pret krusta velves ribām.

Materiāla elastības diagramma



Att. 2.33. Mūra elastības diagramma ar mūra nestspējas robežstiprību stiepē un spiedē.

Pielietojot mūra materiāla homogenizācijas metodi nelineāros mūra aprēķinos, jādefinē mūra elastīgo īpašību atkarība no spriegumstāvokļa šķērsgrīzumā, sk. 2.33. attēlu. Aprakstot materiāla elastīgo īpašību nelinearitāti, materiāla modelī ieviestas nestspējas robežas spiedē un stiepē.

Zemākam sprieguma līmenim, kā 50% no nestspējas, šļūdes efektu var ievērtēt kā deformāciju daļu. Šļūdes efekti pētīti [2; 86] lineāri elastīgam materiālu modelim, taču nelineārajā stadijā nav pietiekams pētījumu [100] apjoms. Šļūdes efekti tuvu nestspējas robežai plaši pētīti betona konstrukcijās. Standarta materiālu analīzes metodes projektēšanas nolūkiem homogenizētu mūra materiālu apskata kā lineāri elastīgu. Šī promocijas darba ietvaros lineāri elastīga materiāla analīze dod potenciālo sprieguma koncentratoru lokācijas vietas, taču nespēj sniegt atbildi uz plaisu attīstības prognozēm un balstu sēšanās deformāciju efektiem apskatāmajā mūra konstrukcijā. Būvnieki senatnē veidojuši ļoti masīvas mūra konstrukcijas un izvietojusi materiālu neproporcionāli iekšējiem spēkiem konstrukcijās. Pašsvara slogojums un spriegumu sadalījumam neproporcionālais materiāla izvietojums izraisa dažu konstrukciju pārslodzi, sasniedzot mūra materiāla nelineāras šļūdes robežu. Velvju čaulas spriegumu augstais līmenis, ekspluatācijas laikā mainoties velves ģeometrijai, ir par iemeslu velvju pārseguma sabrukumam, sasniedzot nelineāras šļūdes robežu.

Esošu ēku mūra pārsegumu čaulu šķērsgrīzums ekspluatācijas slogojuma un balstu deformācijas ietekmē tiek pārslogots. Balstu deformāciju ietekmē veidojas caurejošas plaisas

mūra velvju pārsegumā, taču to ekspluatācija iespējama arī pēc caurejošu plaisu veidošanās, kas pamatojams ar velvju pārseguma ģeometriju un mūra daļu kontaktu. Analizējot mūra pārsegumus, veikta deformētu velvju ekspluatācijas drošības kritēriju izstrāde.

3. VELVJU PĀRSEGUMU DROŠAS EKSPLOATĀCIJAS KRITĒRIJU IZSTRĀDE

Mūra konstrukciju tehnoloģijas pirmsākumos veidoja vertikālas nesošas konstrukcijas, taču jau senajām civilizācijām radās nepieciešamība pārsegt durvju un logu ailas un lineāras ejas. Pirmie mēģinājumi un neveiksmes, uzstādot lineāras akmens pārsedes no viena elementa, noveda pie jaunām zināšanām par ailu pārsedžu konstrukcijām, tādējādi paverot ceļu arkveida konstrukcijām. Dabā sastopami klints veidojumi, kuri senos amatniekus uzvedinājuši uz proporciju principu pielietošanu. Šādas zināšanas nododot nākamajām paaudzēm, attīstījās mūrnieku un amatnieku apvienības. Nākamais tehnoloģiskais solis mūra tehnoloģiju attīstībā bija telpiska mūra pārseguma veidošana. Viens no pirmajiem ēku likumu krājumiem bija “de Architectura” desmit sējumos, ko sarakstījis romiešu arhitekts Marcus Vitruvius Pollio [131], apmēram 1.gs. Pamatnoteikums, pēc kura konstruēja mūra pārseguma konstrukcijas, bija „vienas centrālās trešdaļas” likums, kurš noteica, ka spēkam jāpārvietojas no elementa uz elementu pa šķērsriezuma augstuma trešdaļu šķērsriezuma centrā. Līdz pat būvzinātnes attīstībai ģeometriskās aprēķina un konstruēšanas metodes bija noteicošās mūra pārsegumu būvniecībā. Būvniecības zinātnes attīstība un elastības teorijas pielietošana būvkonstrukciju aprēķinos drīzāk deva iespēju analizēt jau uzbūvētas telpiskas mūra pārseguma konstrukcijas nekā tās projektēt. Zināšanas par pārseguma proporcijām tika saglabātas viduslaiku amatu apvienībās vai cunftēs.

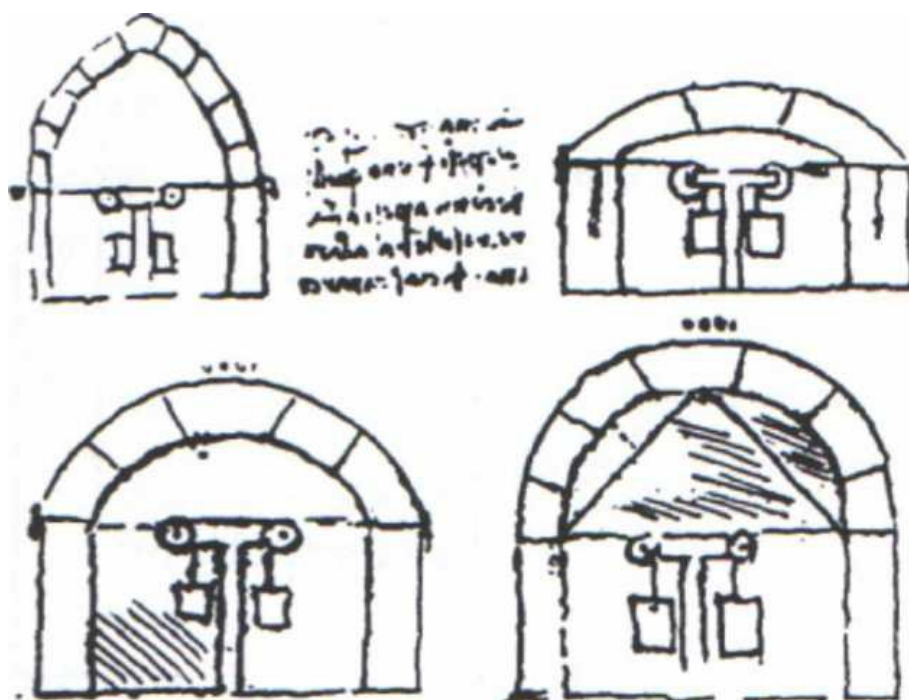
3.1 Aprēķina modeļu vēsturiskā attīstība

Līdz būvniecības zinātnes attīstības pirmsākumiem mūra konstrukcijas tika uzskatītas par nedeformējamu ķermeņu kopumu, kurā spiedes spēki tiek nodoti pa kontakta plaknēm perpendikulāri to virsmai. Mūrnieku cunftēs tika saglabāta informācija [38] par laika pārbaudes izturējušām ģeometriskajām mūra konstrukciju proporcijām.

3.1.1 Kontakta spēku metode

Kopš seniem laikiem mūra ēkas tika būvētas pēc atlases metodes, nākamā ēka tika būvēta pēc iepriekšējās, laika pārbaudi izturējušās ēkas principa. Leonardo da Vinci 15.gs.

ieinteresējās par arku balstbīdes spēkiem [144], sk. 3.1. attēlu. Nav saglabājušās ziņas par pētījuma rezultātiem.

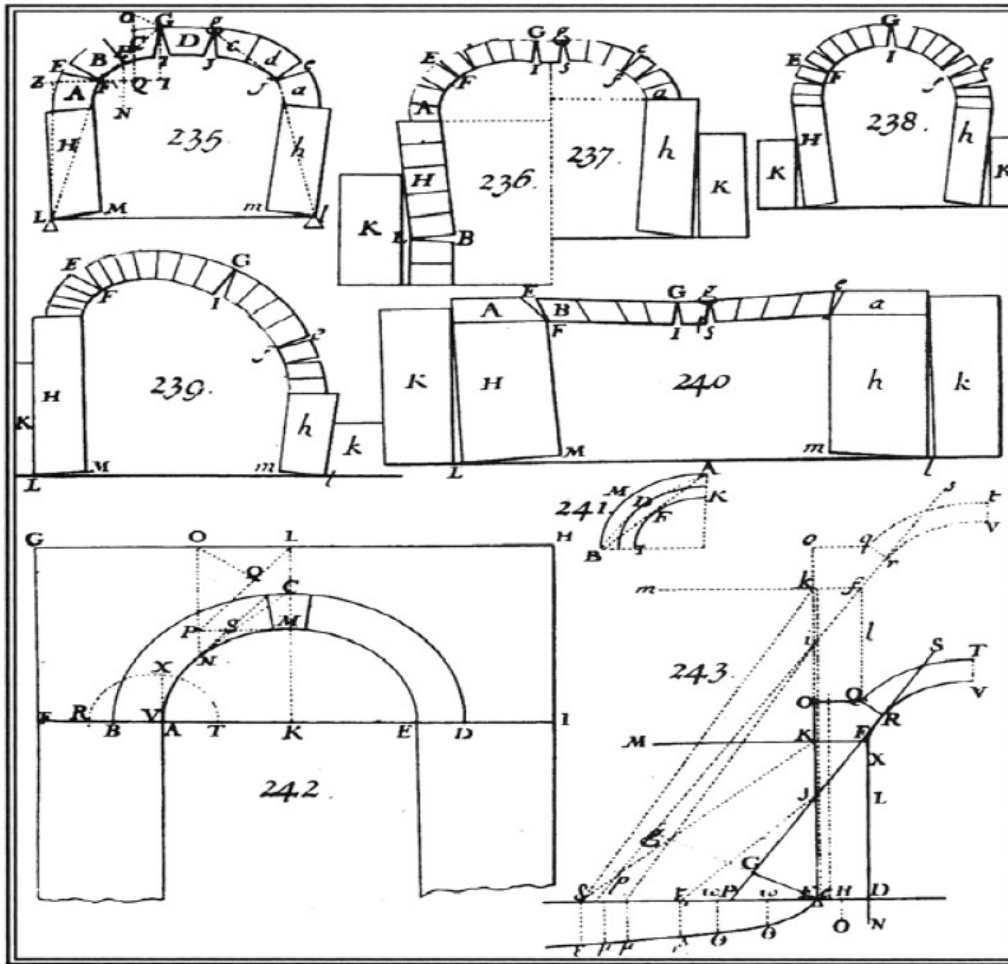


Att. 3.1. Leonardo da Vinci pētījums par arku balstbīdes spēkiem. [144]

Līdz 17.gs. nav dziļāku pētījumu par arkas un velvju pārsegumu darbības principiem.

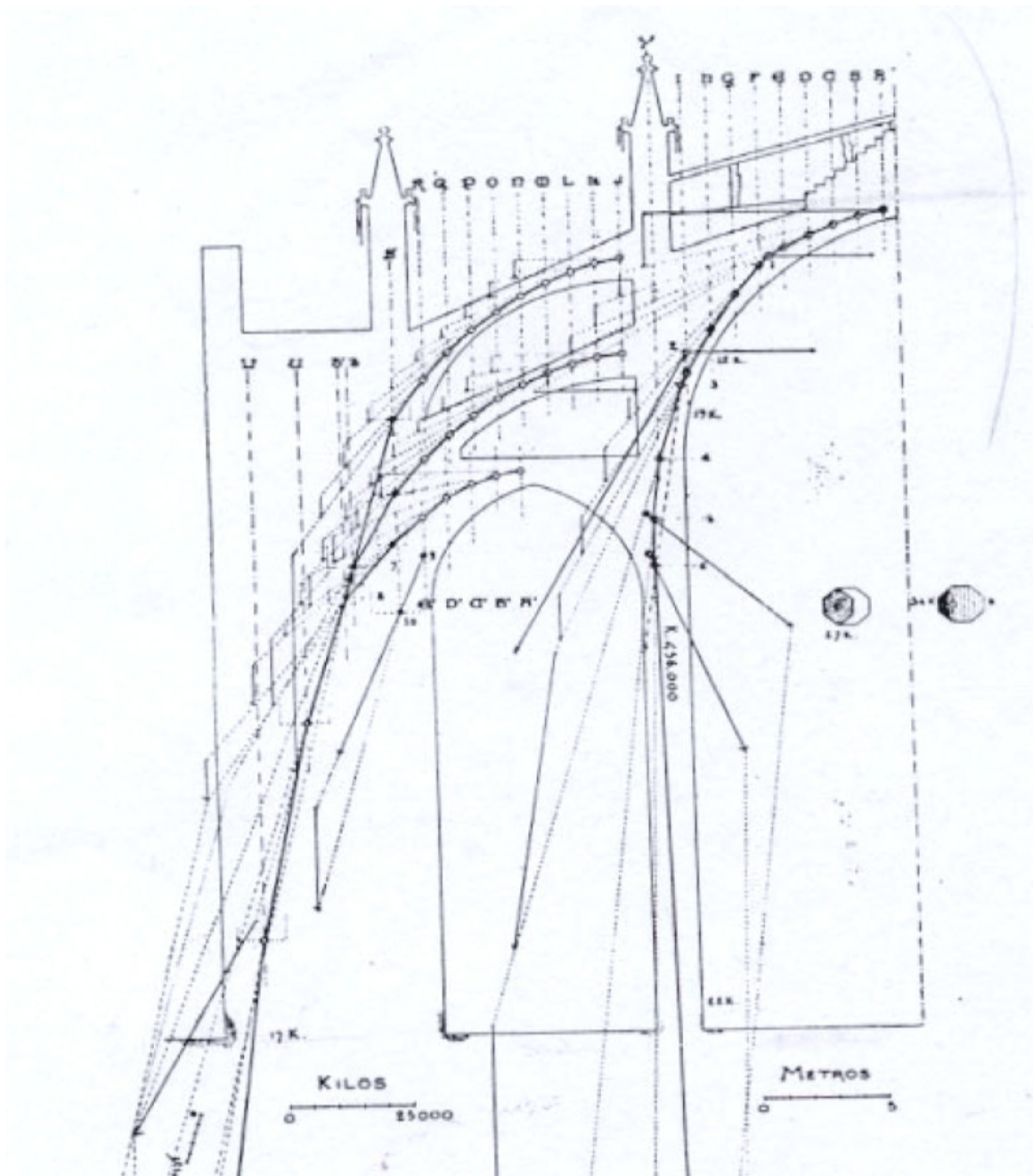
Kolombs (Coulomb) savā esejā par statiku [59] definēja spēku līdzsvaru starp gravitācijas un spiedes spēku velves pārsegumā.

Heyman būvkonstrukciju analīzes attīstības vēsturiskajā apkopojumā [63] sniegta secīga informācija par arku un velvju pētījumiem senatnē, kas koncentrētā veidā izklāstīta šajā nodaļā. 1730. gadā Couplet veica ģeometrisku modelēšanu, lai izprastu balsta reakciju darbību velvju pārsegumā. 1732. gadā Danyzy, sk. 3.2. attēlu, turpināja Couplet iesākto un padziļināti pētīja velvju balstu deformācijas ar ģeometriskām metodēm, ieviešot pieņēmumus, ka mūra bloki ir nedeformējami, nepastāv to sasaiste un nenotiek mūra bloku nobīdīšanās paralēli plaisai. Danyzy izvirzītie pieņēmumi saglabājās līdz mūra analīzei sāka pielietot elastības teoriju.



Att. 3.2. Danyzy arku balstu deformāciju analīze [149].

Šis pētījums uzskatāmi parāda, ka spiedes spēka līnijai, izvirzoties ārpus mūra šķērsriezuma, veidojas locīkla starp mūra akmens elementiem. Mūra konstrukciju augstās statiskās nenoteiktības dēļ, līdz pat skaitlisko metožu attīstībai, nepastāvēja pilnvērtīgas velvju konstrukciju analīzes iespējas. 1912. gadā Rubio piedāvāja šķēļu metodi, kuras pamatā ir vertikālu mūra daļu iedarbes spēku vektorāls risinājums, sk. 3.3. attēlu.

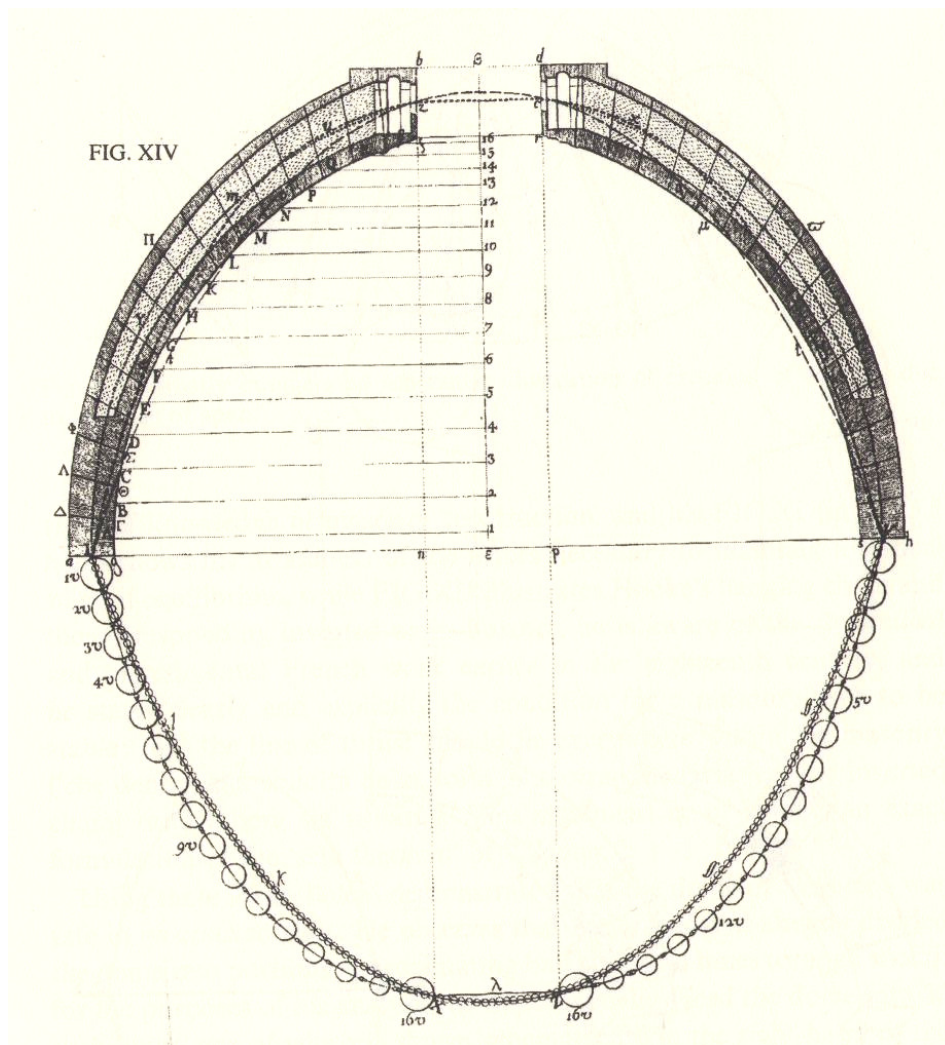


Att. 3.3. Joan Rubio 1912. gada veiktā Palma de Mallorca katedrāles analīze [149].

Proporciju / ģeometrijas princips ir bijis dominējošais projektēšanas un analīzes princips līdz būvzinātnes attīstībai. 3.3. attēlā parādīta Palma de Mallorca katedrāles analīze, konstrukciju dalot vertikālās šķēlēs un mūra pašsvaram atbilstoša lieluma spēka vektoru orientējot konstrukcijā. Šādas analīzes kritērijs ir ēkas ģeometrija, bet mūra materiālu uzskata par nedeformējamu ķermeni.

3.1.2 Iekārtas ķēdes metode

Tikai 17gs., attīstoties būvzinātnei, radās iespēja analītiski aprēķināt arku konstrukcijas.



Att. 3.4. Poleni 1748. gada kupola konstrukcijas interpretācija ar neviendabīga svara ķēdi [64].

1670. gadā Huks piedāvā arkas konstruēt kā iekārtu ķēdi, sk. 3.4. attēlu, to vēlāk ar masu koncentrācijas punktiem papildina Poleni. Iekārtās ķēdes princips apgrieztā veidā ir pietiekami precīza arkas spiedes spēka centra ass līnija. Projektējamajai arkai, atbilstoši sadalot masas punktus, tādējādi varēja iegūt ideālu spiedes spēka ass līniju. Tādā veidā tika attīstīti ģeometriskie arkas modelēšanas principi. Šāda veida risinājums bija noderīgs vertikāli slogotai arkai, taču neievērtēja horizontālā slogojuma iedarbību.

Rīgas Doma baznīca šķērsgriezumā sastāv no 3 šķērsjomiem, kuros veidojas horizontāli spēki, kā mūra krusta velvju balsta reakcija. Tādējādi iekārtās ķēdes principu nevar izmantot vairākām savstarpēji saistītām arkām.

Moselejs (1833) gadā attīstīja „Statikas jauno teorēmu”, ar kuras palīdzību tika aprakstītas būves vispārīgi, pielietojot mazāko spriegumu principu. Vēlāk (1843) viņš šo teorēmu pielāgo arku aprēķiniem. Naviers (1826) attīstīja principu, ka būves konstrukcijas jāprojektē pēc iekšējiem spriegumiem. Villarceau (1853) piedāvā ievietot 3 locīklas, lai mazinātu arkas statiskās nenoteiktības līmeni un aprēķinātu arku kā statiski noteicamu sistēmu. Šāda aprēķinu pieeja pārsvarā tika lietota līdz elastības teorijas ieviešanai. 17gs. beigās Galileo materiālu stiprības pētījumi noveda pie viduslaiku aprēķinu metožu pilnīgas aizvietošanas.

3.1.3 Analītisko aprēķinu metode

19gs. tika attīstīta elastības teorija un tās pielietošana būvkonstrukciju aprēķinos. Līdz 1880. gadam inženieri dalīja arkveida konstrukcijas elastīgajās un stingajās, koka un tērauda arkas attiecinot uz elastīgajām, bet mūra arkas uz stingām konstrukcijām. Poncelets, 1852. gadā radīja unikālu risinājumu, pārskatot elastības teoriju un attiecinot to uz arku konstrukcijām. Jau 17.gs 60-tajos gados parādījās pirmie risinājumi arku aprēķiniem, pielietojot elastības teoriju. Vinlkers, 1879. gadā aizsāka diskusiju par elastības teorijas pielietošanu mūra konstrukciju aprēķiniem. Viņa paceltie jautājumi rakstu krājumā "Störungen" bija saistīti ar spiedes spēka ass pozīcijas maiņu mūra elastīgo īpašību iespaidā. Vinlkerā galvenās tēzes bija spiedes spēka ass lokācijas izmaiņas pēc būvniecības procesa, elastīgo deformāciju, balstu deformāciju un temperatūras radīto deformāciju iespaidā. Visi šie apstākļi var izsaukt pārmērīgas deformācijas un plaisu veidošanos šķēlumā. Vinlkers saprata šo efektu nozīmību un to ietekmi uz spiedes spēku ass novietojuma šķēlumā. Viņš piedāvāja risināt šīs problēmas samazinot arku statiskās nenoteicamības pakāpi, arkas konstrukcijā ievietojot 3 locīklas, tādējādi reducējot statisko shēmu uz statiski noteicamu sistēmu. Kastiljano, 1879. gadā šo metodi pielāgoja mūra tiltu aprēķiniem. Elastības teorijas aprēķini dod pieņemamus rezultātus, veicot aprēķinus materiālu elastīgajā robežās, un nav nepieciešama cita teorija materiāla uzvedības analīzei. Vēsturisko ēku vertikālās mūru konstrukcijas ir būvētas ar ļoti lielu šķērsriezuma nestspējas rezervi, tādējādi normālsprīgumi šķēlumā ir tālu no nestspējas robežas un elastības teorija ir pilnībā akceptējama. Sākotnējā etapā inženieri izrādīja pretestību elastības teorijas pielietošanai mūra konstrukciju projektēšanā, jo netika ievērtētas materiālu anizotropija un materiālu neviendabība.

3.1.4 Mūra modelēšana pielietojot diskretizācijas metodi

Mūra modelēšanas pamatnostādnes izstrādātas Lourenco pētījumā [91], kurā uzskatāmi parādītas divu veidu mūra datormodelēšanas metodes:

- a) aprakstot mūri kā diskrētu materiālu;
- b) pielietojot mūra materiāla homogenizācijas metodi.

Definējot mūri, kā diskrētu elementu sistēmu, Lourenco izstrādāti divi galvenie mūra akmens savstarpējās mijiedarbības definēšanas principi:

- c) mūra javu definējot ar atsevišķiem elementiem;
- d) mūra javu aizvietojo ar mūra akmens kontakta raksturlielumiem.

Pastāvot vairāku veidu mūra materiāla definēšanai, datoraprēķinos jāizvērtē katra atsevišķā veida priekšrocības, trūkumi un pielietojamība speciāli izvirzītu mērķu analīzei.

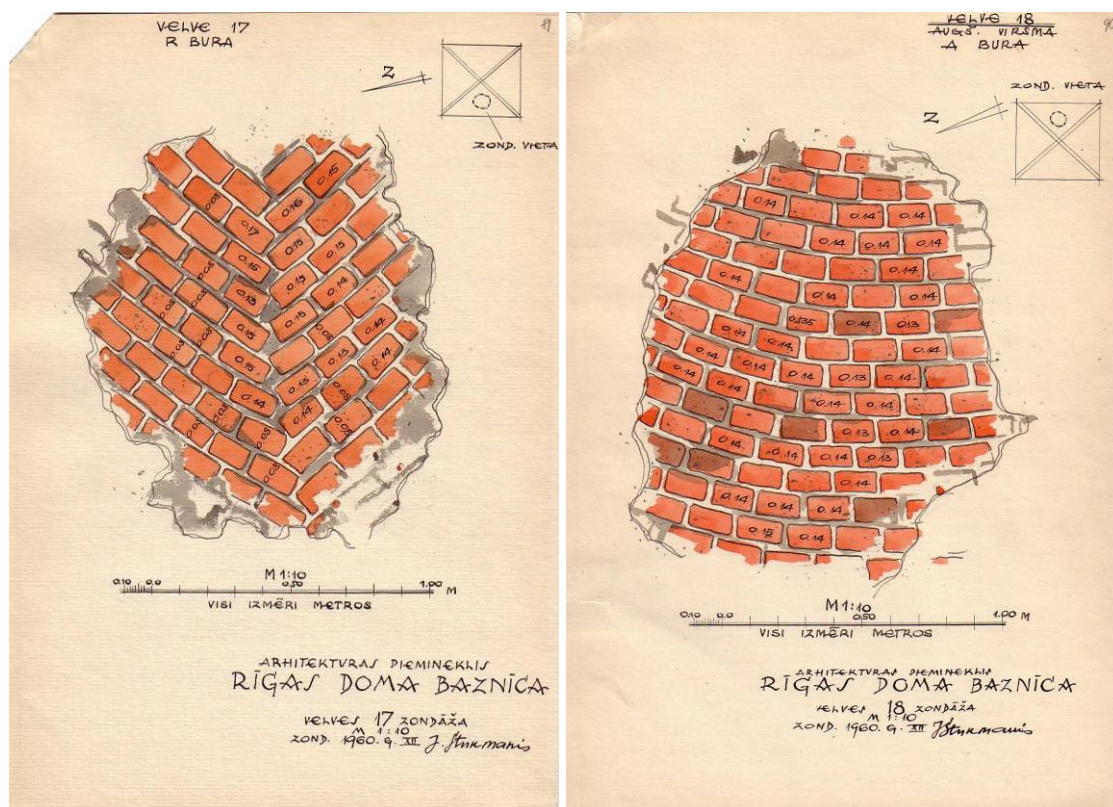
Kopš izstrādāta diskrētu elementu metode [47], tā guvusi plašu pielietojumu un izraisījusi interesi pētnieku vidū, savu iespēju dēļ, aprakstot mūra konstrukcijas ar diskrētiem elementiem. Literatūra sniedz plašu pētījumu klāstu, kuros diskrētu elementu metode lietota, lai pētītu mūra bloku krāvumu mijiedarbību konstrukcijās vai klinšu iežu mehānikas pētījumos. Mūra konstrukcijām diskrētu elementu metode pielietota pētījumā [87], apskatot mūra arkas ciklisku sloojumu. Dzelzsbetona konstrukciju analīzē [90; 136] diskrēta elementu metode lietota gan mikromehānikas, gan makro mehānikas līmenī.

Režģu modeļi plaši pētīti un izstrādātas to pielietošanas metodes mūra konstrukciju aprēķiniem. Režģa modeļu pielietošana būvkonstrukciju aprēķinos apskatīta pētījumos [13; 120; 129; 130], kuros šī metode lietota, lai analizētu stiepes spriegumu izraisītu plaisu attīstības modelēšanā. Šīs metodes realizācija tiek veikta pārveidojot mūra ķermeni par siju vai stieņu sistēmu. Šāds vienkāršojums ļauj būtiski samazināt datoraprēķina laiku un analizēt pilnķermeņa elementu kā stieņu sistēmu. Analīzes ietvaros tiek veikts aprēķins katra sloojuma soļa ietvaros un tiek atrasti elementi, kuru nestspēja ir pārsniegta. Nākamajos aprēķina soļos šos elementus neievērtē, tādējādi pielāgojot režģi daļējam konstrukcijas sabrukumam. Cusatis pētījumā [46] režģu metode attīstīta, lai analizētu gan stiepes, gan spiedes sabrukumu. Šī metode savu attīstību ieguvusi, kā diskrētu elementu saišu definēšana.

Definējot mūri ar diskrētu elementu sistēmu, iespējami mūra konstrukcijas materiāla, ķieģeļu un mūra javas mijiedarbības pētījumi dažādu ārējo apstākļu un sloojuma ietekmē. Mūra konstrukcijas diskretizācijas paņēmiens pielietojams neliela izmēra vai strukturāli orientētas konstrukciju analīzei. Strukturāli orientētas konstrukcijas analīzes gadījumā elementu dalījuma jāsakrīt ar mūra akmens dalījumu un izmēriem. Šādu modeļu izveide ir

racionāla nelielu modeļu analīzei, jo palielinoties elementu skaitam ievērojami pieaug modeļa izveides darbietilpība. Diskrēta modelēšana dod iespējas mūra konstrukciju aprakstīt ar akmens materiāla iedarbi vienam pret otru. Mikro modelēšanas pirmsākumos tika lietoti bloku modeļi bez mūra javas šuvēm, tādējādi neņemot vērā materiālu sasaisti un stiepes pretestību. Diskrēta jeb mikro modelēšana plaši izpētīta Lourenco un Rots [93] rakstā un dod iespēju modelēt dažādas mūrējuma orientācijas konstrukcijas. Šajā pētījumā apskatīta dažādos virzienos slogotu mūra konstrukciju plasticitāte mūra akmens un javas materiālam, spiedes un stiepes pretestības un berzes leņķa ietekme uz spēka orientāciju. Pēdējo gadu pētījumos mūra materiāla šuvju sasaiste, berzes leņķis un mūra javas elastīgās īpašības tiek ievērtētas materiāla modelī.

Dažādu mūrējuma rakstu ietekme uz velves čaulas iekšējiem spriegumiem ievieš korekcijas datormodelī un apgrūtina diskrētu mūra pārsegumu modeļu izveidi. Rīgas Doma baznīcas velvju mūrējuma tehnoloģija no 1960. gada apsekojuma datiem, sk. 3.5. attēlā.



Att. 3.5. Mūra akmeņu orientācija dažādos virzienos [VKPIA materiāli].

Mūra nestspēja ir atkarīga no spiedes spēka orientācijas mūra masīvā, tādēļ jāizvērtē velvju būvniecības tehnoloģijas no mūra orientācijas viedokļa. Velvju mūrējuma orientācijai pastāv Franču, sk. 3.6. attēlu. un Angļu mūrējuma kompozīcijas, sk. 3.7. attēlu



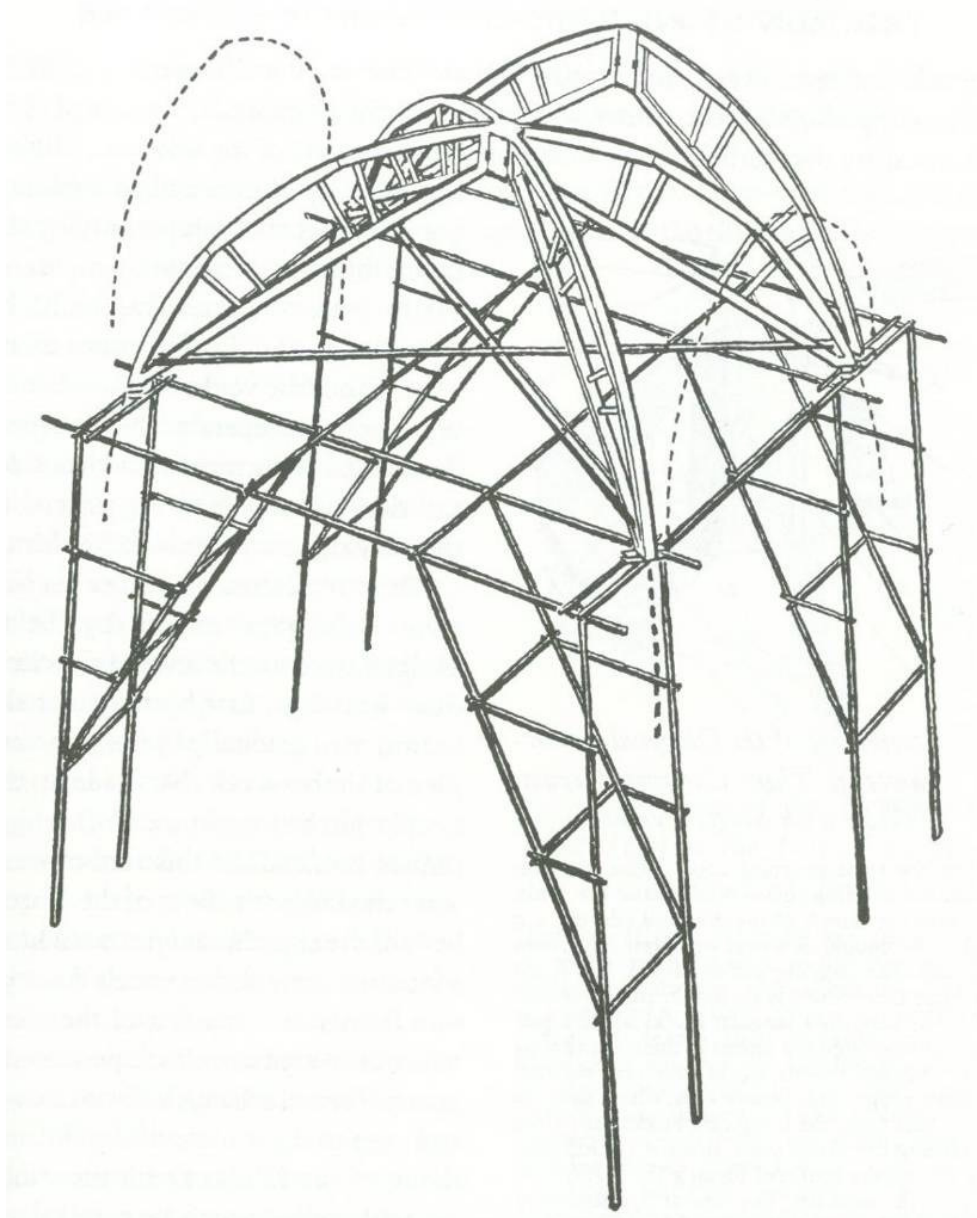
Att. 3.6. Franču velves mūrējuma kompozīcija [autora foto].



Att. 3.7. Angļu velves mūrējuma kompozīcija [autora foto].

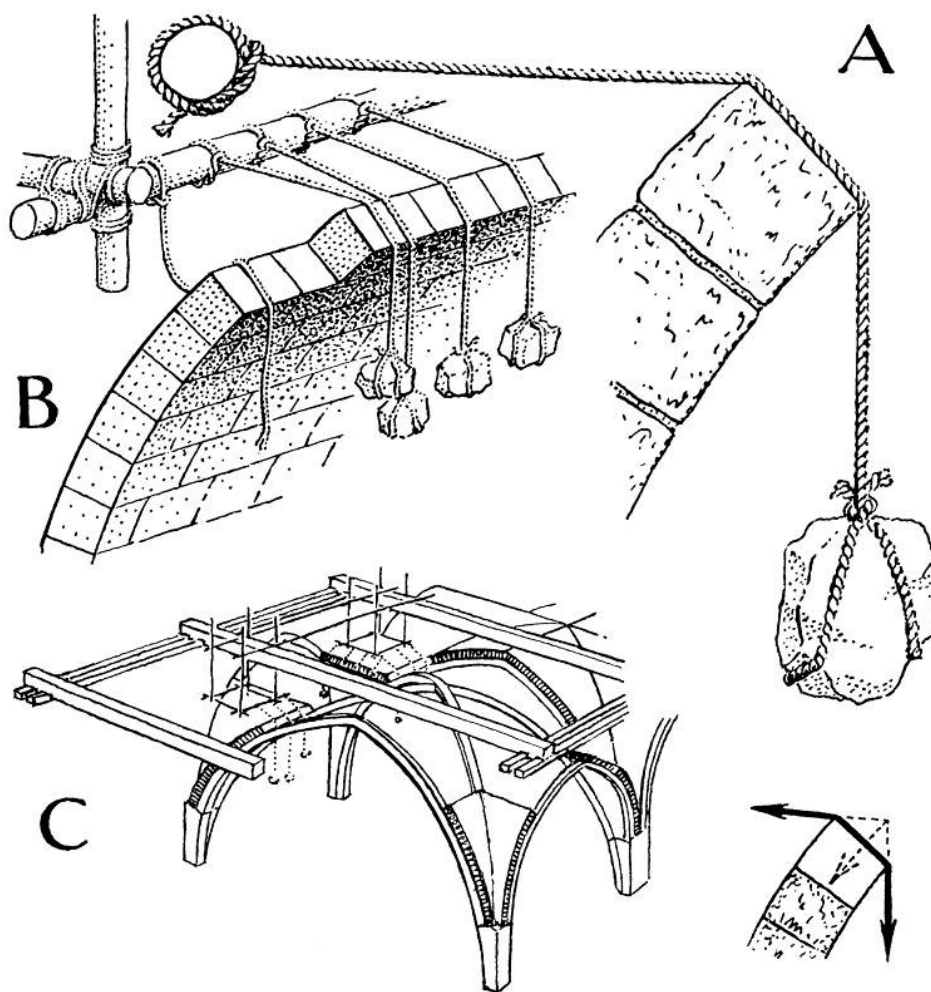
Velvju pārsegumu būvniecībai izmantoja ribu atbalsta veidņus, sk. 4.8. attēlā, kurus demontēja pēc javas sacietēšanas.

Franču kompozīcijas velves mūrēšanu varēja veikt nobalstot ribas, taču Angļu kompozīcijas velvju mūrēšanai bija nepieciešams retinātu dēļu klāja veidnis pa visu velves laukumu. Abu kompozīciju velves tiek būvētas uz veidņu sistēmas ar iepriekšēju pacēlumu.



Att. 3.8. Ribu atbalsta veidnis Franču kompozīcijas velves mūrēšanai [53].

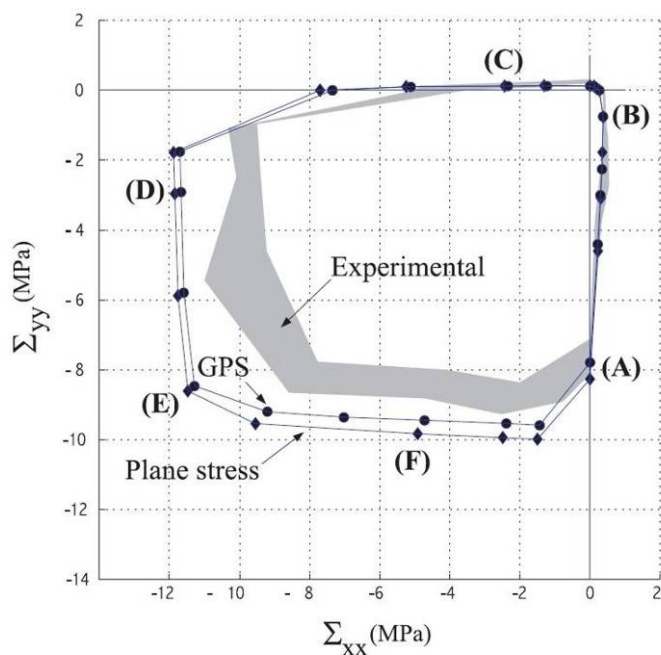
Mūrējums tika veidots no mūra ribas uz abām pusēm, lai palielinātu velves slodzi uz veidni vienmērīgi. Veidojot mūrējumu bez atbalstoša klāja, katrs iemūrētais akmens atsīets, sk. 3.9. attēlu.



Att. 3.9. Mūra kārtu atsiešana līdz mūra javas sacietēšanai [53].

Lai nobalstītu krusta velves ribu, no akmens monolīta veidoja balsta akmeni vienā vai vairākās kārtās. Pārzinot velvju būvniecības tehnoloģiju un velvju tipu būvniecības paņēmienus, iespējama precīzāka esošo pārsegumu analīze. Velvju mūrēšanai, pielietojot veidņu sistēmu, tiek iegūts momentāni pieaugošs pašsvara slogojums pēc veidņu demontāžas, kas jāievērtē analīzes uzdevumā, kā analīzes sākuma nosacījumi. Atsaišu izmantošana rada pašsvara pakāpenisku pieaugumu. Attīstot vēsturisko mūra ēku analīzi, būvniecības etapi un mūra izveides tehnoloģiskie paņēmieni jāievērtē, kā slogojuma pakāpes un etapi. Mūru šuvju aizpildīšanas kvalitāte, salīdzinot ar citu mūrējuma daļu mūru kvalitāti, ir būtiski augstāka. Šajos darbos tika piesaistīti augstas klases amatnieki.

Mūra stiprība divasu spiedes apstākļos ir atkarīga no mūra kārtu orientācijas. Stiprības diagramma, slogojot mūra elementu savstarpēji perpendikulāros virzienos, aprakstīta agrāko gadu pētījumos [49; 105; 106], sk. 3.10. attēlu.



Att. 3.10. Mūra divasu spiedes diagramma [105].

Diskrētu elementu kontaktu apraksta ar elastības un stiprības raksturlielumiem, pētot mūra javas īpašības un šuvju aizpildījumu. Mūra akmens virsmu kontakta pētījumā [135] parādīts, ka nelīdzenumi un neaizpildītas mūra šuves rada koncentrētas spēku pārejas no viena mūra akmens uz otru. Nelīdzenumi javas un ķieģeļa saskares plaknē rada javas lokālus sabrukuma punktus un lieci ķieģeļos. Masīvās mūra kolonās iekšējie spriegumi sasniedz 50% no mūra nestspējas un iekšējo spriegumu koncentratoru ietekme ir minimāla. Velvju čaulās asspēka radītie normālspriegumi ir tuvi mūra nestspējas robežai, tādēļ jebkura nekvalitatīvi aizpildīta šuve rada spriegumu koncentratoru, kurš var izsaukt ķieģeļu plīsumu paralēli spiedes spēka virzienam.

3.1.5 Datoraprēķini, lietojot mūra homogenizācijas metodi

Analizējot mūra akmeņu orientāciju Rīgas Doma baznīcas velvju pārsegumos, pieņemts, ka nav mērķtiecīgi modelēt mūra velvi, aprakstot velves mūri, kā diskrētu aprēķina modeli, jo, kā redzams J. Stukmaņa velvju zondāžas skicēs, mūra akmeņu orientācija ir vairākos virzienos vienas velves konstrukcijas ietvaros, sk. 3.5. attēlu. Šī apstākļa dēļ, modelējot mūra apjomu deformāciju no balstu sēšanās, tiek pielietots materiāla homogenizācijas princips.

Trausla sabrukuma mehānisms spiedes spēku iedarbībā ir būtiski komplicētāks, kā stiepes spēku iedarbībā. Spiedes spēku izraisītu sabrukumu raksturo izkaisītu mikroplaisu

attīstība un apvienošanās, kuru pavada progresīva bojājuma lokalizācija un makro plaisu veidošanās. Pirms sabrukuma robežstāvoklis, kad betona paraugā veidojas šķērsspēka radītas plaisas, apskatīts pētījumā [136], izsaucot parauga sabrukumu. Homogenizēta mūra materiāla sabrukuma raksturs ir tuvs betona sabrukumam. Datoranalīzes attīstība pēdējās dekādēs novedusi pie tuvinājuma skaitlisko metožu lietošanas mūra konstrukciju analīzē. Detalizēta mūra materiālu analīze ar materiālu diskretizācijas metodi attīstīta pētījumā [98] par mūra akmens mijiedarbību. Materiālu diskretizācija devusi iespēju ar skaitliskām tuvinājumu metodēm pētīt slogota mūra materiālu savstarpējo mijiedarbību un slogojuma pārnesanas mehānismu.

Ļoti būtiski ir spiesta mūra uzvedības ilglaicīgie efekti. Proporcionāli augstu spiedes spriegumu izraisīta deformāciju attīstība ilgstošā laika periodā ir bijusi par iemeslu dažām mūsdienu tehnogēnajām katastrofām [29]. Mūra šļūde ir atkarīga galvenokārt no iekšējo spriegumu līmeņa, temperatūras, mitruma un slogojuma cikliskās iedarbes. Pie cikliskā slogojuma, kas veicina šļūdes attīstību, var pieskaitīt vēja slodzi, temperatūras svārstības un transporta vai zvanu izraisītas vibrācijas. Pētot mūra ilglaicīgos efektus, izstrādātas rekomendācijas [3; 4] to ievērtēšanai mūra konstrukciju analīzē. Spiedes spriegumu izraisīto pārvietojumu sakarību pētījums [131] sniedzis raksturlielumus ilglaicīgajiem efektiem mūra konstrukcijās.

Nozīmīgākā materiāla īpašība mūra pārseguma konstrukcijās ir spiedes stiprība. Testa metode, kura nosaka mūra materiālu paraugu sagatavošanu un testēšanu, aprakstīta Eiropas normās LVS EN 1052-1 [84]. Pētījumā [95] atspoguļots parauga sabrukšanas process. Spiedes spēks paraugā rada vertikālu plaisu pa ass līniju, veidojot parauga daļu savienojuma plakni. Palielinoties deformācijām, veidojas citas paralēlas plaisas, kurām apvienojoties tiek sasniegts parauga sabrukums pa atsevišķām prizmām. Pilna izmēra mūra elementu sabrukuma testi nav piemēroti projektēšanai un mūra materiāla analīzei, tādēļ izveidotas empīriskas sakarības mūra īpašību noteikšanai, pamatojoties uz katra atsevišķa mūra materiāla īpašībām. Mūra īpašību noteikšanas metodika, atsevišķi testējot javas materiālu un mūra akmens materiālu, apskatītas [57; 135; 77] pētījumos. Latvijas un Eiropas būvnormatīvi sniedz metodiku homogenizētu mūra raksturlielumu noteikšanai, vadoties no mūra materiālu īpašībām. Šāda mūra īpašību noteikšana balstīta uz liela apjoma testu bāzes un pierādījusi sevi, kā drošu projektēšanas principu.

Pieņemot mūra īpašības vadoties no empīriskām sakarībām Latvijas vai Eiropas būvnormatīvos, mūra īpašības tiks pieņemtas ar konservatīviem raksturlielumiem un būs drošības pusē ar 95% izpildīšanās varbūtību. Pētot vēsturisku mūru ēkas, jānosaka precīza

spiedes un stiepes nestspējas robeža. Ir labi zināms, ka spiedes sabrukumu mūra elementos nosaka mijiedarbība starp mūra javu un mūra akmeni. Mūra materiālu atšķirīgais deformāciju stingums vienass slogojuma gadījumā noved pie mūra akmens materiālu divasu stiepes un javas materiāla trīsasu spiedes. Šāds spēku sadalījums ir vēsturiskos mūros, kur kaļķu javas deformējamība ir lielāka kā mūra akmeņu deformējamība. Pirmo pētījumu šajā laukā veicis Hilsdsdorf [65], izstrādājot līdzsvara vienādojuma sistēmas, ar kuru palīdzību prognozēt homogenizētu mūra materiāla stiprību. Turpinot šo darbu, Khoo un Hendry pētījumā [76] attīstīta un precizēta šī metode.

Nepārtraukta vai homogēna un sadalīta, vai diskrēta mūra materiāla modeļi var tikt lietoti, aprakstot mūra materiāla darbību mūra konstrukcijās. Analizējot mūra materiāla uzvedību vienass spiedes slogojumā, pētījumos [37; 112] ieviests homogēna materiāla modelis, kurā apvienojās mūra akmeņu un javas mijiedarbības efekti.

Šobrīd izstrādātas vairākas mūra konstrukciju analīzes metodes, tādas kā galīgo elementu metode ar interfeisa elementiem, diskrēto elementu metode un režģu modeļi. GEM plaši lietota būvkonstrukciju analīzē un tie paši principi pārnesti uz mūra konstrukcijām. Izstrādāta metode [89; 92], kurā vienkārši slogotām simetriskām konstrukcijām vai iepriekš eksperimentāli testētām konstrukcijām, kurās plaisu dislokācija un attīstība ir iepriekš zināma, interfeisa elementus novieto gar plaisas attīstības ceļu. Ja plaisas attīstības vietu un virzienu nevar noteikt iepriekš, ieviesta metode [68] ar galīgo elementu tīkla atkārtotu pārdefinēšanu. Metode [42] ar pietiekama skaita interfeisa elementu iekļaušanu galīgo elementu modelī izstrādāta, lai ievērtētu potenciālo plaisu veidošanos kādā no konstrukciju zonām.

Pielietojot materiāla homogenizācijas metodi, mūra velves iespējams modelēt datoraprēķinu programmās, tādējādi izceļot problemātiskus reģionus čaulu pārsegumu virsmās. Analizējot ēkas daļas modeli, iegūtas velvju pārseguma zonas ar spriegumu zonām, kurās tiek pārsniegti pieļaujamie tangenciālie spiedes vai stiepes spriegumi.

Mūri datoraprēķinos iespējams definēt, kā liela izmēra datormodeli, kurš veidots, izmantojot virsmas skanēšanas datus. Darba 2.4 nodaļā analizēta optimāla virsmas dalījuma un datoraprēķina precizitātes proporcija. Liektas virsmas dalījums vienlaikus ir arī virsmas liektās formas ģeometrisks atspoguļojums un GEM dalījums. Vienkāršotā aprēķina modelī materiālus var aprakstīt ar lineāru elastības moduli. Šo metodiku var pieņemt pēc LBN 205-97 "Mūra un stiegrotā mūra konstrukciju projektēšanas normas" [83] noteiktās metodikas. Mūru materiālu elastības moduļa vērtību nosaka pēc mūra akmens materiāla un javas materiāla elastīgajām īpašībām, ievērtējot šļūdes un rukuma efektus, sk. 2.12 nodaļu. Aprēķinu metodēm, kurās tiek veikta mūru šļūdes deformāciju nelineārā analīze, nepieciešami papildus

parametri, tādi kā plīsuma enerģijas raksturojošās konstantes, berzes leņķis, elastības funkcijas visos perpendikulārajos virzienos. Liela nozīme mūra modelēšanas procesā ir pētāmās mūra ēkas materiālu tiešām laboratoriskām pārbaudēm. Katrā atsevišķā vēsturiskas mūra ēkas būvniecībā pielietotas nedaudz atšķirīgas būvniecības tehnoloģijas un materiālu izcelsme. Rīgas Doma baznīcas apsekošanas ietvaros ir testēti blīvi māla ķieģeļi un analizēts javas ķīmiskais sastāvs. Ķieģeļu pretestības izkliede ir visai nozīmīga un pilnībā raksturo roku darba iespaidu uz materiālu izgatavošanas kvalitāti. Mūra iestrēgumi, tādi kā atšķirīgas elastības mūra akmens materiālu iestrēgumi, var radīt bīstamus koncentratorus un lokālu materiālu sagrūvumu punktus.

Pamatojoties uz mūra materiāla atšķirīgajām elastīgajām īpašībām pret garenšuves orientācijas virzienu, homogenizēta mūra materiāla raksturojumam pieņemti minimālie spiedes un stiepes pretestības lielumi. Mūra elastīgo īpašību raksturojumam pieņemti deformācijas moduļi, ievērtējot šļūdes efektu. Šī promocijas darba ietvaros izveidotie Rīgas Doma baznīcas analīzes modeļi specializēti konkrēta analīzes mērķa sasniegšanai, tas ir, pamata balsta nevienmērīgas deformācijas un temperatūras ietekmes analīzei.

3.2 Esošu mūra pārseguma slogojums

Vēsturisko mūra ēku konstrukciju slogojums ir pamatu sēšanās, temperatūras iedarbe, sniega slodze, vēja slodze, dinamiskās iedarbes no apkārtējiem faktoriem un ekspluatācijas slodzes.

Eiropas dienvidu un rietumu daļā aktuāls ir zemestrīču slogojums. Vēsturisko mūra konstrukciju noturība pret seismiskām iedarbēm ir plaši pētīta Itālijas [32] un Portugāles [94] reģionos. Latvijas apstākļos seismiskās iedarbes nav nodefinētas, nav izstrādāts LVS EN 1998 „Seismiski izturīgu konstrukciju projektēšana” nacionālais pielikums. Masīvu būvju un mazstāvu apbūvē inženieraprēķinu praksē zemestrīču iedarbju slogojums tiek apzināti neievērtēts, aizbildinoties ar tā iedarbes efekta tuvo līdzību ar vēja slogojumu. Promocijas darba ietvaros sagatavotais reālās ģeometrijas modelis ir gatavs analīzei uz seismiskām iedarbēm, līdzko šo iedarbju raksturs un intensitāte tiks nodefinēta Latvijas apstākļiem.

Sniega slodzes efekts ir slodzes pieaugums vertikālajās konstrukcijās. Gotiska stila ēkās jumta konstrukciju balsti veidoti tieši uz vertikālajām konstrukcijām, tādēļ velvju pārseguma slogojumu sniega slodze neiespaido. Sniega slodzes efekts ir vertikāli vērsts spiedes spēks kolonā, palielinot kolonas noturību. Noturības pieaugumu nevar ievērtēt ēkas analīzē, jo sniega slogojumam ir īslaicīgs raksturs.

Vēja spiediena izraisīti horizontāli spēki tiek pārnesti uz pamatiem ar mūra sienu apjomiem ēkas šķērsvirzienā. Sienas darbojas kā stinguma elementi, uzņemot ievērojamu daļu horizontālā slogojuma. Vēja slogojums rada sprieguma pieaugumu velvju pārsegumā proporcionāli konstrukciju stingumam un tas analizēts reālās ģeometrijas modelī.

Katras sezonālās temperatūras izmaiņas noved pie jauna pārvietojuma, jo deformētajam starp bloku pārvietojumam ir tieksme saglabāt daļu no iepriekšējā temperatūras svārstību periodā iegūtā pārvietojuma. Mūra konstrukciju temperatūras slogojuma analīzei, pielietojot Latvijas būvnormatīvu [83], maksimālās slodzes definētas atbilstoši slodžu normatīvam [152].

Pašsvara slogoti pārsegumi uzņem bēniņu slodzes nenozīmīgā apjomā, velvju pārsegums netiek ekspluatēts. Tehnisko komunikāciju un inženiertīklu apkope un instalācijas darbi notiek pārvietojoties pa jumta konstrukcijā izveidotām laipām. 1960. gada rekonstrukcijas ietvaros velvju virsma izolēta ar putu polistirola plātnēm un pārklāta ar azbesta šķiedras saturošu cementa javu, tādējādi nodrošinot izolācijas slāņa pretuguns aizsardzību. Ekspluatācijas slodzes neiespaido ēkas velvju pārseguma konstrukcijas un var uzskatīt par vērā neņemamām. Baznīcu zvana dinamiskās iedarbes netiek ievērtētas mūra velvju pārseguma noturības analīzē.

Mūra ēku ilgstošie būvniecības darbi nosaka pakāpenisku pašsvara pieaugumu un spriegumu nevienmērīgas pārdalīšanos jau būvniecības procesā. Pašsvara slogojums rada spiedes spēkus ēkas vertikālajās konstrukcijās, izraisot iekšējos spriegumus mūra materiāla lineāri elastīgajā stadijā. Mūra velvju pārsegumā pašsvara radītie spriegumi atkarīgi no velvju ģeometrijas un ekspluatācijas laikā iegūtajiem defektiem. Velves konstrukcijas pašsvara slogojums jāievērtē kā momentāni pielikta slodzes daļa. Atbrīvojot velves balsta konstrukciju, visa pašsvara slodze tiek pārnesta uz vertikālajām konstrukcijām. Šis apstāklis ļauj pašsvara slogojumu aprēķina modelī ievērtēt bez sākotnējā pašsvara slogojuma.

Mūra ēku pašsvars, palielinot spiedes spēku mūra šķērsgriezumā, minimizē citu ārējo iedarbju efektus, nodrošinot iekšējo spriegumu svārstības pieļaujamo spriegumu robežās. Pašsvara iniciētie spiedes spriegumi kompensē lieces momentu radītos stiepes spriegumus velves šķērsgriezumā.

Ļoti lielu iespaidu uz ēkas konstrukcijām rada temperatūras iedarbība un pamatu nevienmērīga sēšanās. Šīs divas iedarbes pieņemtas par galveno pašsvara slogotu mūra pārseguma ekspluatācijas slogojumu. Mūra konstrukciju pašsvars ievērtēts visos aprēķina etapos gan balstu deformāciju, gan temperatūras efektu analīzē.

3.2.1 Sniega svara slodze

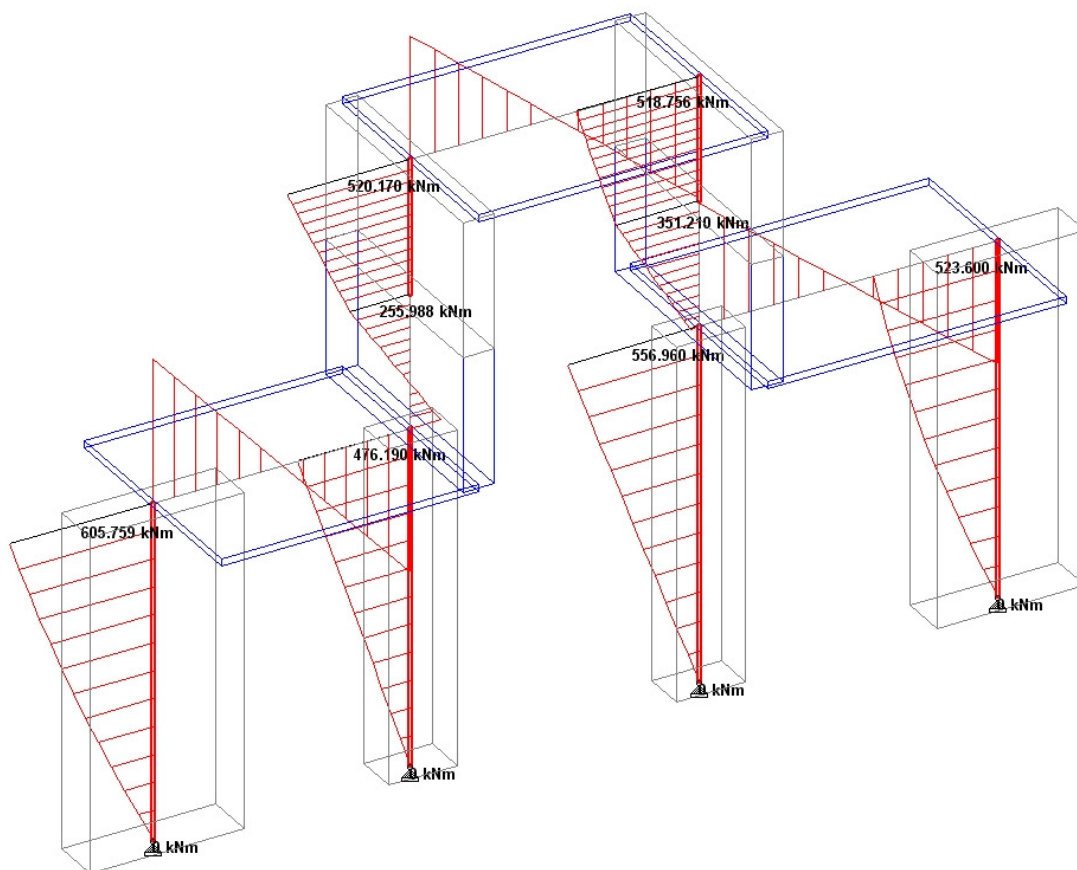
Sniega slodze ir viens no slogojuma veidiem ēkas ekspluatācijas laikā, kura lielums variē periodiski, sasniedzot normatīvajiem slodzes lielumiem tuvu iedarbes vērtību. Sniega slodzei ir sezonāls raksturs. Pamatojot slodzes īslaicīgo raksturu ar gotisko būvju jumta slīpumu un jumta skārda iesegumu, sniega slodzei tiek pieņemts īslaicīgs raksturs.

Analizējot sniega slodzes efektu uz vertikālajām nesošajām konstrukcijām un analizējot sniega slodzi uz Rīgas Doma baznīcas konstrukcijām, jāsecina, ka sniega slogojums sastāda 1,5% no kopējā vertikālā slogojuma. Sniega slodzes laukums, kuru uzņem centrālā joma sānu kolona ir 117,3m². Sniega slodzes normatīvā vērtība uz centrālā joma sānu kolonu sastāda 82,11kN, kas veido spriegumu palielinājumu kolonas šķēsgriezumā par 0,012 MPa. Sniega slodzes efekts ir vertikāli vērsts spiedes spēks kolonā, palielinot kolonas vertikālo noturību. Jumta klāju nobalstošās konstrukcijas ir telpiska koka šķautņu sistēma, kura savu atbalsta reakciju nodod uz centrālā joma kolonu rindu un sānu jomu mūra sienām. Pamatojoties uz sniega slodzes īslaicīgo raksturu un iedarbes efektu ēkas konstrukciju noturības pieauguma virzienā, promocijas darba ietvaros sniega slodze nav ievērtēta, kā mūra pārseguma slogojums.

3.2.2 Vēja slodze

Vēja slodze darbojas ēkas šķērsvirzienā un var būtiski ietekmēt plaisājušu mūru konstrukciju stabilitāti. Vēja spiediena ietekme analizēta baznīcas šķērskarkasa virzienā.

Promocijas darbā analizētie maksimāli iespējamā vēja spiediena izraisīti horizontālie pārvietojumi Rīgas Doma baznīcas karkasa šķērsvirzienā, pēc aptuveni aprēķiniem sastāda 14-17 mm vidusjoma pārseguma centrālajā punktā. Pārdalot šo pārvietojumu uz balsta elementiem, proporcionāli to stingumam, varam analizēt vēja slodzes radītus papildus spriegumus vertikālajās nesošajās konstrukcijās šķērsrāmja virzienā. Vēja radītais spiedes sprieguma palielinājums kolonu malējās šķiedrās sasniedz 0,017 MPa, bet kontrforsu sienu malējās šķiedrās 0,002 MPa. Momenta pārdalīšanos šķērsrāmja konstrukcijā sk. 3.11. attēlā.

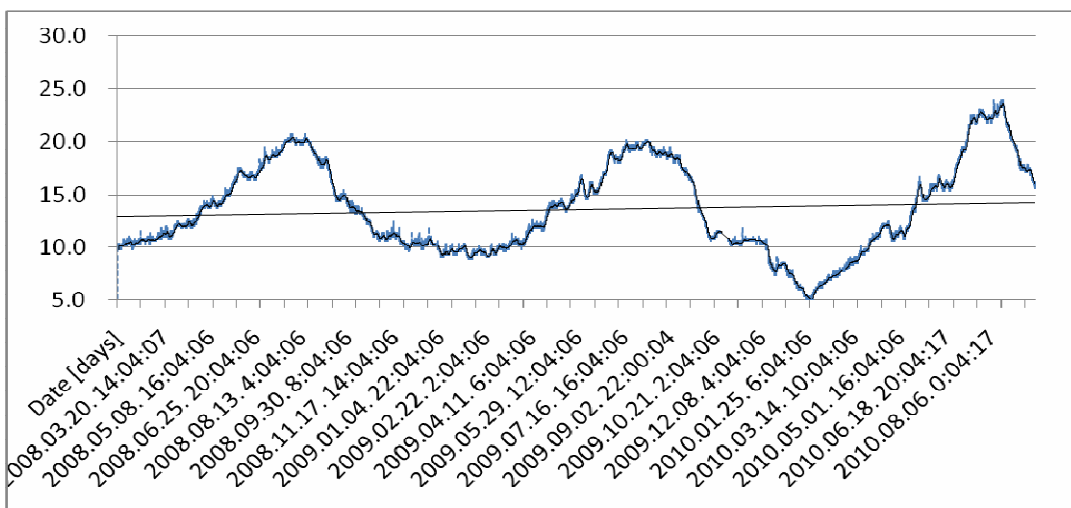


Att. 3.11. Vēja izraisīta momenta pārdalīšanās proporcionāli šķērskarkasa stingumam.

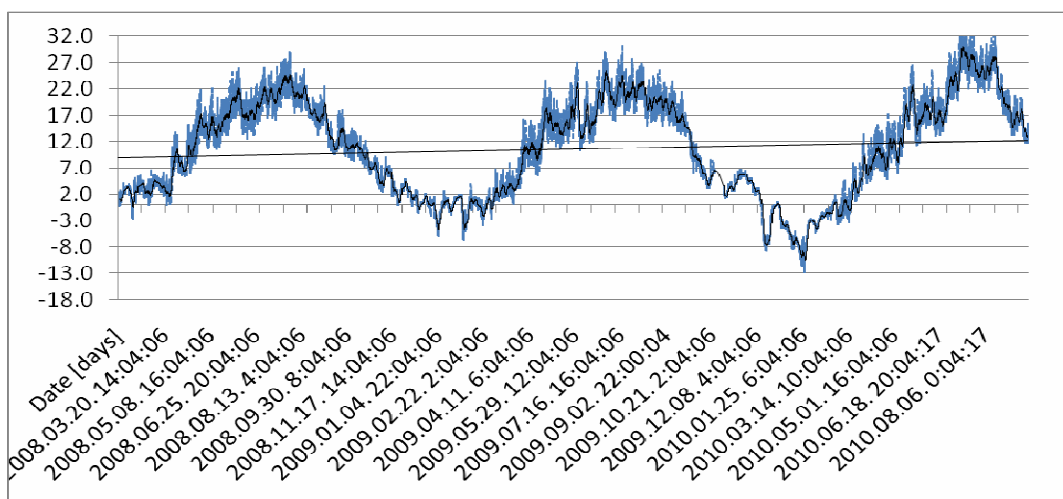
Vēja slodzes radītie pārvietojumi pārdalās pa ēkas mūra velvju pārsegumu čaulām, kā pa telpiskiem stinguma diskiem, velvju šķērsgrīzumā palielinot iekšējos spēkus. Lai ievērtētu vēja iespaidu uz velvju pārseguma iekšējiem spēkiem, jāievērtē ne tikai ēkas šķērsrāmja konstrukciju stingums, bet arī balstu pagriešanās stingums. Balstu pagriešanās stingums atkarīgs no pamatnes elastīgajām īpašībām un, analizējot plaisājušu velvju pārseguma pārvietojumus, jādefinē, kā balstījums uz elastīgas pamatnes. Lai korekti definētu ēkas pamatnes elastību, jāveic papildus pamatnes izpēte, pielietojot vietas testus.

3.2.3 Temperatūras slogojums

Veicot Rīgas Doma baznīcas ēkas plaisu monitoringu, līdz ar plaisu svārstību mērījumiem tiek veikti temperatūras mērījumi ēkas iekštelpās, sk. att. 3.12, uz mūra velvju virsmas un no ēkas ārpusēs, sk. att. 3.13. Āra sensors aizsargāts no tiešas saules radiācijas iedarbes un piestiprināts mūra konstrukcijām no mūra velvju virspuses.



3.12. Velves čaulas temperatūras režīms no iekšējās puses.



3.13. Velves čaulas temperatūras režīms no ārpusē.

Reģistrētās velvju virsmas temperatūras vērtības no 2008. gada 01. februāra līdz 2010. gada 21. septembrim apkopotas 3.1. tabulā.

3.1. tabula

Gaisa temperatūru mērījumi velves virsmas tiešā tuvumā

	Mērījums	Datums
Maksimālā reģistrētā temperatūra pie velvju iekšējās virsmas, vasarā	+20.4 °C	13/07/2010
Minimālā reģistrētā temperatūra pie velvju iekšējās virsmas, ziemā	+4.3 °C	28/01/2010

Maksimālā reģistrētā temperatūra pie velvju ārējās virsmas, vasarā	+34.1 °C.	13/07/2010
Minimālā reģistrētā temperatūra pie velvju ārējās virsmas, ziemā	-12.4 °C	27/01/2010
Iekštelpu un ārējās temperatūras atšķirība, vasarā	+18.2 °C	28/01/2010
Iekštelpu un ārējās temperatūras atšķirība, ziemā	-13.9 °C	13/07/2010

Mūra konstrukciju analīzē jāpielieto Latvijas būvnormatīvu [82] LBN 003-01 „Būvklimatoloģija” temperatūras dati: piecu dienu vidējā minimālā gaisa temperatūra Rīgā, ar varbūtības izpildīšanos 0,92: -20,7°C. Absolūtais maksimums ar varbūtību 1 reizi 50 gados: +33,3°C.

Uzdodot mūra virsmas temperatūru, jāņem vērā mūra virsmas un gaisa atšķirīgās temperatūras. Pieņemot temperatūras slogojumu, mūra datoranalīzē jāievērtē mūra masīvu siltuma inerces un mūra virsmu saules radiācijas atstarošanas spējas, kā arī iekštelpu temperatūras izmaiņas atbilstoši āra temperatūrām. Virsmu temperatūras mērījumi ziemas periodā parāda atšķirību starp iekštelpu temperatūru un sienas virsmas temperatūru $\Delta t^\circ = -2$ °C, un ārsienas virsmas temperatūru pret āra gaisa temperatūru $\Delta t^\circ = +2,5$ °C. Sienu virsmu temperatūru attiecība pret apkārtējo vidi nav lineāra sakarība un modelējama ar plūsmas mehānikas metodēm.

Modelējot Rīgas Doma baznīcas mūra konstrukciju darbību, pieņemts temperatūras slogojums atbilstoši reālajam un salīdzināts ar aprēķina lielumiem, kuri noteikti pēc CNU [152] metodikas. Izmērītās temperatūras pielietotas velvju čaulu iekšējo spriegumu analīzē, lietojot ekstremālo temperatūru vērtības.

Pēc CNU [152] aprēķina metodikas noteikts:

- a) karstāko dienu aprēķina temperatūra uz sienas ārējās plaknes: +29 °C;
- b) karstāko dienu aprēķina temperatūra uz iekštelpu plaknes: +21 °C;
- c) aukstāko piecu dienu temperatūra uz sienu ārējās plaknes virsmas: - 18,7 °C;
- d) aukstāko piecu dienu temperatūra uz iekštelpu plaknes: +3 °C.

Šādas temperatūras svārstības noved pie iekšējās virsmas pagarinājuma temperatūras bloka apjomā par 0.3mm vasaras sezonā un pie ārējās sienas virsmas pagarināšanos par 2.3mm, pret augstākā gadalaika deformācijām. Kopējais sezonālais mūra termiskais pārvietojums ēkas garenvirzienā sastāda ~15mm. Maksimālās sprieguma izmaiņas velvju čaulas malējās šķiedrās: $\Delta\sigma^\circ = 0.012$ MPa.

Pārvietojums atspoguļojas plaisu atvēruma izmaiņās velvju ribās, mūra masīvam pagriežoties kontakta locīklā.

3.2.4 Eksploatācijas slodzes

Eksploatācijas slodzes neiespaido ēkas velvju pārseguma konstrukcijas un tās var uzskatīt par vērā neņemamām. Baznīcu zvana radītās dinamiskās iedarbes [14; 27] rada nozīmīgu slogojumu uz slaidām zvanu torņu konstrukcijām, bet, analizējot mūra pārseguma konstrukcijas, tās nav vērā ņemamas un šī darba ietvaros netiek ievērtētas mūra velvju pārseguma noturības analīzē. Velvju pārsegums neuzņem eksploatācijas slogojumu.

3.2.5 Avārijas slodzes

Izvērtējot Eiropas būvkonstrukciju projektēšanas normatīvus [85], jāmin ārkārtas iedarbes, kā viena no būtiskām pārbaudes prasībām ēku progresīvās sabrukšanas analīzei. Ievērojot šīs vadlīnijas, jāaprēķina ēku konstrukcijas, zaudējot daļu no vertikālajām konstrukcijām. Mūra ēku gadījumā ar velvju pārsegumiem nesošo vertikālo konstrukciju zudums izraisīs ne tikai vertikāla spēka pārdalīšanos, bet arī velvju pārseguma horizontālās reakcijas atbalsta zudumu un reakcijas pieaugumu blakus pārseguma iecirkņos. Mūra kolonu un krusta velvju pārseguma konstrukcijas ēkām, zaudējot balsta kolonu, veidosies būtiska iekšējo spēku pārdalīšanās, kura novedīs pie progresīva sabrukuma. Tērauda un dzelzsbetona karkasu gadījumā šādu analīzi veic projektēšanas ietvaros. Analizējot eksistējošas mūra ēkas, šāds slogojums jāpieliek telpiskam ēkas modelim. Lai analizētu avārijas slodžu iedarbību uz nesošajām ēkas konstrukcijām, nepieciešams definēt to izcelsmi. Eiropas būvkonstrukciju projektēšanas normatīvi nosaka būvkonstrukciju pārbaudi uz trieciena slodzi no transporta līdzekļiem, kas nav aktuāls vēsturisko ēku slogojuma gadījums. Vērā ņemamu iedarbi uz velvju pārseguma konstrukcijām var izraisīt sprādziena iedarbe. EN 1991-1-7 [85] nosaka iekšēja sprādziena iedarbi un tā analīzi gāzu vai tvaiku sprādziena gadījumā ražošanas ēkās. Nepastāv sprādziena slogojuma normatīva terorisma akta ievērtēšanai. Promocijas darba ietvaros nav apskatīta Rīgas Doma baznīcas analīze uz avārijas slogojuma iedarbēm, taču transformējot ēkas modeli specializētā sprādziena modelēšanas datoranalīzes programmā, iespējama šāda slogojuma analīze.

3.3 Plaisu monitoringa sistēmas izveide un datu analīze

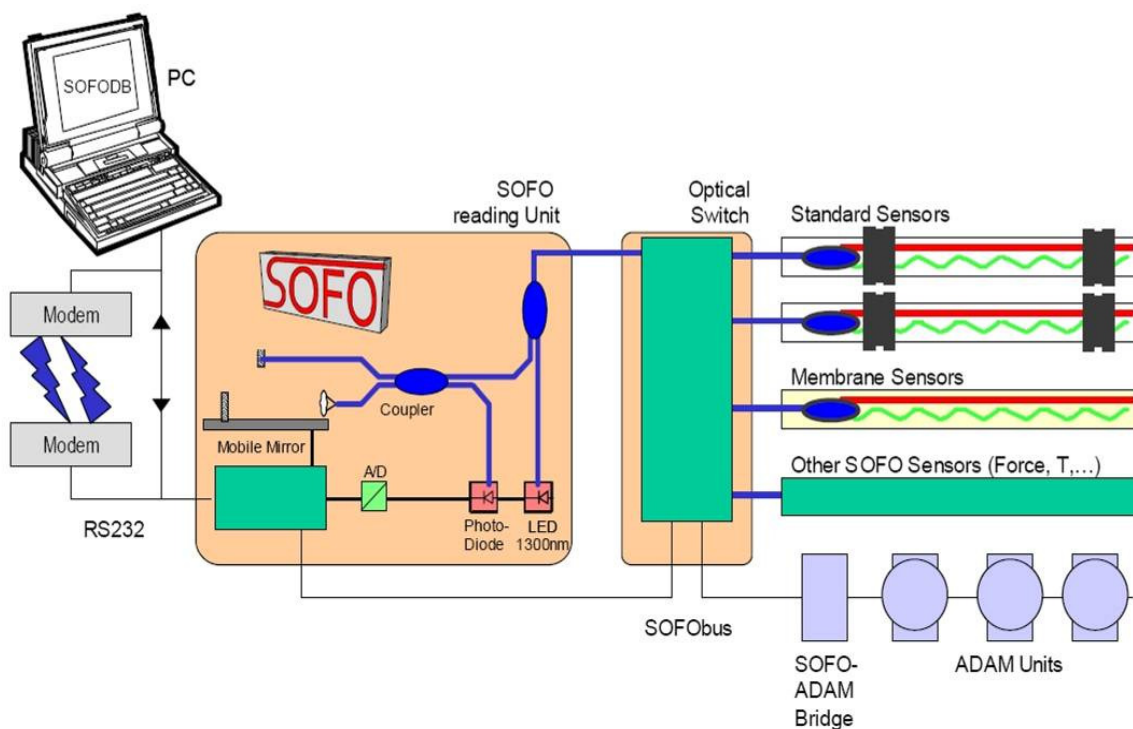
Plaisu monitorings ir plaši lietota prakse ēku plaisu dinamikas novērtēšanai. Līdzšinējā Rīgas Doma baznīcas plaisu atvēruma kontrole bija epizodiska ar nelielu skaitu

mehāniskajiem deformāciju mērītājiem. Mūra ēku plaisu monitoringa instrumentālā nodrošināšana tradicionāli tiek veikta, lietojot noniusus un mehāniskos deformāciju mērītājus. Atbildīgu konstrukciju deformāciju monitoringam tiek uzstādītas automātiskās monitoringa sistēmas, kuras sastāv no datorizētas kontroles sistēmas un pretestības vai optiskajiem deformāciju mērītājiem. Vairāki pētījumi [11; 21; 96; 97] sniedz automātiskas monitoringa sistēmu darbības analīzi vēsturisku ēku ekspluatācijas laikā. Plaisu monitoringa uzdevums ir sniegt informāciju, par plaisu atvēruma izmaiņām laikā. Plaisu monitoringa kalpo arī kā drošas ekspluatācijas kontroles sistēma un dod iespēju prognozēt ekspluatācijas drošības robežu. Automātiskās monitoringa sistēmas lietotas nozīmīgu mūra konstrukciju plaisu monitoringam Pavia Towers [97], S. Maria del Fiore Florencē [44], St. Petera Basilika Romā [99] un Pisa Tower [98]. Šajos pētījumos apskatītas monitoringa sistēmas, kuru darbība turpinājusies vairākus gadus, līdz tika pieņemts lēmums par rekonstrukcijas apjomu un metodi.

Dinamiskā monitoringa pamatā ir ēkas konstrukciju vibrāciju mērījumi pie mākslīgi izraisītas iedarbes, to salīdzinot ar transporta fona vibrācijām. Dinamiskais monitoringa un plaisu deformāciju monitoringa sniedz iespēju salīdzināt pētījuma rezultātus ar ēkas konstrukciju uzvedību. Pētījumos [14; 104] analītiskais modelis salīdzināts ar monitoringa datiem, lai ievērtētu ēkas reālās konstrukcijas uzvedības anomālijas.

Rīgas Doma baznīcas mūra plaisu kontrole no 2004. gada līdz 2005. gadam veikta ar mehānisko deformāciju mērītājiem, četrām plaisām. Mērījumu kvalitāte un datu apjoms nenodrošināja pilnīgu ēkas deformēšanās ainu atspoguļojumu.

2005. gadā, noslēdzot līgumu starp Rīgas Tehnisko universitāti un Rīgas Doma pārvaldi, tika apsekoti mūra velvju redzami defekti un izstrādāta monitoringa programma. Kā principiāli svarīgs nosacījums monitoringa instrumentu izvēlē bija sensoru ilgmūžība, aizsargātība pret apkārtējās vides ietekmi, imunitāte pret elektromagnētiskajām svārstībām, augsta precizitāte un datorizēta datu nolasīšanas, un kontroles sistēmas iespēja. RTU speciālisti, kā augstas precizitātes, automātiskas darbības sistēmu, piedāvāja Surveillance des Ouvrages par Fibres (SOFO) optisko tenzometru sistēmu. SOFO optisko šķiedru tenzometru sistēma izgatavota Šveices kompānijā Smartec. Izvēlēta monitoringa sistēma nodrošina ērtu datu nolasīšanu un darbības nepārtrauktību, principiālo shēmu sk. 3.14. attēlā. Optiskas darbības tenzometru darbības principa pamatā ir gaismas ātruma mērījumu starpība divās savstarpēji paralēlās optiskajās šķiedrās, no kurām vienas aktīvā zona ir pakļauta deformācijām un tiek izstiepta vai saspiesta, taču otra ir tāda paša garuma references un termiskā pagarinājuma kompensators.



Att. 3.14. SOFO Bee principiālā shēma [147].

Automātiskā, optisko tenzometru, deformāciju monitoringa sistēma SOFO pieskaitāma pie inovatīvām deformāciju kontroles sistēmām. SOFO Bee tehniskā specifikācija dota 3.2. tabulā.

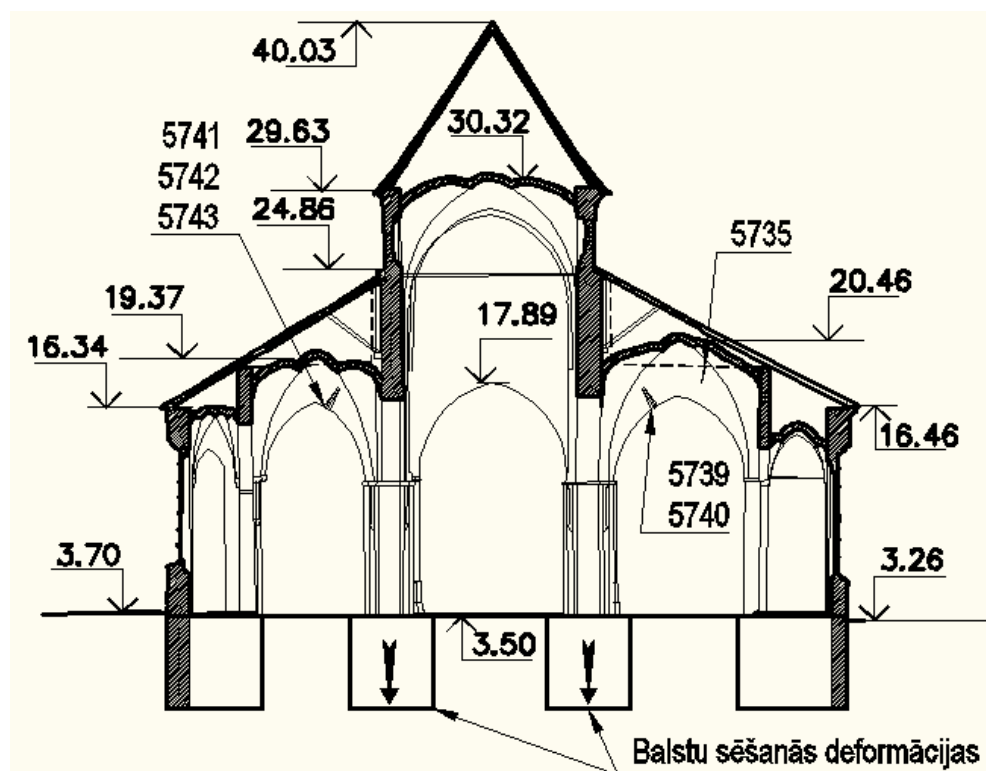
tabula 3.2.

SOFO Bee automātiskās deformāciju mērījumu sistēmas specifikācija

mērījumu izšķirtspēja	2 μ m RMS
linearitāte / precizitāte	< 2 ‰
tenzometra aktīvās zonas garums	500 mm
mērījumu diapazons	5 mm, 1% no aktīvās zonas
dinamiskais intervāls	max. 50 mm
mērījuma kļūda	zem mērījuma izšķirtspējas
kalibrācija	nav nepieciešama
mērījuma veikšanas laiks	< 10 sekundes
mērījumu kanālu skaits	24 gb.
tīkla strāvas padeve	230 V 50Hz / 110 V 60Hz
iekšējais barošanas elements	12 VDC, uzlādējams
datu sasaiste	RS232, modems
atmiņas ietilpība	8 Mb, 20000 mērījumu
darbības temperatūra	no 0 °C līdz +60 °C
korpusa un tenzometru aizsardzība	IP 65 klase

Katrs optiskais sensors pieslēgts tieši nolasītājam, tādējādi garākie optiskie vadi – 85m uzstādīti, lai sasniegtu tālākās plaisu zonas. Sensoru nolasījuma biežums ieprogrammēts ar 120 minūšu intervālu. Pie šāda skanēšanas biežuma iekārtas atmiņa nodrošina 70 dienu monitoringa datu uzkrāšanas iespēju.

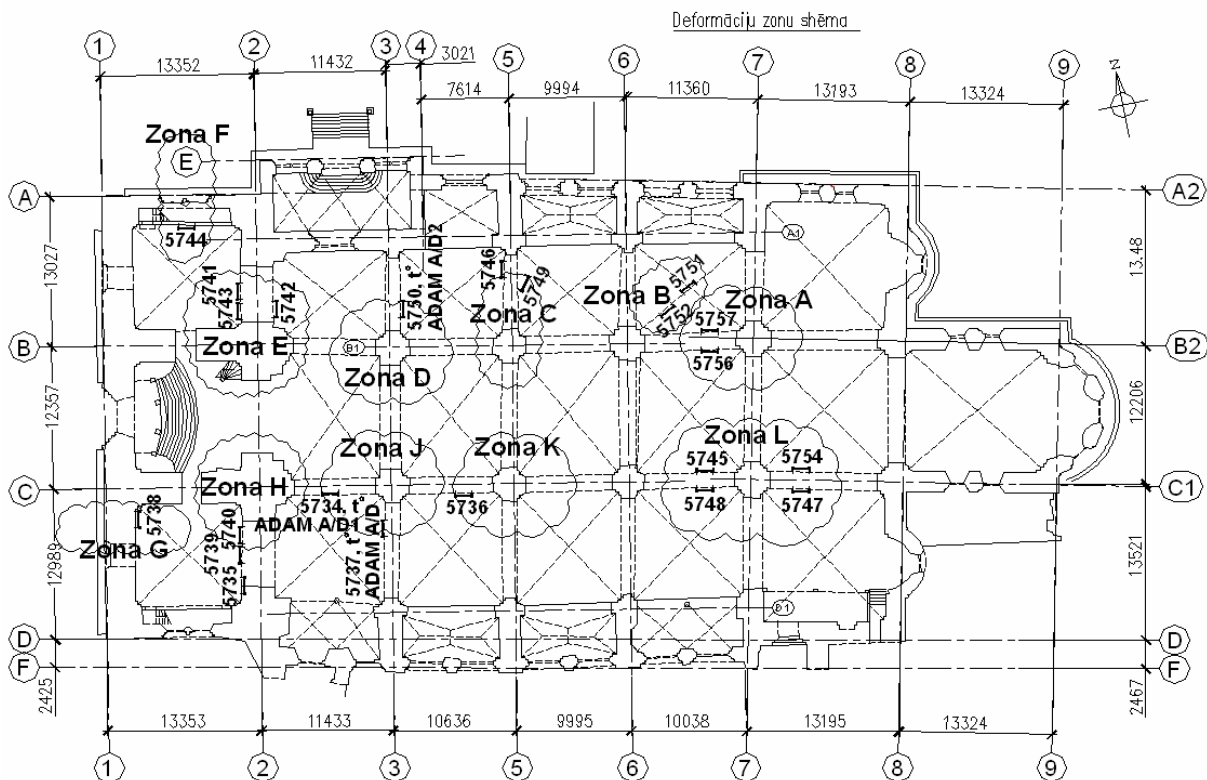
SOFO optiskie tenzometri uzstādīti Rīgas Doma baznīcas velvēm no apakšas un no bēniņu puses. Šāda sensoru izvēle nodrošina pārvietojuma mērījumus +/-2,5mm robežās, mērot gan plaisas samazināšanos, gan paplašināšanos. 3.15. attēlā parādīts sensoru novietojums uz arkas ribas ēkas šķērs griezumā. Kontrolējot arku plaisu atvēršanos no arkas virspuses un apakšpuses, tiek kontrolēta mūra daļu pagriešanās locīklā.



Att. 3.15. Tenzometru izvietouma shēma griezumā.

Sensoru nolasījumi pēdējo divu gadu periodā parāda tendenciozu plaisu attīstību. Optisko tenzometru mērījumi velves ribas virspusē (sensors 5735) un divi optiskie tenzometri (sensors 5739 un 5740) kontrolē arkas mehānisma pārvietojumu „eņģu” veidošanos punktos.

Apsekošanas ietvaros uzkrātā sensoru mērījumu datubāze tiek pārnesta uz portatīvo datoru, veidojot vienotu visa monitoringa laika mērījumu datu bāzi. SOFO Bee speciāli paredzēta attālinātai datu nolasīšanai, kā realizācijai paredzēta modema pieslēgšana un visu operāciju veikšana izmantojot telefona līniju. Vadoties no iegūtajiem mērījumiem, varam konstatēt tendenciozu plaisu palielināšanos aptuveni 0.2mm gadā.



Att. 3.16. zonu shēma un tenzometru izvietojums uz Rīgas doma baznīcas velvēm un arkām.

Uz Rīgas Doma baznīcas velvju pārsegumiem un galvenajām arkām uzstādīto optisko deformāciju mēritāju un temperatūras sensoru shēmu, sk. 3.16. attēlu.

Ēkas daļas, starp kurām notiek savstarpējas kustības apzīmētas ar zonām A; B; C; D; E; F; G; H; J; K un L.

„Zona A” – raksturo kolonas (asīs 7 - B2) deformācijas pret sienu pa asi B2. Tenzometri 5756 un 5757. Kolonas pārvietojums vasaras sezonā sastāda 0.57mm, plaisas atvēruma, kas atgriežas nulles stāvoklī sezonas beigās. Šis pārvietojums izsauc kolonas rotāciju pret „zonu B” un ilgstošā laika periodā var izraisīt krusta velves čaulas (asīs 6;7 – A1;B2) sadalīšanos nenoturīgos elementos.

„Zona B” – Kolonas rotācija uzirdina krusta velves čaulas konstrukciju, kas ilgstošā laika periodā var novest pie mūra daļu sadalīšanās. Tenzometri 5751 un 5752. Plaisu atvēruma pieaugums sezonā nav konstatēts, taču sezonālās svārstības sastāda 0.12mm.

„Zona C” – Tenzometrs parāda 1mm plaisas atvēruma izmaiņu sezonā, kas rada paliekošu plaisu atvērumu 0.33mm. Tenzometri 5746 un 5749. Tenzometra 5746 nolasījumiem jāpievērš īpaša uzmanība, jo summārais atstatums starp mūra daļām ir

ievērojams un turpina pieaugt. Šie mērījumi parāda centrālā joma kolonas (asīs 5 – B) nevienmērīgu sēšanos.

„Zona D” – Tenzometrs rāda 0.26mm sezonālas svārstības plaisas atvērumā bez paliekošām deformācijām. Tenzometrs 5750.

„Zona E” – Tenzometri 5741 un 5743 torņa pusē rāda summāro plaisas atvērumu no vienas sienas puses, tenzometrs 5742 no otras sienas puses. Katrā sienas pusē plaisu izmaiņas ir atšķirīgas, kas norāda uz mūra daļu pagriešanos. Kopējās plaisas sezonālās svārstības ir vidējais šo saistīto tenzometru rādījums. Sezonas svārstības ir 0.33mm, bet paliekošais plaisas atvērums 0.14mm. Plaisas atvēruma palielinājums norāda uz ēkas torņa sēšanos vai sasvēršanos pret pārējo ēku.

„Zona F” – Tenzometrs 5744 parāda temperatūras izraisītus 0.13mm pārvietojumus vasaras sezonā un nelielu plaisas aizvēršanos pret sezonas sākumu.

„Zona G” – Tenzometrs 5738 nostiprināts plaisas augšējā daļā ar nolūku, lai pārvietojums norādītu uz plaisas ietekmi uz krusta velves (asīs C;D – 1;2) čaulu. Sezonālais pārvietojums 0.3mm, no kura kā paliekošais fiksēts 0.06mm. Plaisas atvērums zem loga (pa asi 1, starp C;D) ir nozīmīgs, kas liecina par ēkas torņa daļas deformēšanos pret pārējo ēku.

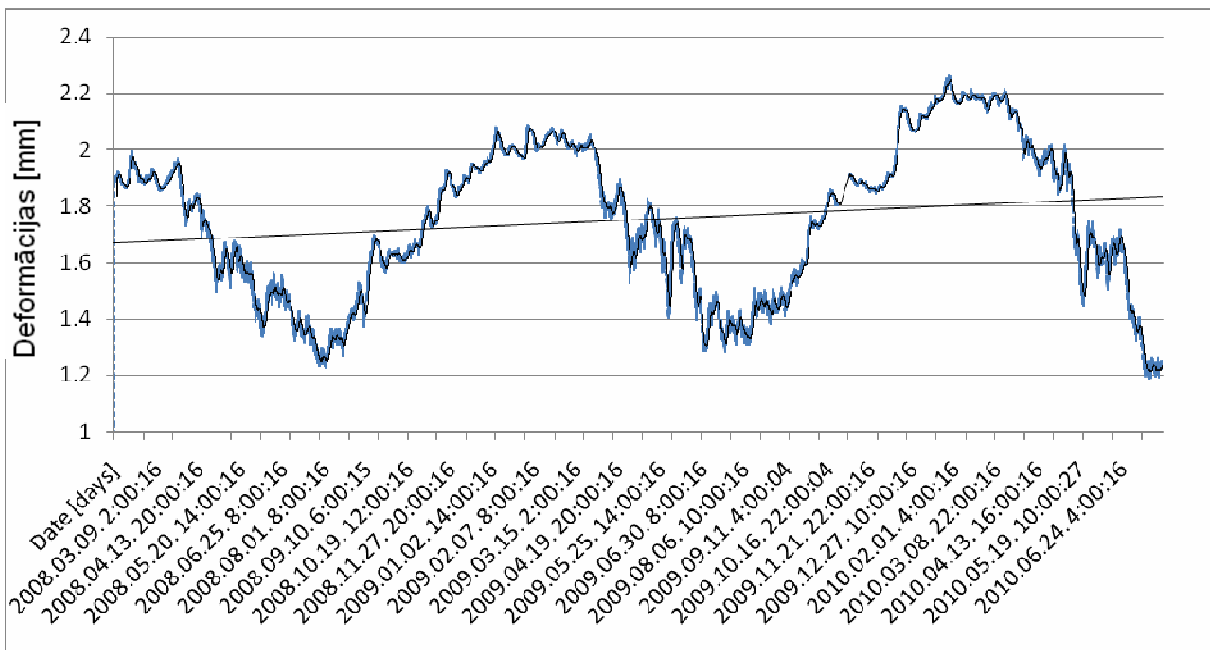
„Zona H” – Tenzometri 5739 un 5740 novietoti pie mūra ribas no apakšas un parāda aizmūrējuma kustību (pa asi 2 starp C;D). Šo tenzometru kopējais paliekošais sezonālais rādījums sastāda 0.16mm, ko pilnā mērā nevar uzskatīt par ēkas daļu pārvietojumu. Šis pārvietojums raksturo aizmūrējuma un ēkas daļu kopējo savstarpējo kustību. Šīs zonas augšējais tenzometrs 5735 parāda reālās sezonālās svārstības, kas sastāda 0.7mm, no kurām paliekošās ir 0.04mm.

„Zona J” – Tenzometri 5734 un 5737, novietoti savstarpēji perpendikulāri pret kolonu asu C – 3 krustpunktā. Tenzometrs 5734 norāda uz torņa daļas pārvietošanos pret pārējo ēku, ēkas garenvirzienā. Sezonāli plaisas svārstības ir 0.17mm, no kurām paliekošās ir 0.04mm. Tenzometrs 5737 parāda centrālā joma sēšanās deformāciju pret sānu jomām, sezonālās svārstības 0.24mm, no kuriem paliekošās ir -0.02mm (plaisas aizvēršanās)

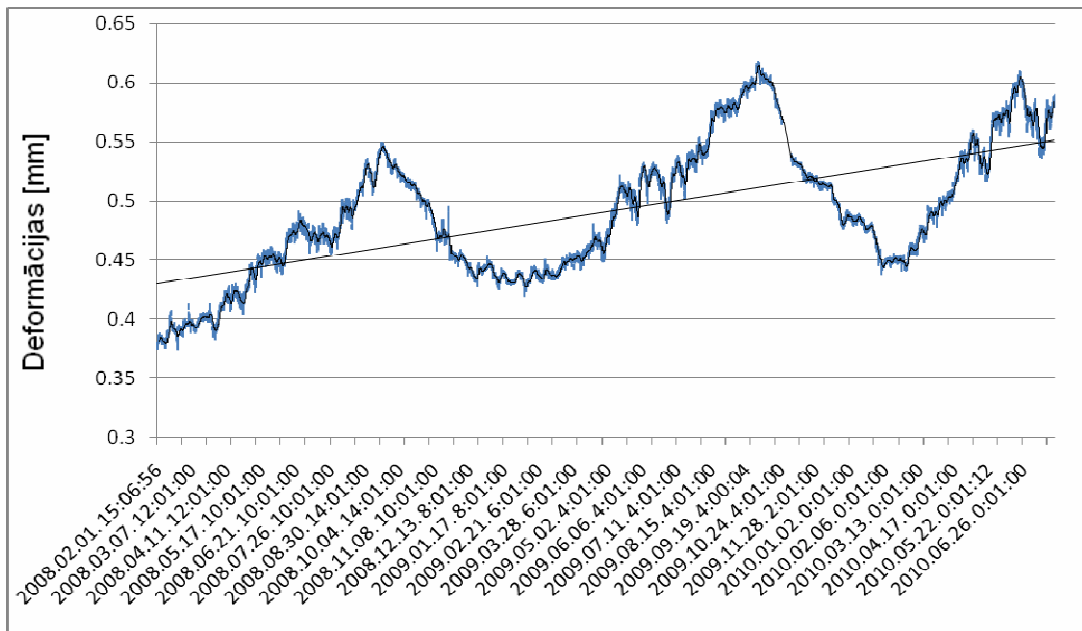
„Zona K” – Tenzometra 5736 rādījumi jāvērtē kopā ar tenzometru 5734, kas parāda plaisu izmaiņas ēkas garenvirzienā. Sezonālās rādījumu svārstības 0.94mm no kurām paliekošās ir 0.07mm sezonā.

„Zona L” – deformāciju dinamika aprakstīta nodaļā 3.6.

Optisko tenzometru mērījumi velves ribas virspusē (sensors 5735, sk. 3.17. attēlu) un divi optiskie tenzometri (sensori 5739, sk. 3.18. attēlu un 5740, sk. 3.19. attēlu) kontrolē arkas mehānisma pārvietojumu locīklu veidošanās punktus.

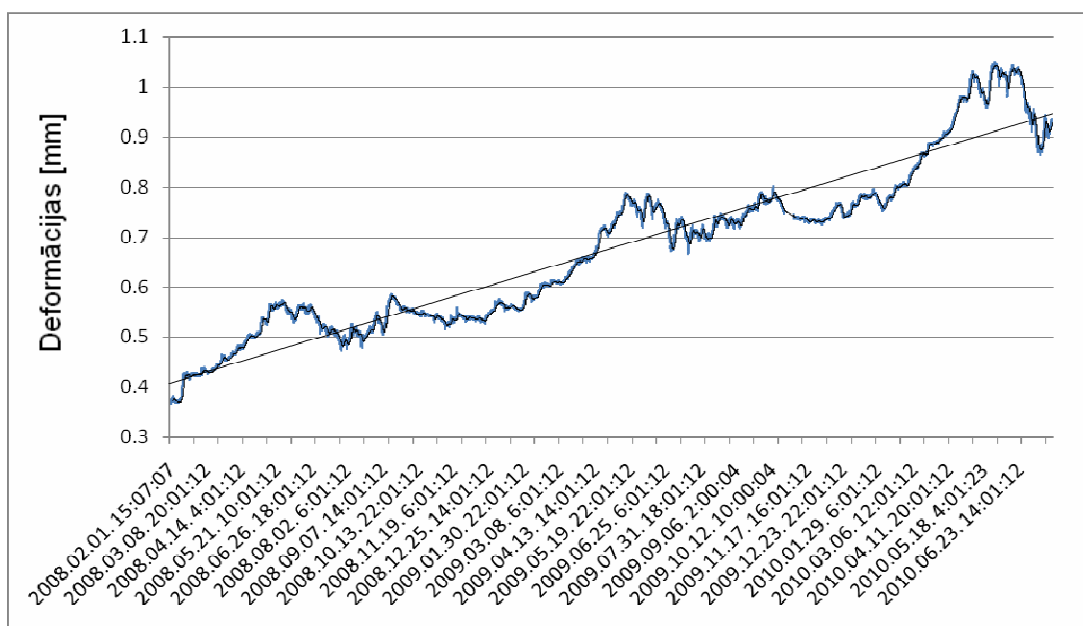


Att. 3.17 .Sensors 5735 – Novietots uz arkas ribas pa asi „2”, starp asīm „C” un „D”, blakus kāpnēm uz pažobeli. Sensors novietots uz arkas ribas no augšpuses un norāda torņa dienvidu joma ārējā balsta pārvietojuma nevienmērību pret torņa mūra daļu. Plaisa parāda 4 locīklu arkas ribas augšējā locīklas ārējās malas pārvietojumus.



Att. 3.18. Sensors 5739 – Novietots uz arkas ribas pa asi „2”, starp asīm „C” un „D” no zāles puses uz arkas ribas apakšas. Plaisa neparāda tiešu 4 locīklu arkas ribas apakšējās locīklas ārējās malas pārvietojumu, bet kopā ar sensoru 5740 rāda agrīno gadu rekonstrukcijā veikta ķīļa iemūrējuma

atdalīšanos no sākotnējās arkas ribas. Iemūrējuma ķīlis padara arkas ribu lēzenāku, bet plaisa nenodrošina sākotnējās arkas un aizmūrējuma pilnu kopdarbību.

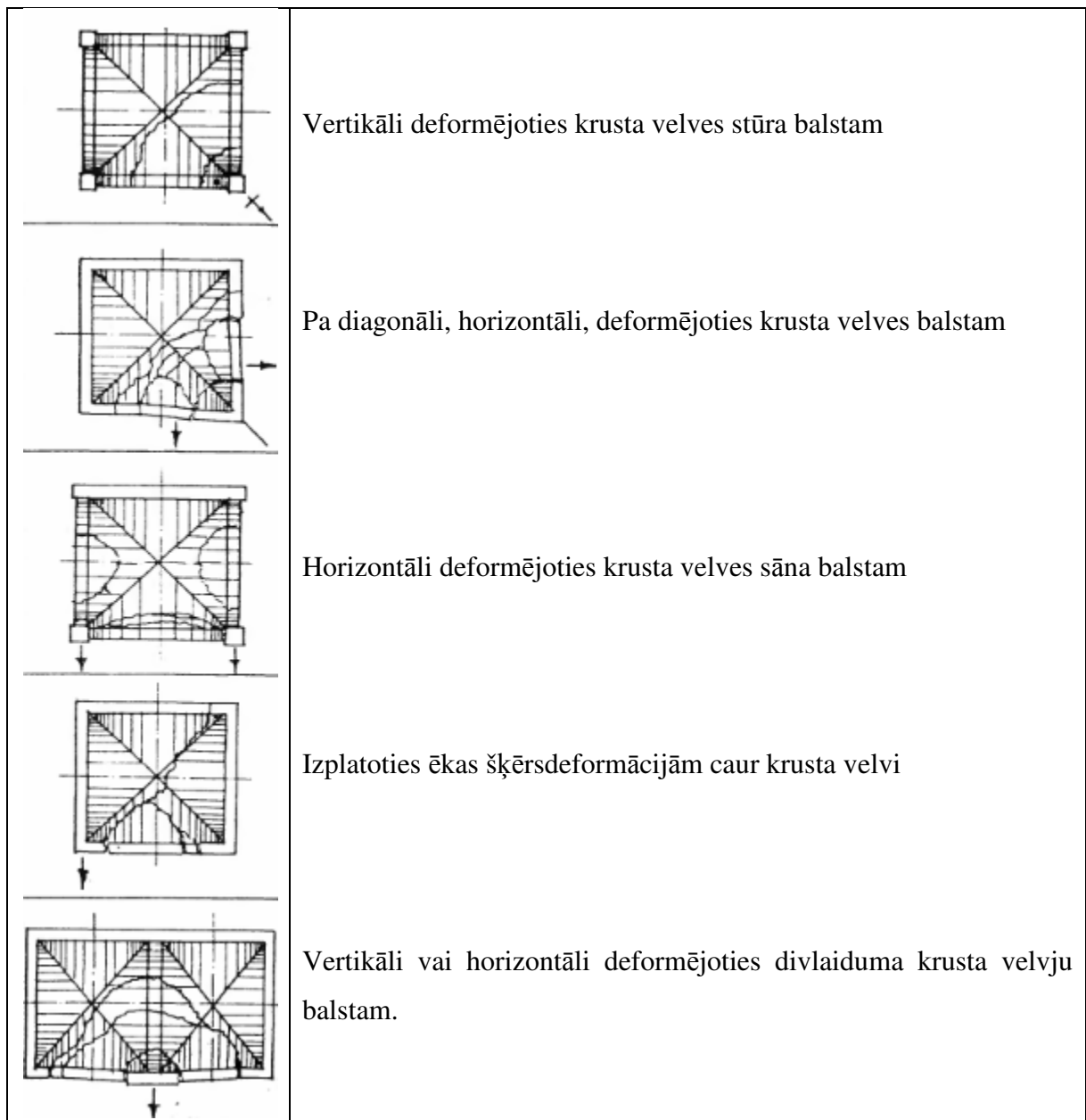


Att. 3.19. Sensors 5740 – Novietots uz arkas ribas pa asi „2”, starp asīm „C” un „D” no zāles puses uz arkas ribas apakšas. Plaisa neparāda tiešu 4 locīklu arkas ribas apakšējās locīklas ārējās malas pārvietojumu, bet kopā ar sensoru 5739 rāda agrīno gadu rekonstrukcijā veikta ķīļa iemūrējuma atdalīšanos no sākotnējās arkas ribas. Iemūrējuma ķīlis padara arkas ribu lēzenāku, bet plaisa nenodrošina sākotnējās arkas un aizmūrējuma pilnu kopdarbību.

Sensoru nolasījumi pēdējā gada periodā parāda tendenciozu plaisu attīstību, sk. 3.17.; 3.18. un 3.19. attēlu. Mūra masīvu sadalīšanās rezultātā veidojas kinemātisks mehānisms ar 4 locīklām. Šajās locīklās akumulējas visi sēšanās deformāciju inducētie pārvietojumi.

Modelējot sēšanās deformāciju ietekmi uz sprieguma izmaiņām velves čaulas konstrukcijā, iegūts ikgadējais palielošās nevienmērīgās sēšanās deformācijas lielums, kurš šajā konkrētajā deformāciju mehānismā sastāda 1,35mm/gadā.

Plaisu deformāciju mērījumu ilgums neatspoguļo atvēruma pieauguma paātrināšanos vai deformāciju normalizāciju.



Att. 3.20. Krusta velves plaisājuma rakstura veidi [153].

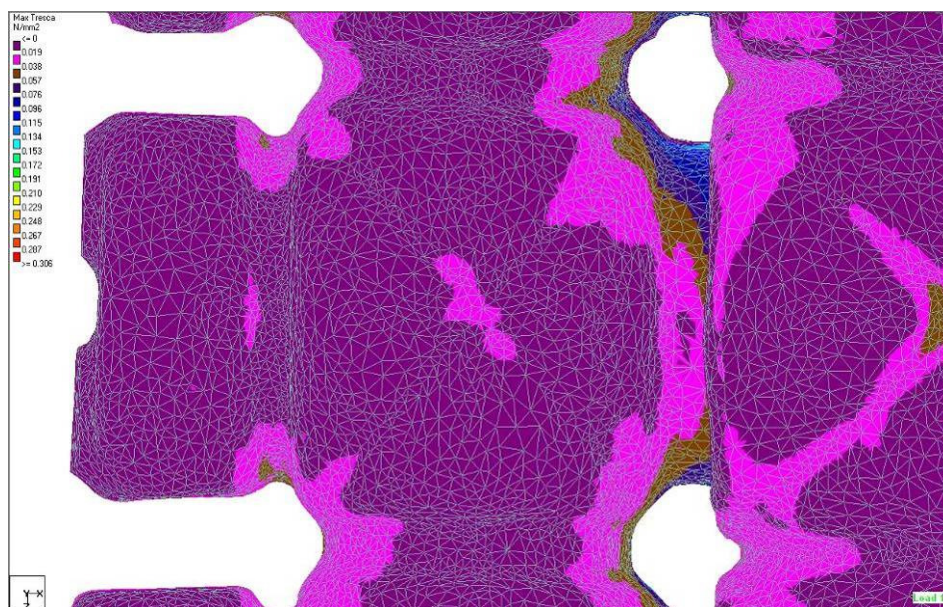
Analizējot vēsturisko mūru ēku pārsegumus, deformāciju raksturs tieši norāda uz bojājumu izcelsmes iemesliem. Krusta velves plaisājumu izcelsme pēc tās rakstura klasificējama piecos veidos, sk. 3.20. att.

3.4 Velvju pārseguma modelēšana

Pielietojot 3D lāzerskanējuma datus Rīgas Doma baznīcas velvju pārseguma datoraprēķina modeļa izveidei, veikta šī pārseguma balstu deformācijas un temperatūras

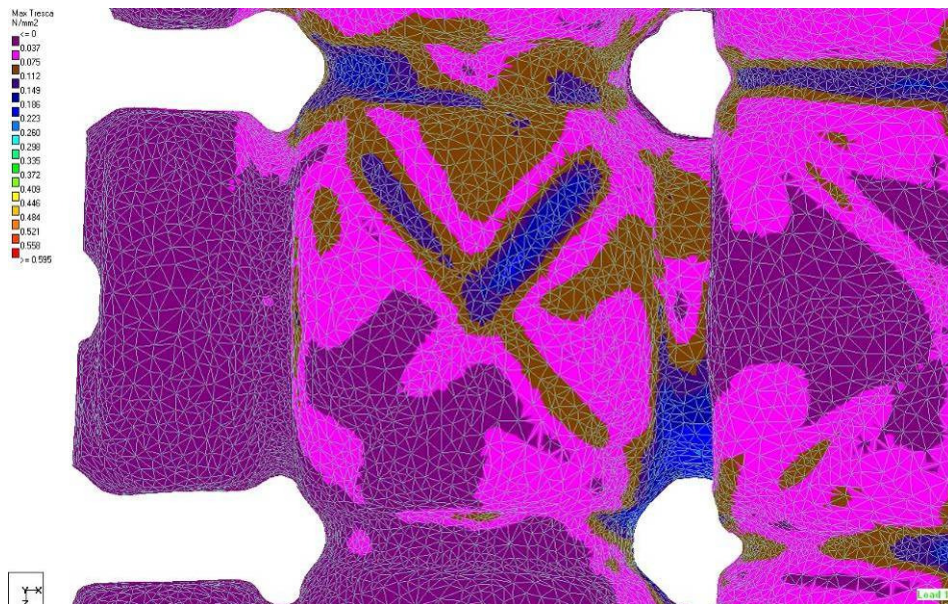
ietekmes analīze. Promocijas darbā aprobēta esoša mūra pārseguma analīze ar Latvijas būvinženieru sabiedrībā plaši lietotām būvkonstrukciju datoraprēķinu programmām Staad Pro V8i un SAP 2000 v10. Šīs datorprogrammas paredzētas tradicionālu būvkonstrukciju analīzei un ietver gan materiāla modeļa, gan datoraprēķina modeļa izmēra, gan datoraprēķina matemātiskā modeļa ierobežojumus.

Promocijas darbā veikta pašsvara slogota mūra velvju pārseguma analīze, pielietojot reālās virsmas ģeometrijas modeli. Pašsvara slogojums parāda nenozīmīgu asspēka ekscentritāti velves čaulas šķērsgriezumā, sk. 3.21. attēlu.



Att. 3.21. Mūra velves pārsegumā veidojas vienmērīgi sadalīti spiedes spriegumi.

Modelējot velves atbalsta kolonas vertikālās deformācijas, imitējot tās nevienmērīgu sēšanos, mūra velves čaulā un atbalsta ribās attīstās stiepes spriegumi, kuri pārsniedz mūra stiepes pretestību, sk. 3.22. attēlu. Analizējot balsta deformācijas, iespējams nodefinēt robežu, pie kuras iestāsies mūra sabrukums, stiepes spriegumiem pārsniedzot mūra nestspēju stiepē.



Att. 3.22. Mūra pārseguma velvē un balsta ribā veidojas būtisks stiepes spriegumu pieaugums.

Analīzes rezultātus sk. 3.5. nodaļā.

Analīze lineāri elastīgajā mūra darbības stadijā var tikt lietota ēkām bez plaisu zonām un nevienmērīgas sēšanās pazīmēm, projektējot rekonstrukcijas darbus, mainot ekspluatācijas apstākļus vai novērtējot nestspējas rezervi.

Promocijas darba ietvaros, pārseguma analīze lineāri elastīgajā stadijā, lietojot būvkonstrukciju datoranalīzes programmu Staad Pro, tiek izvirzīta par vienu no pirmā tuvinājuma aprēķina ceļiem. Veicot aprēķinus ar plātņu elementiem, iespējams aptvert ievērojami lielāku ēkas daļu vai pat visu ēku kopumā. Šāda pieeja ļauj izvēlēties kritiskās zonas otrās pakāpes jeb plaisājumu zonu analīzei.

Veidojot speciālu Rīgas Doma baznīcas ēkas daļas modeli temperatūras ietekmes analīzei, iegūtas sezonālo temperatūras svārstību izraisītas spriegumu izmaiņas. Temperatūras analīzei izveidots ēkas šķērsrāmja modelis. Šķērsrāmja aprēķins parāda sprieguma izmaiņas velvju konstrukcijas malējās šķiedrās: $\sigma_{\Delta t^{\circ}} = 0.012\text{MPa}$.

Modelējot balstu sēšanos ar būvkonstrukciju datorprogrammu SAP 2000, mūra materiāla sabrukums un nelineārās deformatīvās īpašības ievērtētas materiāla modelī, sk.2.12. nodaļu. Sagrūvuma analīze veikta mūra šķērsriezumu pārbaudot kompleksā spriegumstāvoklī, sk. 3.22. attēlu.

3.5 Velvju konstrukcijas lokāla sabrukuma modelēšana

Locīklu veidošanās no sēšanās deformācijām, temperatūras iedarbes un ģeometriskiem pārvietojumiem ir viens no galvenajiem velvju un arku sabrukšanas iemesliem. Plasticitātes attīstīšanās kontakta laukumos rada šī sabrukuma nelinearitāti. Locīklas veidošanās izsauc kontakta virsmas veidošanos, kurā viena mūra daļa iedarbojas uz otru kā slīdvirsmas kontakta plakne. Arī pēc plaisu izveidošanās mūra pārsegumā, to ekspluatācija vēl joprojām atbilst drošības kritērijiem, jo pieļaujamie šķersspēki ir atkarīgi no berzes koeficienta un šķērsriezumā darbošos normālspreģuma. Kinemātiskā, jeb „mehānisma” mūra daļu iedarbes metode tikusi attīstīta Heimana darbā [60] un ieviesta mūra arku aprēķinos. Heimans savas metodes pamatā izvirza pamatpieņēmumus:

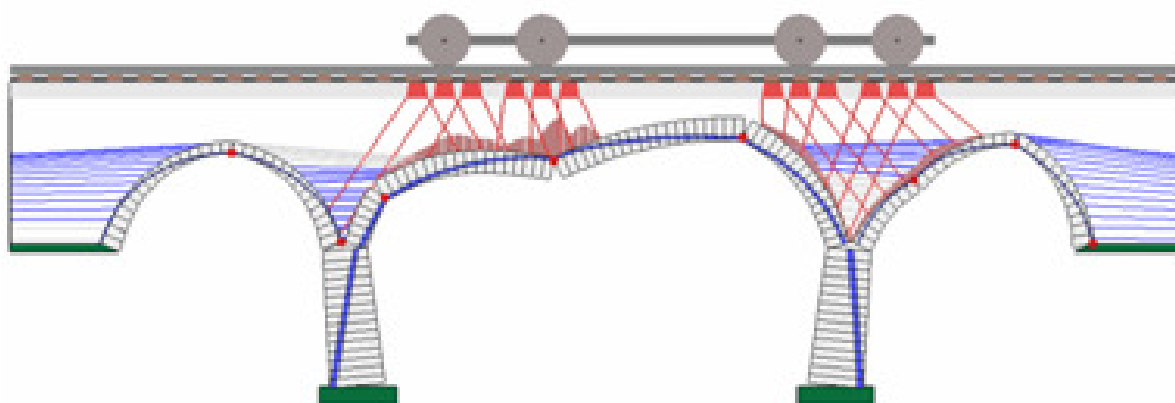
- a) mūrim ir bezgalīga spiedes stiprība;
- b) mūra kontakta virsmā ir bezgalīga berzes pretestība;
- c) mūra stiepes pretestība līdzinās nullei.

Viņš uzsvēris, ka plastiskā robežaprēķina metode var būt veiksmīgi pielietota pašsvara slogotām gravitācijas konstrukcijām, tādām kā mūra tilti, arkas un velves. Savā grāmatā [60] viņš uzsver, ka arku konstrukcijā sabrukums var iestāties tikai arkas konstrukcijā formējoties četrām locīklām. Mehānisms šajā gadījumā ir statiski nenoturīga sistēma un var izsaukt progresīvu pārseguma sabrukumu. Pieņemot, ka mūra materiāla elastīgie pārvietojumi pret locīklu fiziskajiem pārvietojumiem ir bezgalīgi mazi, var pieņemt, ka mūris ir nedeformējams ķermenis ar bezgalīgu stiprību. Mūra bloku kontakta zonās pieņemts, ka nevar veidoties slīdvirsmas. Locīklas var veidoties gan arkas ārējā plaknē, gan iekšējā. Rīgas Doma baznīcā vērojama precīzi šāda aina, ka sabrukuma veidošanās notiek attīstoties 4 locīklām. 2 no kuriem atrodas kolonu balstos un kuru pagrieziens ir pilnīgi pakārtots balstu sēšanās deformācijām, un divas locīklas velves pārseguma daļā, kuru plaisu atvērums norāda uz balstu nevienmērīgu sēšanās lielumu. Pēc plasticitātes teorēmas izriet, ka spiedes ass līnijai pietuvojoties arkas ārējai plaknei 4 vietās, varam runāt par drošības kritērija pārsniegšanu. Veidojoties plaisām mūra konstrukciju šķērsriezumā, locīklu pagriešanās punktus spiedes spēka ass tiek pārbīdīta un tiek pieņemts, ka tā iet caur locīklas centru. Zinot spiedes spēka ass novietojumu, var aprēķināt arkas nestspējas rezervi. Heimana [60, 61] kinemātiskā sabrukuma metode ievērtē arkas sabrukuma mehānismu, tas ir četru locīklu veidošanās arkas konstrukcijā. Ārējo spēku vai deformāciju radīta spiedes spēka ass pietuvināšanās arkas virsmai izsauc plastiskā locīklas veidošanos šajā punktā.

Daudz sarežģītāku divlaiduma arku sabrukšanas mehānismu apskatījis Hughes [66]. Pirmais, kurš lietojis datoraprēķinus, lai noteiktu bloku struktūra sabrukšanas mehānismus un kritisko slodzi bija Liveslejs [88]. Viņš pielietoja lineārās programmēšanas un minimālās enerģijas principu. Savā pētījumā viņš parāda, ka berzes ievērtēšana noved pie nekorekta sabrukuma mehānisma, kas rezultātā dod paaugstinātu kritisko spēku un neatbilstošu sabrukuma mehānismu. Savā pētījumā viņš apskata arī robežvirsmas problēmu, parādot, ka spēku plūsma vienmēr novietota pret plakni perpendikulāri.

Velvju pārsegumu ekspluatācijas drošības kritērijs ir tieši saistīts ar velvju daļu savstarpējiem pārvietojumiem. Nevienmērīga pamatu sēšanās atspoguļojas pārseguma velvju plaisu atvēruma izmaiņās, jo katra plaisa veido locīklu velves ribā, tādējādi sakoncentrējot pārvietojumu. Locīklas veidošanās un mūra daļu savstarpējais kontakts [45] rada velves ģeometrijas izmaiņas neproporcionāli rotācijas mehānisma ģeometrijai. Mūra daļu kontakta vietā veidojas sagrūvums spiedes spriegumu iedarbībā, kas realizējas, kā mūra javas plasticitāte. Gotiska stila būvēs veidots balstu piebērums, tādējādi palielinot šķērsriezuma pretošanās spēju nevienmērīgam slogojumam [62], kas izraisa šī bēruma horizontālu slogojumu.

Mūra bloku pamatnes deformāciju izraisītu pārvietojumu dēļ nozīmīgi palielinās stiepes spriegumi, kuri attīstās pa slīpu plakni un, sasniedzot pretestības robežu, veidojas plaisa. Pamatu deformācijas maina spiedes ass līniju arkas šķērsgriezumā. Spiedes ass līnija pārvietojas aiz vēsturiski projektētā 1/3 centra šķēluma un šķērsgriezuma pretējā pusē attīstās stiepes spriegumi, sk. 3.23. attēlu, ko uzskatāmi parāda modelēšana ar mūra arku datoraprēķina programmu Ring 2.0 [145].



Att. 3.23. Spiedes spēku ass novietojums šķēlumā [145].

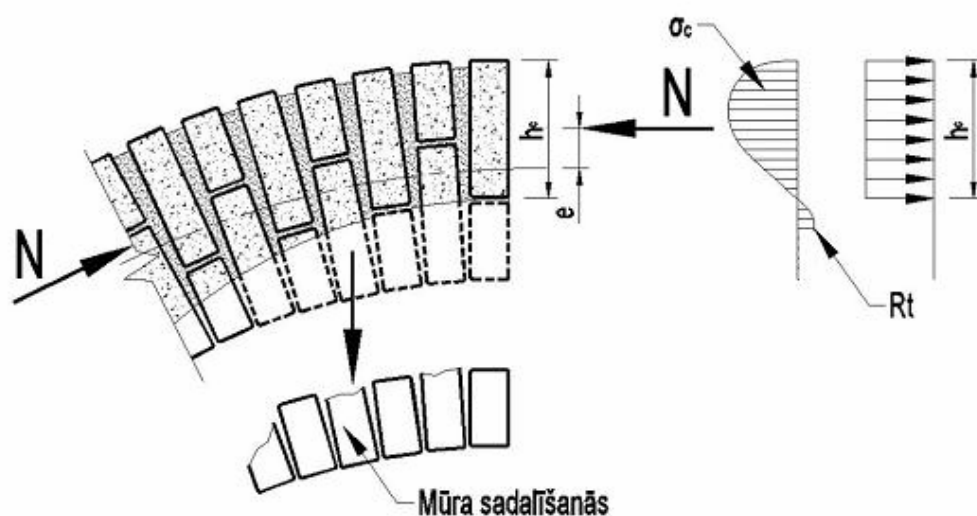
Modelējot ēkas deformēto formu, tika salīdzināti pārvietojumi plīsuma zonās starp monitoringa datiem un datorsimulāciju.

Mūra pārsegumu sadalšanās un bloku sasaistes zudums modelēts ar datorprogrammas palīdzību. Iesaistot GEM datorprogrammas SAP 2000 nelineāro moduli, modelēta plaisu attīstība balstu deformāciju ietekmē. Balstu deformāciju radītie iekšējie spēki un plaisājuma zonas tiks salīdzinātas ar Rīgas Doma baznīcas plaisu monitoringa datiem.

Veicot divus savstarpēji neatkarīgus pētījumus - gan ēkas datorsimulāciju, gan plaisu monitoringu, tiek veidoti priekšnosacījumi pamatu deformācijas izraisīta velvju pārseguma analīzei. Neatkarīgi no plaisu atvēruma monitoringa tiek veikti pamatu sēšanās monitoringa darbi, izmantojot optiskas darbība ģeodēziskos instrumentus [73]. Nevienmērīga pamatu sēšanās atspoguļojas pārseguma velvju plaisu atvēruma izmaiņās, jo katra plaisa veido locītku velves ribā, tādējādi sakoncentrējot visu pārvietojumu. Šādu pārvietojumu var analizēt arī ģeometriski, taču nepieciešams atrast rotācijas punktu arkas šķēsgriezumā. Šis rotācijas punkts atrodas uz spiedes spēka ass un to var aprēķināt analizējot iekšējos spēkus šķēsgriezumā. Lai atrastu spiedes spēka ass novietojumu šķēsgriezumā, tika radīta darba tabula, sk. 3.24. attēlu, ar Microsoft Excel palīdzību, iekļaujot tajā arī pārbaudes pēc spēkā esošajiem būvnormatīviem.

Att. 3.24. Ar Staad Pro saistīta Microsoft Excel tabula šķēsgriezuma pārbaudei.

Datu pārvietošanu no būvkonstrukciju datoraprēķina programmas uz aprēķina / pārbaudes tabulām iespējams veikt ar „macros” komandu palīdzību. Izstrādātā tabula nodrošina šķēlumu pārbaudi uz iekšējiem spēkiem, pieļaujamajām ekscentritātēm un spiedes spēka ass novietojumu šķēlumā. Pārsniedzot ekscentritātes, mūra šķērsgriezumā sāk veidoties stiepes spriegumi, kuru dislokācija aprēķinu modelī ļauj pievērst lielāku uzmanību šim velves iecirknim. Balstu deformāciju radītais lieces moments palielina stiepes spriegumus un noved pie lokāla šķērsgriezuma sabrukuma, sk. 3.25. attēlu. Cikliska slogojuma ietekmē, šādā šķēlumā veidosies šuvju izdrupumi, kas var novest pie velves sadalīšanās. Šo velvju iecirkņu noturību novērtē vizuāli apsekojot, jo noturība atkarīga no mūra šuves materiāla degradācijas.

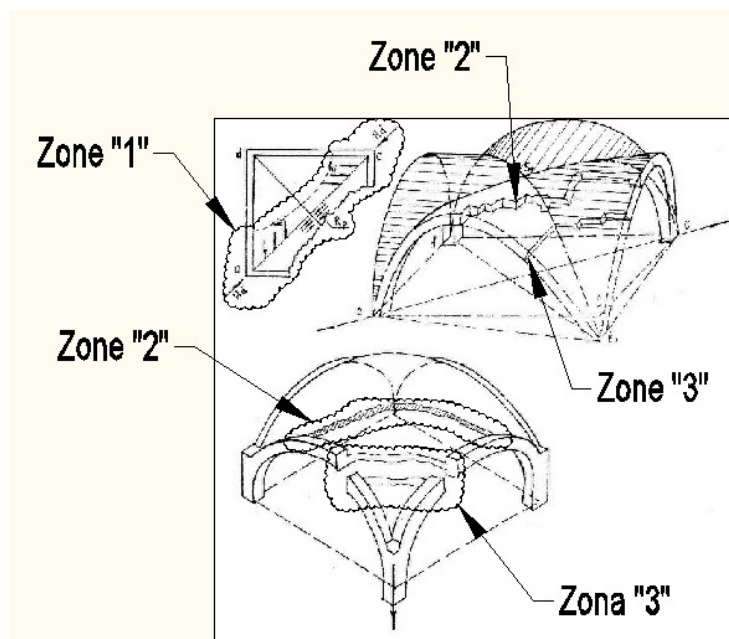


Att. 3.25. Šķērsgriezuma sadalīšanās cikliska ekscentriskā slogojuma ietekmē.

Modelējot balstu deformācijas elastīgajā mūra darbības stadijā, pielietojot nedeformējamus balstus, sk. 3.21. attēlu, iegūtie rezultāti parāda vienmērīgus spiedes spriegumus visā velves pārseguma čaulā. Velves balstam deformējoties vertikālā virzienā, pieaug iekšējie spriegumi velves čaulas šķērsgriezumā, sk. 3.26. attēlu, un veidojas 3 zonas ar būtiskām iekšējo spēku izmaiņām.

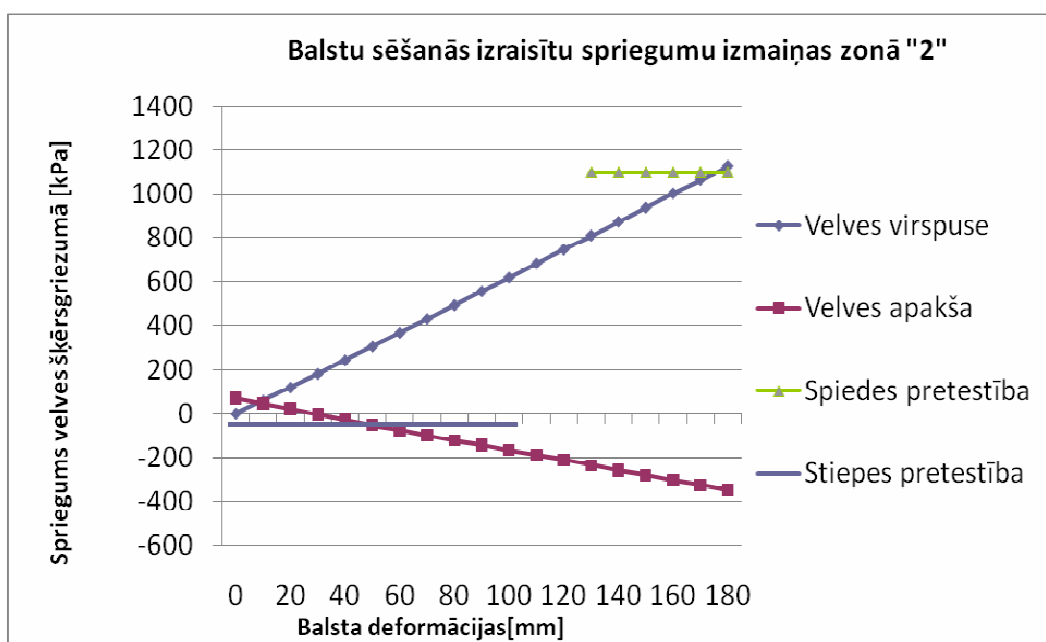
Analizējot balsta deformāciju radītu plaisājumu izšķir 3 zonas, sk. 3.26. attēlu:

- Zona „1” – Deformējoties velves stūra balsta mezglam, samazinās asspēks pieguļošajā diagonālē un pieaug spriegumi perpendikulārajā velves diagonālē,
- Zona „2” – Deformējoties velves stūra balsta mezglam, veidojas rotācijas locīkla velves čaulas virspusē,
- Zona „3” – Deformējoties velves stūra balsta mezglam, veidojas rotācijas locīkla velves čaulas apakšpusē.

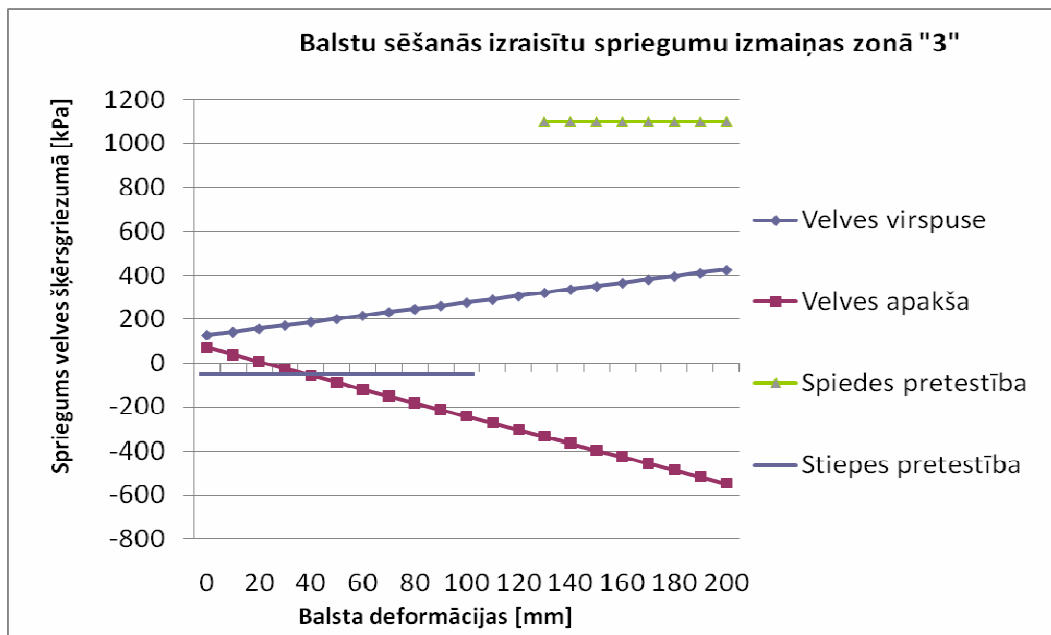


Att.3.26. Locīklu zonu veidošanās balstu deformāciju ietekmē izraisa deformāciju zonu “2” un “3” veidošanos un spriegumu pārdalīšanos un pieaugumu ribas zonā “1”.

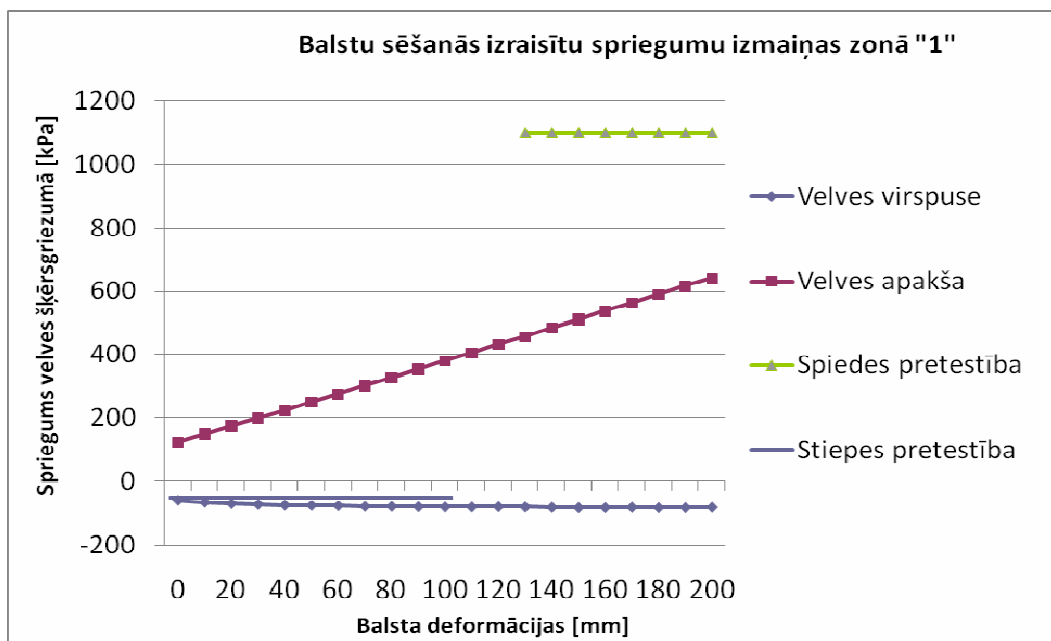
Modelējot balsta deformācijas, iegūta lineāra sakarība līdz stiepes pretestības robežai velnes čaulā, sk. 3.27., 3.28. un 3.29. attēlus. Deformējoties balstam zonās „2” un „3”, attīstās stiepes spriegumi, veidojot iecirkņus, kuros mūra elementi var zaudēt noturību, sk. 4.28. attēlu.



Att. 3.27. Spriegumu izmaiņas zonā “2”, deformējoties velnes balstam.



Att. 3.28. Spriegumu izmaiņas zonā "3", deformējoties velnes balstam.

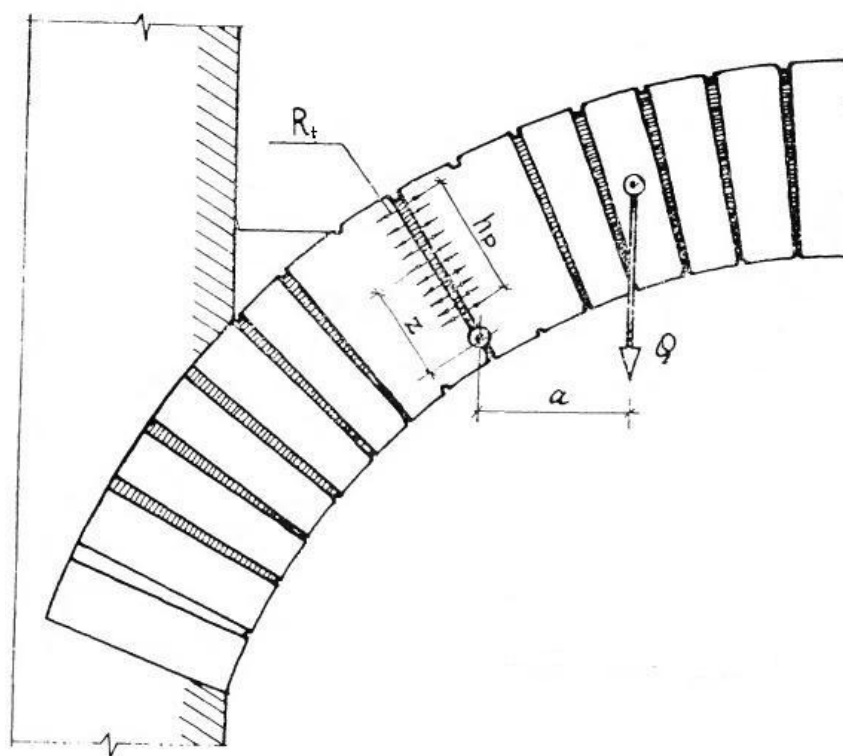


Att. 3.29. Spriegumu izmaiņas zonā "1", deformējoties velnes balstam.

Modelējot vidusjoma kolonu rindas nevienmērīgu sēšanās deformāciju attiecībā pret sānu jomu sienu pamatiem, iegūta balstu nevienmērīgas deformācijas linearitātes robeža 40mm. Turpmākas pamatu nevienmērīgās deformācijas veido plaisājuma zonu attīstību un mūru sadalīšanos. Balstu turpmākas deformācijas tiek kompensētas ar mūra daļu locīklas mehānisma rotāciju. Aiz deformāciju linearitātes robežas veidojas ģeometriskā nelinearitāte,

atslogojoties plaisājuma zonām „2” un „3”. Asspēks velves čaulas konstrukcijā pārorientējas „1” zonas virzienā. Zonā „1” nodrošināta desmitkārša nestspējas rezerve, uz ko norāda stiepes un spiedes spriegumu diagramma, sk. 3.29. attēlu. Balstu deformāciju rezultātā tiek pilnīgi atslogots deformētais balsts un ēkas slogojums caur zonu „1” tiek pārnests uz blakus balstiem.

Mūra blokam pie deformētā balsta - zona „3”, tā noturību nodrošina spēku līdzsvars. Balsts un velves daļa atdalās no pārējās ēkas konstrukcijas un veido pašsvara slogotu mūra bloku ar konsoles daļām. Līdzsvara nosacījumam jāizpildās jebkurā velves čaulas šķēlumā, sk. 3.28. attēlu. Šķēluma stiprībai jānodrošina konsoles daļas noturība, robežlīdzsvars aprakstīts vienādojumā 6. [153].



Att. 4.30. Mūra velves konsoles daļas līdzsvara sistēmas shēma.

$$R_t * h_p * z \geq Q * a \quad (3.1)$$

kur: h_p – stieptās zonas augstums;

z – stieptās zonas kopspēka un spiestās zonas kopspēka, spēkpāra plecs;

Q – rotējošās mūra daļas pašsvara spēks;

a – rotējošās mūra daļas plecs pret apskatāmo šķēlumu.

Atdalījušās mūra daļas pārbaude ietverta Excel darba tabulas pārbaudes kritērijos.

Rīgas Doma baznīcā šāda veida mūra bloki fiksēti pie diviem balstiem: zonas „A” un „L”, sk. 3.14. attēlu.

3.6 Globālas noturības modelēšana un progresīvās sabrukšanas novērtējums

Pildmūris ir bieži pielietota mūra konstrukciju tehnoloģija vēsturiskajās ēkās. Atšķirīgo mūra slāņu mijiedarbība sniegta mūra zaru sadalīšanās pētījumā [28]. Pildmūra pilastru pārslodze, zaru atšķirīgās deformācijas, vājā mūra slāņu sasaiste un dažādā ekspluatācijas ietekme uz slāņu materiāliem ir novedusi vēsturiskās ēkas līdz būtiskiem bojājumiem un pat sagrauvumam. Noto katedrāles sagraušana, pildmūra sadalīšanās iespaidā, ilglaicīgas šļūdes efektu dēļ ir pētījuma [31] atsauces objekts. Pēc šīs tehnogēnās katastrofas daudz vairāk pētnieku pievēršas vēsturisko mūra ēku vertikālo nesošo konstrukciju viendabības efektu izpētei.

Rīgas Doma baznīcas kolonām SIA “Balt – Ost - Geo” 2004. gadā veica centrālā joma kolonu skanēšanu ar radioradaru [81]. Kolonās tika atklāti iekšējie defekti, kā rezultātā tika pieņemts lēmums par kolonu pastiprinājumu zonās „A” un „L”, pielietojot lokšņtērauda aptveres. Izveidojot lokšņtērauda aptveru pastiprinājumu, tika paaugstināta kolonu nestspēja, taču šāda pastiprinājuma nepieciešamība netika detalizēti pētīta. Pildmūra vertikālo nesošo elementu analīzes un pastiprināšanas metodes [121; 128] izstrādātas pētījumos, analizējot mūra zaru sadalīšanos. Pētījumos, kā galvenie pildmūru sabrukšanas cēloņi, izcelti pildījuma atšķirīgās īpašības, zaru neiesaistīšanās kopējā mūra darbībā un apšuvuma mūrējuma šuvju izdrupumi.

Pēc Pētera baznīcas torņa sagraušanas 1666. gadā tika pieņemts lēmums pastiprināt Rīgas Doma baznīcas torni. Tā laika pastiprinājuma kalumi saglabājušies līdz mūsu dienām, savelkot torņa mūru pretējās sienas. Katra baznīcas pārbūve maina iekšējo spēku sadalījumu konstrukcijās, tādējādi padarot apgrūtinātu visu mūra konstrukciju analīzi kopumā. Arhitektūras pieminekļu saglabāšanas un ekspluatācijas nolūkā šajā promocijas darbā tiek izstrādāta metodoloģija, lai efektīvi un iespējami automatizēti varētu veikt vēsturisku mūra ēku stāvokļa un drošas ekspluatācijas robežas novērtēšanu.

Velvju mūra pārsegums ir statiski nenoteicama sistēma ar pašsvara uzspriegumu radītu stabilitāti. Doma baznīcas velves apvienotas kopējā pārseguma sistēmā, kurā centrālā joma velvju balsta horizontālo reakciju uzņem blakus jomu velves un sienas. Šāda, horizontāli uzspriegta pārseguma sistēma veido progresīva sabrukuma bīstamību, pazaudējot kādu no atbalsta punktiem [85].

Vēsturiskās mūra ēkas kopš mūra velvju pārseguma tehnoloģijas attīstības parāda augstu sabrukšanas drošību nevienmērīgu balstu deformāciju, ārējā slogojuma izmaiņu un

bojājumu gadījumos. Ēku ekspluatācijas drošības pētījumā [96] definēts dalījums pēc ēku ekspluatācijas riska un kaitējuma cilvēku veselībai un dzīvībai:

- a) ēkas, kuras nav paredzētas cilvēku lietošanai,
- b) ēkas, kuras nav paredzētas publiskai cilvēku lietošanai,
- c) ēkas, kuras atvērtas publiskai lietošanai,
- d) ēkas, kurās iespējama lielu cilvēku grupu pulcēšanās.

Pie ēkām, kurās iespējama lielu cilvēku grupu pulcēšanās pieskaitāmas baznīcas, katedrāles, koncertzāles, operas un teātrus.

Katrai no šīm ēku kategorijām atbilst riska nozīmības pakāpe. Projektējot jaunas būves, šī riska pakāpe tiek ievērtēta projekta izstrādē, turpretī esošajām ēkām riska līmeni iespējams analizēt, veicot šo ēku aprēķinu ar pietiekami lielu precizitāti. Kā parādīts pētījumā [96] esošu ēku drošības līmenis var sasniegt drošības robežu, tādu ekstrēmu slogojumu, kā zemestrīces iedarbes un vēja iedarbes ietekmē. Ēku būvkonstrukciju stāvokļa pasliktināšanās ekspluatācijas apstākļu, cikliska slogojuma un materiāla degradācijas iespaidā ir grūti izvērtējama drošas ekspluatācijas robeža. Pētījumā [19; 23] par Civic Tower Pavia sabrukšanu norādīts, ka sabrukums noticis bez būtiskām torņa konstrukciju stāvokļa pasliktinājuma pazīmēm.

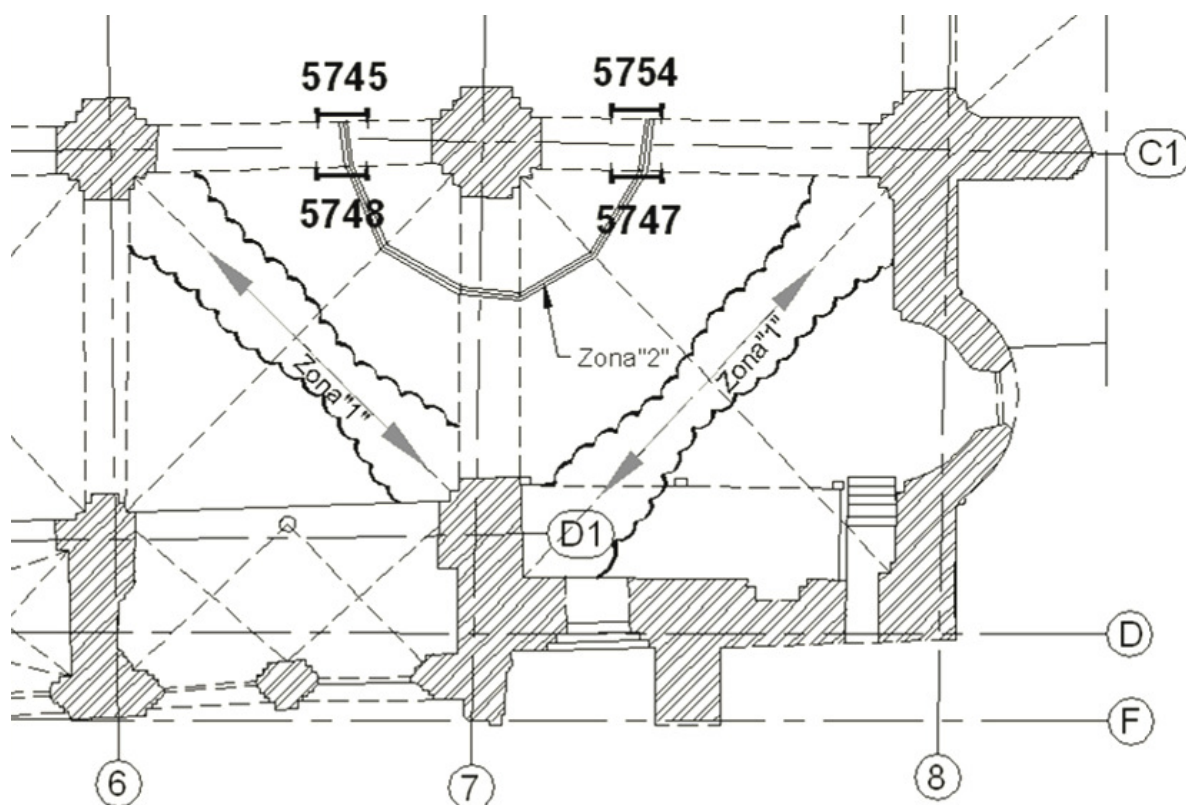


Att. 3.31. Noto katedrāle Sicīlijā pēc 1996. gada 13. marta zemestrīces [29].

Atrodoties tuvu sabrukšanas drošības robežai, slogojuma efektu sakrišana var izsaukt nozīmīgus bojājumus ēkas konstrukcijās, sk. 3.31. attēlu.

Noto katedrāle uzskatāma par piemēru, kādā veidā pakāpeniska stāvokļa pasliktināšanās novedusi pie neatgriezeniska arhitektūras pieminekļa bojāejas. Atverot apmeklētājiem Noto katedrāli 1776. gadā, tās kupoli pirmo reizi sagruva 1780. gada zemestrīcē. 1818. gadā pēc restaurācijas to atkārtoti atvēra publikai. Atkārtots katedrāles kupola sagrūvums 1848. gadā un ilgstoši rekonstrukcijas darbi līdz 1872. gadam atkārtoti iepriekšējo negadījuma pieredzi. 1950. gadā katedrālē tika veikti atkārtoti nostiprināšanas darbi. Neskatoties uz dzelzsbetona pastiprinājuma sistēmu, Noto katedrāle stipri cieta 1990. gada 13. decembra zemestrīcē. Tika veikti pagaidu nostiprināšanas darbi un katedrāle atkal atvērta pameklētājiem, taču plānotie rekonstrukcijas darbi netika sākti. 1996. gada zemestrīcē ievērojami bojājumi parādījās centrālā joma četrās kolonās. Sabrūkot vienai no četrām kolonām, sagrūšana izplatījās pa visu centrālo jomu un labās puses sāna jomu. Šis konkrētais progresīvās sagrūšanas piemērs iztika bez cilvēku upuriem, taču cilvēku ekspluatācijas intensitātes pieaugums ir saistīts arī ar iedarbes pieaugumu uz būvkonstrukcijām, tādējādi palielinot sabrukuma bīstamību.

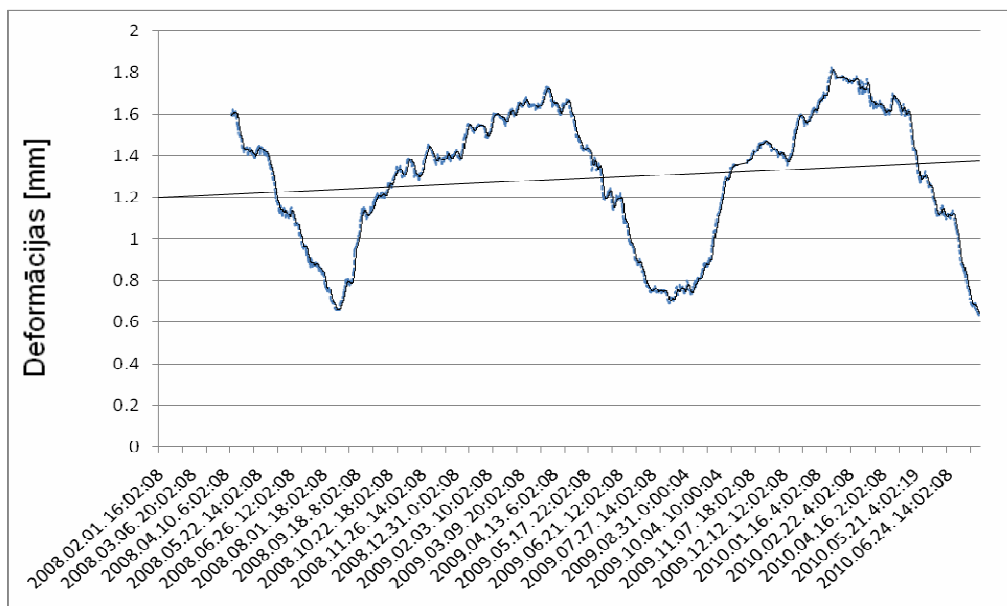
Rīgas Doma baznīcas deformāciju zonas „L” plaisu monitoringa dati norāda uz balsta ciklisku pilnīgu atbrīvošanos ziemas / vasaras sezonā. Sensoru izvietojumu shēmu sk. 3.32. attēlā.



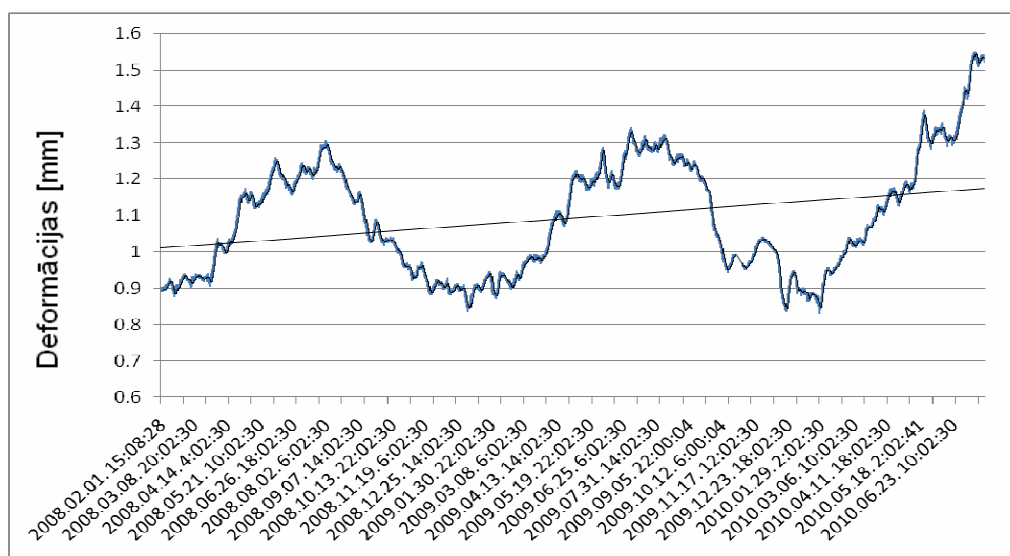
Att. 3.32. Velvju balstbīdes pārvešana uz blakus konstrukcijām.

Balsta deformācijas zonā „L” izsauc velvju balstbīdes pārņemšanu uz blakus kolonām un sienas daļu pa asi „7”, sk. 3.33. attēlu.

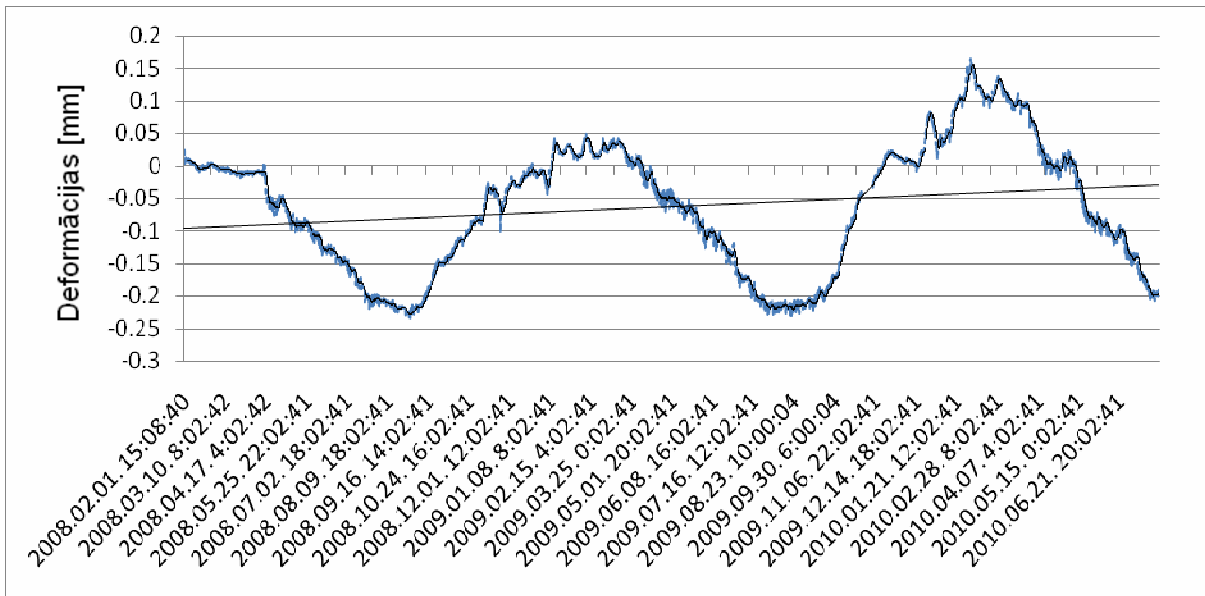
Sensors 5745; 5747; 5748 un 5754 – novietots pie apjotas kolonas, asu „C” un „7” krustpunktā. Sensori uzstādīti no vidusjoma un bēniņu puses un dod pilnīgu plaisu izmaiņu ainu. No šo sensoru datiem, sk. 3.33.; 3.34.; 3.35 un 3.36. attēlu, var aprēķināt kolonas vertikālās deformācijas pret blakus mūru apjomiem. Sezonālais kolonas relatīvais pārvietojums pret pārējiem mūra apjomiem sastāda 0.57mm.



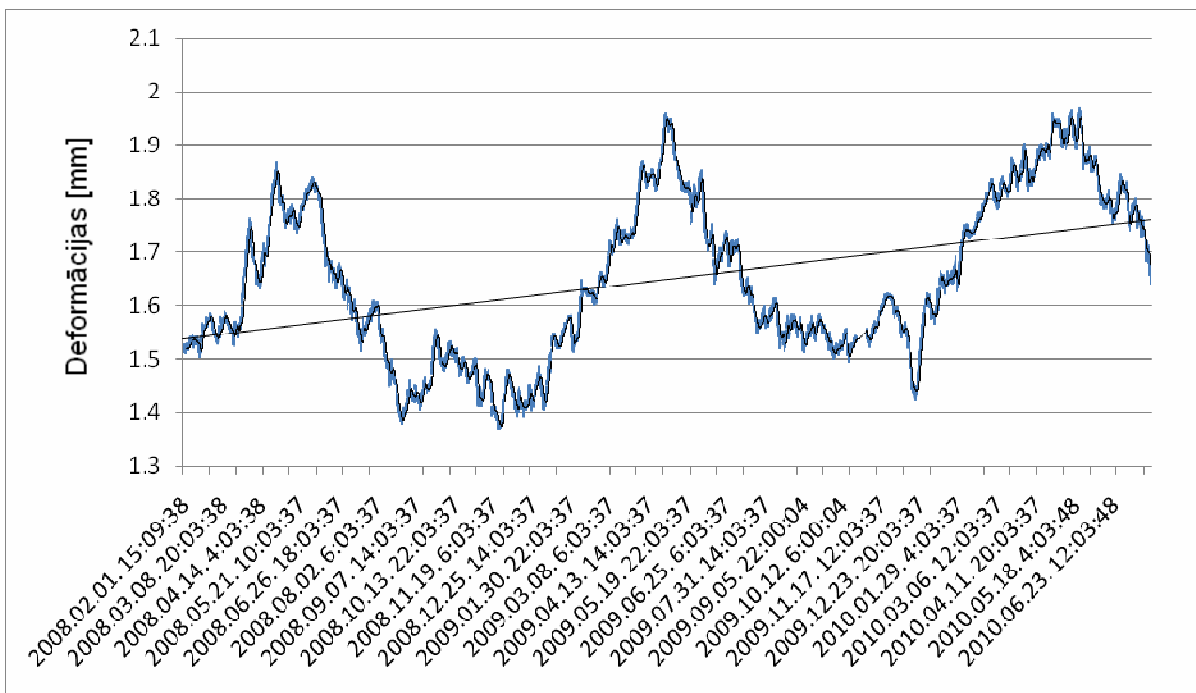
Att. 3.33. Sensora 5745 rādījumi 30 mēnešu periodā



Att. 3.34. Sensora 5747 rādījumi 30 mēnešu periodā



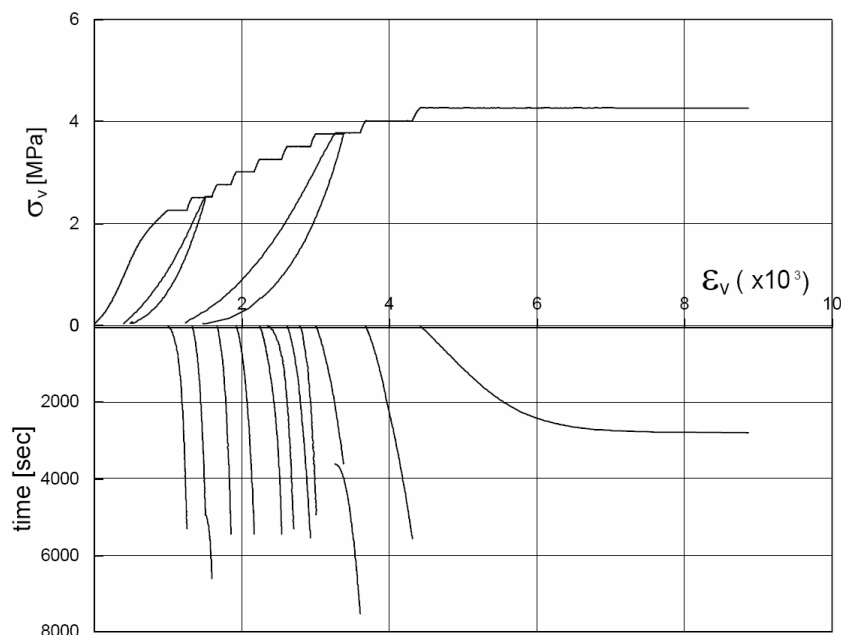
Att. 3.35 Sensora 5748 rādījumi 30 mēnešu periodā



Att. 3.36. Sensora 5754 rādījumi 30 mēnešu periodā

Balsta deformācijai pārsniedzot konstrukcijas lineāro deformāciju kapacitāti, velves čaulas asspēks pārdalās uz blakus esošajiem balstiem, palielinot iekšējos spēkus zonā „1”.

Nozīmīgs efekts ēku sabrukuma prognozēšanā ir materiālu īpašību testa datiem un to degradācijas ātruma novērtējumam.



Att. 3.37. Mūra šļūde cikliska slogojuma spiedes testos [4]

No pētījuma [20] par mūra materiālu šļūdes ilgtermiņu efektiem iegūstams apstiprinājums pieņēmumam, ka cikliska mūra materiāla slogošana tuvu nestspējas robežai noved pie šļūdes deformāciju uzkrāšanās mūra konstrukcijās. Anzani pētījumos [3; 4; 5] uzskatāmi parādīta cikliska slogojuma ietekme uz mūra deformatīvajām īpašībām, sk. 3.37. attēlu. Šļūdes deformāciju uzkrāšanās ietekmē velju pārseguma liekuma formas ģeometriju un konstruktīvā pacēluma samazināšanās noved pie nelineāra iekšējo spriegumu pieauguma, kuri pastiprina šļūdes efektus. Šļūdes efekti vēsturiskā mūrī attīstās pie spiedes spriegumiem, kuri pārsniedz 50% no mūra nestspējas spiedē. Rīgas Doma baznīcas ilgstošās balstu nevienmērīgās deformācijas radījušas spriegumu koncentratorus plaisu kontaktu vietās. Sezonālais temperatūras slogojums veido cikliska spiedes slogojuma efektu.

Šī darba ietvaros nav iespējams izvērtēt šļūdes efektus plaisu kontakta zonās, jo trūkst datu par Rīgas Doma baznīcas kaļķu javas šļūdes efektiem cikliska slogojuma apstākļos.

Savāktie šļūdes testu dati [4] liek pievērst uzmanību ilgtermiņa šļūdes efektiem:

- liela šķērsdeformāciju attīstība pirms parauga sagrūšanas;
- šļūdes attīstība sākot no 40 – 50% no spiedes pretestības;
- ilgstoša slogojuma virzienam paralēlu plaisu attīstība, kas liecina par nestspējas robežai tuviem spiedes spriegumiem konstrukcijās.

Vēsturisko mūra ēku modelēšana līdz šajā darbā piedāvātajai un aprobētajai metodoloģijai pamatojusies uz idealizētu proporciju ēku pārsegumu analīzi, diskretizējot materiālu īpašības un neievērtējot būvniecības etapus.

3.7 Mūra čaulu pārsegumu drošas ekspluatācijas robežas izstrāde

Balstu vertikāla deformācija rada divējāda veida sabrukšanas draudus:

- a) Velves šķērsriezuma sagrūvumu cikliska, ekscentriskā slogojuma ietekmē, kas veidojas paralēli velves čaulas virsmai, tuvu neitrālās ass plaknei;
- b) Velves mūra apgabalu noturības zudumus, rotējot mūra elementam.

Mūra šķērsriezuma sadalīšanās saistīta ar šuves materiāla izdrupumiem un promocijas darba ietvaros tie analizēti Rīgas Doma baznīcas deformāciju zonai „B”. Sagrūvuma attīstība jāanalizē ar lokālu mūra šuvju kontroli un ķieģeļu noturību. Velvju izdrupuma draudi novērtējami ar tradicionālajām mūra apsekošanas metodēm. Šāds sagrūvuma veids nedraud ar lielu baznīcas konstrukciju apjoma progresīvu sagrūvumu.

Otrajā sabrukuma veidā drošības analīze veikta ar promocijas darbā aprobēto metodi. Locīklas veidošanās šķēlumā, spriegumiem mūra materiālā sasniedzot šļūdes robežu, tiek sasniegta materiāla un formas ģeometriskās linearitātes robeža. Turpmāka locīklas šķēluma atvēruma palielināšanās un cikliskas svārstības rada paliekošu velves daļu ģeometrijas pārvietojumu [35; 78].

Velves pārseguma ekspluatācijas drošība atkarīga no deformāciju apmēriem [67], iedalot tos dažādu virzienu balstu deformācijās. Modelējot Rīgas Doma baznīcas balsta deformācijas, iegūtas drošas ekspluatācijas robežas.

Ar datoranalīzi prognozēta drošas ekspluatācijas robeža velves mūra daļu rotācijas ietekmē. Mūra pārsegumu spriegumstāvoklis līdz linearitātes robežai modelēts ar būvkonstrukciju datoraprēķina programmas Staad Pro palīdzību. Iesaistot GEM datorprogrammas SAP 2000 nelineāro moduli, tiks modelēta plaisu attīstība balstu deformāciju ietekmē. Balstu deformāciju radītie iekšējie spēki un plaisājuma zonas salīdzinātas ar Rīgas Doma baznīcas plaisu monitoringa datiem.

Velvju pārseguma zonas “H” drošas ekspluatācijas robeža definēta pie velvju ribu noturības zuduma - 1/24 daļas laiduma, ievērtējot: balstu deformācijas un plaisu monitoringa rezultātus. Velvju ribu rotācijas punktu ģeometriskais novietojums nosaka pārvietojumus velves čaulā. Saglabājoties lineārām balstu deformācijas tendencēm: 0,18mm/gadā, noturības zudums velves čaulas zonās “2” un “3” tiek prognozēts pēc 95 gadiem.

Attīstot promocijas darbā piedāvāto metodoloģiju, jāpievieno metodes tādu faktoru ietekmes ievērtēšanai, kā: mitruma migrācijas ietekme uz materiāla īpašību pasliktināšanos; javas saistvielu degradācija turpmākās ekspluatācijas laikā; karbonizācija māla ķieģeļos ekspluatācijas laikā; mūra rukuma attīstība turpmākās ekspluatācijas laikā; mūra tehnoloģijas ietekme uz iekšējo spriegumu sadalījumu; rekonstrukciju izraisīta iekšējo spriegumu pārdalīšanās un citi mazākas nozīmes efekti.

4. IZSTRĀDĀTĀS METODOLOĢIJAS APKOPOJUMS

Darba mērķis ir pēc iespējas automatizēt mūra ēku analīzi, nosakot visefektīvākās testa metodes materiālu īpašību ieguvei.

Darba ietvaros aprobēta lāzerskanējuma izmantošana liektu mūra pārsegumu ģeometriskā modeļa izveidei un datu transformācijai vairākās vietējā tirgū izmantotās būvkonstrukciju analīzes datorprogrammās.

Veikta velvju pārseguma balstu deformāciju analīze, ar mērķi modelēt pārsegumu iekšējo spēku izmaiņas.

Pētot plaisu attīstību balstu deformāciju ietekmē, modelēta velvju pārsegumu noturības robeža, ar mērķi definēt pārseguma drošas ekspluatācijas kritēriju.

Prognozēti drošas ekspluatācijas termiņi, kalibrējot pārseguma balstu deformāciju, temperatūras slogojuma un ekspluatācijas slogojuma efektus ar plaisu monitoringa datiem.

Izstrādātā metodoloģija ietver mūra pārsegumu analīzei nepieciešamo metožu apkopojumu un apskata to efektivitāti esošu mūra pārseguma analīzes nodrošināšanā. Metodoloģija sasaista trīs nodalītas nozares:

- d) ģeomātiku – liela izmēra objektu uzmērījumi, pielietojot virsmu lāzera skanēšanu;
- e) būvkonstrukciju defektu apsekošanu – plaisu kustības dinamikas novērtēšana, uzstādot plaisu monitoringa sistēmu un analizējot sienu un velvju plaisājuma zonu pārvietojumus;
- f) esošu mūra konstrukciju datoranalīzi – mūra pārseguma ekspluatācijas drošības novērtēšana, modelējot ēkas balstu nevienmērīgas deformācijas un monitoringa laikā reģistrēto temperatūras slogojumu.

Metodikas apraksts:

Piedāvātā un darbā aprobētā vēsturisko mūra ēku apsekošanas, uzmērīšanas, analīzes un drošas ekspluatācijas prognozes metodoloģija sastāv no:

- a) apsekojamās ēkas bojājumu vizuālas apskates, lai noteiktu bojājumu apjomu un raksturu;
- b) bojājumu monitoringa shēmas izstrādes, lai kontrolētu deformāciju attīstību;
- c) konstrukciju virsmu lāzerskanēšanas, iegūstot mūra virsmu aprakstošas punktu kopas;
- d) telpiskas virsmas modelēšanas, iegūstot ēkas konstrukcijas virsmu digitalizētu modeli un attīrot skanējuma datus no konstruktīvajām virsmām neatbilstošiem datiem;

- e) skanējuma datu apstrādes, pārveidošanas un transformācijas virsmas vai telpiskā modelī, pēc iespējas saglabājot virsmu ģeometrisko precizitāti un sagatavojot datormodeli ēkas analīzes mērķim atbilstošā kvalitātē;
- f) efektīvākās metodes izvēli mūra materiālu īpašību noteikšanai, ievērojot ēkas analīzes specifisko mērķu prasības;
- g) mūra materiālu testu apjoma izvēles, lai iegūtu nepieciešamos mūra parametrus materiālu īpašību definēšanai datoranalīzē;
- h) iespējamās informācijas ieguves par ēkas pārbūvi vai izmaiņām būvniecības procesā, ar mērķi koriģēt datoraprēķina modeli;
- i) ekspluatācijas apstākļu apkopošanas, lai nodefinētu iedarbes datoranalīzes modelī;
- j) ēkas telpiskas darbības modelēšanas, ievērtējot mūra materiāla ilglaicīgos deformāciju efektus;
- k) ekspluatācijas apstākļu piemērošanas analīzei, ar mērķi sasniegt monitoringa datiem atbilstošu datormodeļa uzvedību;
- l) rezultātu analīzes, precizējot monitoringa programmu un mūra materiālu papildus izpētes nepieciešamību;
- m) rekonstrukcijas datormodelēšanas un iegūto efektu izvērtēšanas, dodot rekomendācijas rekonstrukcijas projekta izstrādei;
- n) ekspluatācijas apstākļu izmaiņu simulācijas datoranalīzes programmā, ar mērķi izvērtēt ekspluatācijas slogojuma izmaiņu efektus.

Promocijas darbā piedāvātā metodoloģija ļauj samazināt velvju pārsegumu analīzes darbietilpību, ievērtēt būvdarbu etapu, būvniecības tehnoloģijas un rekonstrukciju ietekmi, veikt padziļinātu ēkas izpēti ekspluatācijas apstākļu un rekonstrukcijas plānošanas gadījumam.

5. SECINĀJUMI

Promocijas darbā izvirzītie mērķi un uzdevumi ir sasniegti. Pētījums sniedz noslēgtu metodoloģiju vēsturiska arhitektūras mantojuma konstrukciju tehniskā stāvokļa analīzei, saglabāšanai un ekspluatācijas drošības novērtējumam.

Promocijas darba ietvaros izstrādāta metodoloģija vēsturisku ēku mūra velvju pārseguma aprēķiniem, pielietojot inversās inženierijas principus un aprobējot tos būvkonstrukciju analīzei.

1. Secināts, ka mūra velvju virsmu lāzerskanēšana, salīdzinājumā ar tradicionālo mūra konstrukciju uzmērīšanu, sniedz laikietilpības ieguvumu 50-80%, ievērtējot virsmas plakņu ģeometrisku sarežģītību.
2. Secināts, ka pretstatā industriālajai inversajai inženierijai, mūra virsmu plakņu formēšana nav pilnībā automatizējama un datu apstrādi jāveic manuāli, kas sastāda 70% apjoma no kopējās darbietilpības.
3. Piedāvāts datu transformāciju formāts *.dxf (Drawing Interchange Format), datu apmaiņai starp modelēšanas un analīzes datorprogrammām, tādējādi metodiku attiecinot uz plašu būvkonstrukciju datoranalīzes instrumentu klāstu un samazinot transformējamās informācijas apjomu.
4. Minimizējot aprēķina rezultātu kļūdu iegūta pieļaujamā modeļa novirze no reālās konstrukcijas virsmas ģeometrijas, vienlaicīgi izvērtējot modeļa elementu ģeometrisku izmēru un modeļa elementu skaitliskā izmēra ietekmi. Rīgas Doma baznīcas mūra velvju pārseguma gadījumā, noteikta optimāla modeļa virsmas novirze, zem 14.3mm.
5. Esoša mūra materiālam konstatēta būtiska nestspējas raksturlielumu izkliede. Mūra materiālu izpētei izvēlētas negraujošas vai minimāli sagraujošas testa metodes, respektējot vēsturisko arhitektūras pieminekļu saglabāšanas prasības.
6. Mūra javas stiprības robežas noteikšanai piedāvāts lietot PNT-G urbšanas penetrācijas enerģijas testu, kura īpaši precīzus rezultātus dod zemas stiprības mūra javām.
7. Kā tiešu mērījumu, augstas precizitātes, esoša mūra homogenizēta materiāla elastības raksturlielumu noteikšanas metodi, piedāvāts lietot dubulto plakanā domkrata testu.
8. Piedāvāts, homogenizēta mūra materiāla deformāciju – spriegumu diagrammu aprakstīt ar lineāriem iecirkņiem, iekļaujot sabrukšanas kritēriju stiepē un spiedē.
9. Piedāvāts, homogenizēta materiāla modelī, materiāla stiprības raksturlielumus definēt kā minimālos no plakniska sprieguma stāvokļa diagrammas, lai ievērtētu mūra kārtu orientāciju pret tīkla modeļa elementu orientāciju.

10. Mūra masīviem ieteikts izmantot radioradaro skanēšanu, lai noteiktu viendabību un materiāla homogenizēta raksturojuma pielietošanas iespējas analizējamajai konstrukcijai.

Izstrādāta metodoloģija, kuras metožu secīga izpilde sniedz esošu mūra ēku pārseguma konstrukciju drošības analīzi. Analizējot plaisu monitoringa datus, prognozēta reālas konstrukcijas aktīvāko deformācijas zonu drošas ekspluatācijas robeža.

11. Pašsvara slogotas mūra konstrukcijas projektētas ievērojot ēku ģeometrisko proporciju principu, tādējādi nodrošinot spiedes spēka dislokāciju šķērsriezuma centra zonā. Noteikts, ka Rīgas Doma baznīcas velvju pārseguma pamatu nevienmērīgām deformācijām pārsniedzot 40mm, tiek pārsniegts velvju čaulas stiprības robežstāvoklis.
12. Analizējot globāla sabrukuma draudu pieaugumu, no kopdarbības izslēdzoties velves balsta mezglam, noteikts iekšējo spēku relokācijas mehānisms, pārnesot slogojumu uz blakus balstiem.
13. Noteikts, ka vēja slodze rada spriegumus ēkas perimetra sienu malējās šķiedrās, kas sastāda 1.5% no spriegumiem mūra masīvā. Šos spriegumus, pilnā mērā, nevar attiecināt uz velvju pārseguma čaulas konstrukciju, un vēja slogojuma efekts tiek pieņemts par maznozīmīgu un netiek ievērtēts velvju ekspluatācijas drošības analīzē.
14. Analīzes rezultātā konstatēts, ka temperatūras slogojums velvju šķērsgriezumā sezonāli maina spriegumu pieaugumu un samazinājumu $\pm 1.5\%$ robežās, no pašsvara radītā sprieguma. Pārvietojums temperatūras bloka ietvaros atspoguļojas plaisu atvēruma izmaiņās, velves ribās, mūra masīvam pagriežoties kontakta locīklā.
15. Secināts, ka balstu nevienmērīgas sēšanās deformācijas, mijiedarbībā ar temperatūras slogojuma radītiem plaisu pārvietojumiem, nodrošina sezonālas velvju pārseguma stāvokļa izmaiņas un ir noteicošās velvju drošas ekspluatācijas robežas novērtēšanā.
16. Deformāciju zonās konstatētās plaisu atvēruma svārstības, kuras analizējot reālās ģeometrijas modeli, pārnestas uz nevienmērīgām balstu deformācijām. Konstatēts, ka locīklu mehānisma pārvietojumi velvju ribās nosaka transformētus plaisu pārvietojumus velves čaulā, kas atkarīgi no reālās velves ģeometrijas.
17. Parādīta mūra velves čaulu drošas ekspluatācijas robeža atkarība no čaulas balstu pārvietojumiem, kas izriet, kā daļa no velves ģeometriskajiem izmēriem. Analizējot dinamiskāko Rīgas Doma baznīcas deformāciju zonu „H” iegūta drošas ekspluatācijas robeža 95 gadi.

6. LITERATŪRA

1. Alvarez de Buergo M., Fort R. Characterizing the construction materials of a historic building and evaluating possible preservation treatments for restoration purposes// Geological Society of London. Special Publications. 2002. - Sēj. 205. Natural Stone, Weathering Phenomena, Conservation Strategies and Case Studies. - 241.-254.lpp.
2. Ameny P., Loov R.E., Shrive N.G. Models for long-term deformation of brick work// Masonry International. - 1984. Nr.1. – 27.-36.lpp.
3. Anzani A., Binda L., Mirabella Roberti G. A Numerical Interpretation of Long-term Behaviour of Masonry Materials under Persistent Loads// 4th STREMA, Architectural Studies, Materials & Analysis, Computational Mechanics Publications, Grieķija: - Konferences rakstu krājums. Sēj. 1., 1995. - 179-186.lpp.
4. Anzani A., Binda, L., Mirabella Roberti G. The Effect of Heavy Persistent Actions into the Behaviour of Ancient Masonry// Materials and Structures. – 2000. Sēj. 33. Nr. 228. - 251-261.lpp.
5. Anzani A., Binda L., Mirabella Roberti G., Tongini Folli R. A Study of Ancient Masonry Towers Under Heavy Persistent Actions// 5th Int. Symp. on Computer Methods in structural Masonry (V STRUMAS), 2001. gada 18.-21. aprīlis, Itālija, Roma: - Konferences rakstu krājums, 2001. - 1-8.lpp.
6. ASTM C 1196-91, Standard test method for in situ compressive stress within solid unit masonry estimated using the flat-jack method. Filadelfija, ASTM: 1991.
7. Astori B., Bezoari G., Guzzetti F. Analogue and Digital Methods in Architectural Photogrammetry// XVII Int. Congress of Photogrammetry and Remote Sensing, Commission V, 1992. gada augusts, ASV, Vašingtona: - Konferences rakstu krājums, 1992. Sēj. 3.
8. Aumelis P., Meierovics S., Ķipēns D. Rīgas Doma baznīca. Velvju pārseguma izpēte. - Rīga. SIA „LBS Konsltants”. 2005. – 23 lpp.
9. Baronio G., Binda L. Experimental approach to a procedure for the investigation of historic mortars// Joint International Workshop on Evaluation and Strengthening of Existing Masonry Structures: - RILEM Publications SARL, 1995. - 107.-115..lpp.
10. Baronio G.; Binda L.; Saisi A. Mechanical and physical behaviour of lime mortars reproduced after the characterization of historic mortar// In International RILEM workshop on historic mortars: characteristics and tests. 1999. gada 12.-14. maijs, Skotija, Paisley: - Konferences rakstu krājums, 2000. - 307-326.lpp.

11. Bartoli G., Chiarugi A., Gusella V. Monitoring systems on historic buildings: the Brunelleschi Dome// *Journal of Structural Engineering*, ASCE. – 1996. Sēj. 122. Nr. 6. (jūnijs) – 663.-673.lpp.
12. Batoli G., Chiostrini S., Innocenti S. Problems related to the analysis of experimental data from flat-jack tests// *5th International Congress on Restoration of Architectural Heritage*. Itālija, Florence, 2000. gada 17.-20. septembris: - Konferences rakstu krājums –CD. 2000.
13. Bazant Z.P., and Planas J. Fracture and size effect in concrete and other quasi-brittle materiāls// *CRC Press*, Boca Raton, USA. - 1998.
14. Beconcini M.L., Bennati S., Salvatore W. Structural characterisation of a medieval bell-tower: first historical, experimental and numerical investigations// *III International Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions*, University of Minho, 2001. gada 7.–9. novembris, Guimarães, Portugāle: - Konferences rakstu krājums, 2001. – 431.-444. lpp.
15. Bernabini M., Brizzolari E., Orlandi L., Santellani, G. Application of Ground penetrating radar on Colosseum pillars// *5th International Conference on GPR*. Kanāda, Ontario, Kitchenera: - Konferences rakstu krājums. 1994. – 547.-558. lpp.
16. Binda L., Lenzi G., Saisi A. Radar Investigation for Diagnosis of Historic Buildings: Application to Stone Masonries// *8th International Conference on Structural Faults and Repair*. Lielbritānija, Londona: - Konferences rakstu krājums – CD, 1999.
17. Binda L., Lenzi G., Saisi A. NDT of masonry structures: use of radar test for the characterisation of stone masonries// *7th Int. Conf. on Structural Faults and Repair*. , Skotija, Edinburga, 1997. gada 9. jūlijs: - Konferences rakstu krājums, 2001. Sēj. 3. – 505.-514.lpp.
18. Binda L., Anzani A., Gioda G. An analysis of the time-dependent behaviour of masonry walls. *9th International Brick/Block Masonry Conference*, Vācija, Berlīne: - Konferences rakstu krājums, 1991. Sēj. 2. - 1058.-1067.lpp.
19. Binda L., Gatti G., Mangano G., Poggi C., Sacchi Landriani G. The collapse of the Civic Tower of Pavia: a survey of the materials and structure// *Masonry International*. – 1992. Sēj. 6. Nr. 1. – 11.-20.lpp.
20. Binda L., Anzani A. The time-dependent behaviour of masonry prisms: an interpretation// *The Masonry Society Journal*. – 1993. Sēj. 11. Nr. 2. pp. 17.-34.lpp.
21. Binda L., Mirabella G, Abbaneo S. The Diagnosis Research Project// *Earthquake Spectra*. – 1994. Sēj. 10. Nr. 1. – 151.-170.lpp.

22. Binda L., Modena C., Baronio G., Abbaneo S. Repair and investigation techniques for stone masonry walls// *Construction and Building Materials*. – 1997. Sēj. 11. Nr. 3. – 133.-142.lpp.
23. Binda L., Anzani A., Mirabella Roberti G. The failure of ancient Towers: problems for their safety assessment// *Int. IABSE Conference on “Composite Construction - Conventional and Innovative”*, Čīrihe, Šveice: - Konferences rakstu krājums, 1997. – 699.-704. lpp.
24. Binda L., Modena C., Baronio G., Abbaneo S. Repair and investigation techniques for stone masonry walls// *Construction and Building Materials*, Sēj. 11., Nr. 3., 1997. – 133.-142. lpp.
25. Binda L., Lenzi G., Saisi A. NDT of masonry structures: use of radar test for the characterisation of stone masonries// *7th International Conference on Structural Faults and Repair*. 1997. gada 7. jūlijs. Skotija, Edinburga: - Konferences rakstu krājums, Sēj. 3. 1997. – 505.-514. lpp.
26. Binda L., Saisi A., Ludwig N., Maierhofer C., Leipold S., Schaurich D. Combination of non-destructive testing methods for the characterisation of the moisture content and distribution in a historic brickwall// *2nd International RILEM Conference on Rehabilitation of Structures*. 1998. Austrālija, Higheta: - Konferences rakstu krājums, 1998. – 112.-129.lpp.
27. Binda L., Tiraboschi C., Tongini Folli R. On site and laboratory investigation on materials and structure of a Bell-Tower in Monza// *2nd International RILEM Conference on Rehabilitation of Structures*. 1998. Austrālija, Melnburna: - Konferences rakstu krājums, 1998. – 542.-556.lpp.
28. Binda L., Baronio G., Gambarotta L., Lagomarsino S., Modena C. Masonry constructions in seismic areas of central Italy: a multi-level approach to conservation// *8NAMC 8th North American Masonry Conference*. 1999. ASV, Austina, - Konferences rakstu krājums, 1999. – 44.-55.lpp.
29. Binda L., Baronio G., Gavarini C., De Benedictis R., Tringali S. Investigation on Materials and Structures for the Reconstruction of the Partially Collapsed Cathedral of Noto (Sicily)// *6° Int. Conf. Structural Studies, Repairs and Maintenance of Historical Buildings, STREMAH 99*, Drēzdene, Vācija: - Konferences rakstu krājums, 1999. – 323.-332. lpp.
30. Binda L., Tiraboschi C. Flat-Jack Test as a Slightly Destructive Technique for the Diagnosis of Brick and Stone Masonry Structures// *International Journal for Restoration*

- of Buildings and Monuments (International Zeitschrift für Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege), Cīrihe, 1999. – 449.-472.lpp.
31. Binda L., Saisi A., Messina S., Tringali S. Mechanical Damage Due to Long Term Behaviour of Multiple Leaf Pillars in Sicilian Churches// III International Seminar: Historical Constructions 2001 – Possibilities of Numerical and Experimental Techniques. 2001.gada 7.-9. novembris, Portugāle, Guimaraes: - Konferences rakstu krājums, 2001. – 707.-718.lpp.
 32. Binda L. Binda L., Cardani G., Saisi A., Valluzzi M.R. Vulnerability analysis of the historical buildings in seismic area by a multilevel approach// Seventh International Congress on Civil Engineering (7th ICCE). 2006. gada 8.-10. maijs, Irāna, Tehrāna: - Asian Journal of Civil Engineering, 2006. Sēj. 7. Nr. 4. – 343.-358.lpp.
 33. A. Bonaca A. Bosi R. Buratta R. Serafini Structural health monitoring experiences and innovations// MuRiCo3, Mechanics of masonry structures strengthened with composite materiāls. Università IUAV di Venezia. 2009. gada 22.-24. aprīlis. Itālija, Venēcija. : - Konferences rakstu krājums, 2009. - 91.-98.lpp.
 34. Bondars K., Korjakins A., 2007. Influence of deformation at a heritage building support on stability of groined masonry arch// Computational Civil Engineering 2007, 5th International Symposium, 2007. gada 25. Maijs, Rumānija, Iași: - Konferences rakstu krājums, 2007. – 39.-54. lpp.
 35. Bondars K., Korjakins A. Rīgas Doma baznīcas velvju plaisu atvēruma monitorings. - Rīga. RTU BF Būvmateriālu un būvkonstrukciju katedra. 2010. - 30 lpp.
 36. Bratasz Ł., Kozłowski R., Camuffo D., Pagan E. Impact of indoor heating on painted wood: monitoring the altarpiece in the church of Santa Maria Maddalena in Rocca Pietore, Italy// Studies in Conservation. – 2007. Sēj. 52. Nr. 3. – 199.-210.lpp.
 37. Brencich A., Gambarotta L. Mechanical response of solid clay brickwork under eccentric loading// Part I: Un-Reinforced Masonry. - Materials and Structures, RILEM Publications SARL. – 2005. Sēj. 38. Nr. 2. – 257.–266.lpp.
 38. Būvdarbu tehniskie noteikumi, I. Vispārējie noteikumi. Satiksmes Ministrijas Dzelzceļu Virsvalde Techniskās direkcijas izdevums, Rīga, 1933. - 173 lpp.
 39. Cardarelli E., de Nardis R. The use of 3-D and 2-D seismic tomography for assessing the physical integrity of building panels// European journal of Environmental and Engineering Geophysics. – 1999. Nr.3, - 131.-142.lpp.
 40. Cardarelli E., Godio A., Marrone C., Morelli G., Sambuelli L., Santarato G., Socco, L.V., Jin G.T. Geophysical survey on the vault of Scarsella of the S.Giovanni Baptistery

- in Florence// International Millennium Congress Archi 2000, ICOMOS. 2001, Izraēla, Bētleme: - Konferences rakstu krājums, 2001. Sēj. 1. 6 lpp.
41. Cardarelli E., de Nardis R. Seismic refraction, isotropic anisotropic seismic tomography on an ancient monument (Antonino and Faustina temple ad 141)// Geophysical Prospecting, 2001. Sēj. 49. Nr. 2. – 228.-240.lpp.
 42. Carol I., López C.M., Roa O. Micromechanical analysis of quasi-brittle materials using fracture-based interface elements// International Journal of Numerical Methods in Engineering. – 2001. Nr.52. – 193.-215.lpp.
 43. Carpinteri A., Lacidogna G. Damage diagnostic in concrete and masonry structures by acoustic emission technique// Facta Universitatis. – 2003. Nr.13. – 755.-764.lpp.
 44. Chiarugi A., Fanelli M., Giuseppetti G. Diagnosis and Strengthening of the Brunelleschi Dome// IABSE Symposium "Structural preservation of the architectural heritage". 1993. gada marts, Itālija, Roma: - International Association for Bridge and Structural Engineering, IABSE, Zurich, 1993. – 441.-448.lpp.
 45. Chen Y., Ashour A.F., Garrity S.W. Modified four-hinge mechanism analysis for masonry arches strengthened with near-surface reinforcement// Engineering Structures. - 2007 Sēj. 29. Nr. 8. - 1864.-1871.lpp.
 46. Cusatis G., Bazant Z.P., Cedolin L. Confinement-shear lattice model for concrete damage in tension and compression// Journal of Engineering Mechanics, ASCE. – 2003. Sēj. 129. Nr. 12. – 1439.-1458.lpp.
 47. Cundall P.A. A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems// ISRM Symposium, Francija, Nancy: - Konferences rakstu krājums, Sēj. 2. 1971. – 129.-136.lpp.
 48. Deng L., Cai C.S. Applications of fiber optic sensors in civil engineering// Structural Engineering and Mechanics. – 2007. Sēj. 25. Nr. 5. – 577.-596.lpp.
 49. Dhanasekar M., Page A. W., Kleeman P. W. The failure of brick masonry under biaxial stresses// ICE Proceedings: - 1985. Sēj.79. Nr.2. – 295.-313.lpp.
 50. Di Tommaso A., Pascale G., Cianfrone F. Damage detection and repaircontrol of marble structural elements// IABSE Symposium "Structural preservation of the architectural heritage". 1993, Itālija, Roma: - Konferences rakstu krājums, 245.-252.lpp.
 51. Doebley C.E., Spitzer D.S. Guidelines and Standards for Testing Historic Mortars// Standards for Preservation and Rehabilitation, ASTM Special Technical Publication 1258, ASTM, ASV, Minesota, Ann Arbor. 1996. - 285.-293.lpp.

52. Felicetti R., Gattesco N. A Penetration test to Study the Mechanical Response of Mortar in Ancient Masonry Buildings// *Materials and Structures*, Francija, Parīze: 1998. Sēj. 31. – 350.-356.lpp.
53. Fitchen J. *The Construction of Gothic Cathedrals*. – Lielbritānija, Londona: The University of Chicago Press, Ltd., 1961. - 344 lpp.
54. Gucci N., Barsotti R. A non-destructive technique for the determination of mortar load capacity in situ// *Materials and structures*. – 1995. Nr. 28. – 276.-283.lpp.
55. Gucci N., De Falco A., Sassu M. Penetrometro PNT-G: concezione d'impiego e modalità d'uso// *ReLUIS 1st year report*. Annex 3b.3-UR13-01. – 2006.
56. Gucci N., De Falco A., Sassu M. Specifiche e scheda tecnica di prova penetrometrica con PNT-G// *ReLUIS 3rd year report*, Annex 3b.3-UR13-03. - 2008.
57. Haseltine B. International rules for masonry and their effect on the UK// *Masonry Int*. – 1987. Nr.1. – 41.-43.lpp.
58. Henze F., Wulf-Rheidt U., Bienert A., Schneider D. Photogrammetric and geodetic documentation methods at St. Petri Cathedral, Bautzen// *CIPA Symposium 2005*. gada 26. septembris – 1. oktobris, Itālija, Turīna: - Konferences rakstu krājums, 366.-371.lpp.
59. Heyman J., Coulomb C.A., *Memoir on Statics*, Imperial College Press, 1997, 211 lpp.
60. Heyman J. *The equilibrium of shell structures*. – Oxforda, Lielbritānija: Clarendon Press, 1997. – 142 lpp.
61. Heyman J. *The masonry arch*. – Lielbritānija: Ellis Horwood Limited, 1982. – 118 lpp.
62. Heyman J. *The safety of masonry arches*// *International Journal of Mechanical Sciences*, 1969. Sēj.11., Nr.4., - 363.-385.lpp.
63. Heyman J., *The science of structural engineering*. - Lielbritānija: Imperial College Press, 1999. – 108 lpp.
64. Heyman J. *The stone skeleton*. - Lielbritānija: Cambridge University Press, 1995. – 160 lpp.
65. Hilsdorf H. An investigation into the failure mechanism of brick masonry loaded in uniaxial compression. *Designing, Engineering and Construction with Masonry Products*. – ASV, Hjūstona, FH Johnson, 1969 – 34.-41.lpp..
66. Hughes T.G. Analysis and assessment of twin-span masonry arch bridges// *Institution of Civil Engineering Structures and Buildings*. – 1995. Nr. 110. – 373.-382.lpp.
67. Huerta S. *The Debate about the Structural Behaviour of Gothic Vaults: From Viollet-le-Duc to Heyman*// *Third International Congress on Construction History*, 2009. gada 20.-

24. Maijs. – Vācija, Cottbus: Chair of Construction History and Historical Preservation of the Brandenburg University of Technology, 2009. – 837.-844. lpp.
68. Ingrassia A.R., Saouma V.E. Numerical Modelling of Discrete Crack Propagation in Reinforced and Plain Concrete// Fracture Mechanics of Concrete. Structural Application and Numerical Calculation. – Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers, 1985. – 171.-225.lpp.
69. Kaļinka M. Fotogrammetrisko un lāzerskeneru grafisko datu publicēšana. Zinātniskie raksti ĢEOMĀTIKA.Sērija 11. Rīga: RTU, 2008. 3.sēj. 39.-54.lpp.
70. Kalinka M., Rutkovska E. Use the 3D laser scanning for documentation the Riga cathedral in Latvia// ISPRS Working Group v/4 Virtual reality and Computer Animation, ISPRS WG V/2 Cultural Heritage Documentation 2007. ETH Šveice, Cīrihe: - Konferences rakstu krājums – CD. 2007. – 5 lpp.
71. Kaļinka M. 2D lāzerskeneru izmantošana dokumentēšanā Rīgas Doma baznīcā un datu apkopošana datubāzēs// RTU zinātniskie raksti. 11.sēr., Ģeomātika. – 2.sēj. 2007. 95.-102.lpp.
72. Kaļinka M. Būvju deformāciju vērtību uzkrāšana un analīze // RTU zinātniskie raksti. 11. sēr., Ģeomātika. - 1. sēj. 2007, 26.-32. lpp.
73. Kaļinka M. Rīgas Doma baznīcas Deformācijas marķu novērojumi. - Rīga. RTU BF Ģeomātikas katedra. 2009. – 7 lpp.
74. Kaļinka M., Štrauhmanis J. Rīgas Tehniskās Universitātes Būvzinātnes nozares Promocijas padomē// RTU zinātniskie raksti. 11. sēr., Ģeomātika. - 5. sēj. 2009. - 93.-96. lpp.
75. Kern F. Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten// Braunšveigas Tehniskās Universitātes izdevniecība. Ģeodēzisko publikāciju sērija (Geodätische Schriftenreihe der Technischen Universität Braunschweig): - Nr. 19. 2003. 164 lpp.
76. Khoo C., Hendry A. A failure criterion for brickwork in axial compression// 3rd International Brick and Block Masonry Conference. 1973, Vācija, Esene: - Konferences rakstu krājums, 139.-145.lpp.
77. Kirtschigg K. On the failure mechanism of masonry subject of compression// 7th Int Brick and Block Masonry Conference. 1985, Austrālija, Melburna: - Konferences rakstu krājums, 625.-629.lpp.
78. Korjakins A., Bondars K. Definition the safe exploitation limits of groin vault in heritage masonry structures// International conference on civil engineering design and

- construction "Eurocodes - science and practice". 2010. gada 9.-11. septembris. - Bulgārija, Varna: - Konferences rakstu krājums, 2010. - 327.-332.lpp.
79. Kovalenko F. Gruntsūdens līmeņa monitorings Rīgas Domā un tā tuvākajā apkārtnē. Informatīvais pārskats par 2009. gada monitoringa darbiem. - Rīga. SIA "Balt-Ost-Geo". 2009. – 52 lpp.
 80. Kovalenko F. Mikrobioloģiskās un bakteriālās darbības intensitātes gruntsūdens vidē Rīgas Doma pamatu zonā. - Rīga. SIA "Balt-Ost-Geo". 2006. – 64 lpp.
 81. Kovalenko F., Rīgas Doma baznīcas priekšaltāra telpas un priekšējo balsta kolonnu (S-3 un S-4) radoradarā zondēšana; Būvpatnes ģeotehniskā izpēte. - Rīga. SIA "Balt-Ost-Geo". 2004. – 39 lpp.
 82. Latvijas būvnormatīvs, LBN 003 – 01, 2001. "Būvklimatoloģija", MK 23.08.2001. not. Nr. 376.
 83. Latvijas būvnormatīvs, LBN 205 – 97 Mūra un stiegrota mūra konstrukciju projektēšanas normas. – Rīga, SIA „Celtne S”, 1998. - 69 lpp.
 84. Latvijas Valsts standarts, LVS EN 1052-1:2000 Mūra testa metodes - 1.daļa: Spiedes stiprības noteikšana, LVS 2000.
 85. Latvijas Valsts standarts. LVS EN 1991-1-7: Iedarbes uz konstrukcijām, 1-7 daļa, Pamatslodzes: Negadījuma slodzes.
 86. Lenczner, D. 1986. Creep and prestress losses in brick masonry. *The Structural Engineer*, **64**(15): 57–62
 87. Lemos J.V. Modelling the behaviour of a stone masonry arch structure under cyclic loads// 5th International Symposium on Computer Methods in Structural Masonry. Itālija, Roma: - Konferences rakstu krājums, 2001. – 101.-108.lpp.
 88. Livesley R. K. Limit analysis of structures formed from rigid blocks// *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. – 1978. Nr. 12. 1853.-1871.lpp.
 89. Lofti H., Shing, P. Interface model applied to fracture of masonry structures// *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE.- 1994. Sēj. 120. Nr.1. – 63.–80.lpp.
 90. Lorig L.J., Cundall P.A. Modelling of reinforced concrete element method// SEM/RILEM International Conference on Fracture of Concrete and Rock. – 1987, ASV, Hjūstona: - Konferences rakstu krājums, 459.-471.lpp.
 91. Lourenco P. B. Computational Strategies for Masonry Structures// PhD thesis. – Nīderlande: Delft University of Technology, 1996. – 220 lpp.

92. Lourenco P.B., de Borst, R., Rots, J.G. A plane stress softening plasticity model for orthotropic materials// International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 1997. Nr. 40. – 4033.-4057.lpp.
93. Lourenco P.B., Rots, J.G. A multi-surface interface model for the analysis of masonry structures// Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1997, Sēj. 123. Nr. 7. – 660.-668. lpp.
94. Lourenco P.B., Mendes N., Marques R. Earthquake Design and Assessment of Masonry Structures: Review and Applications// Trends in Civil and Structural Engineering Computing. – 2009, Lielbritānija, Stirlingšīre: Saxe-Coburg Publications, 2009. Nod. 4. – 77.-101.lpp.
95. Mann W., Betzler M. Investigations on the effect of different forms of test samples to test the compressive strength of masonry// 10th International Brick and Block Masonry Conference. - 1994, Kanāda, Kalgari: - Konferences rakstu krājums – 1305.-1313.lpp.
96. Macchi G. Monitoring and diagnosis of monumental structures// COMETT course: Monitoraggio e Indagini Non Distruttive di Strutture Monumentali. - Pavia. 1992.
97. Macchi G. Monitoring medieval structures in Pavia// Structural engineering International. – 1993. Sēj. 3. Nr. 1, Vol. 3. – 6.-9.lpp.
98. Macchi G. Tower of Pisa: diagnostics and structural intervention// 5th International Congress of Restoration of Architectural Heritage. - 2000. gada 17.-24. septembris, Itālija, Roma: - Konferences rakstu krājums – 401.-408.lpp.
99. Macchi G. Diagnosis of the facade of St. Peter's Basilica in Rome// III Int. Seminar: Historical Constructions 2001 – Possibilities of Numerical and Experimental Techniques. – 2001. gada 7.-9. novembris, Portugāle, Guimaraes: - Konferences rakstu krājums – 309.-318.lpp.
100. Mazzotti C., Savoia M. Nonlinear creep, Poisson's ratio, and creep-damage interaction of concrete in compression// ACI Materials Journal. – 2002. Sēj. 99. Nr. 5. – 450.-457.lpp.
101. Meirovics S., Celmiņš V., Buks I., Markvarts V. Rīgas Doma baznīca. Būves pamatojuma tehniskā izpēte. - // Rīga. SIA „LBS Konsultants”. 2005. – 147 lpp.
102. Meirovics S., Šveics A. Rīgas Doma baznīca. Sienu, ailu, plaisu izpēte un monitorings. - Rīga. RTU Nesagraujošo testēšanas metožu laboratorija, 2005. – 131 lpp.
103. Michael S. Nondestructive testing and damage assessment of masonry structures// Progress in Structural Engineering and Materials. 2003. Sēj. 5. Nr. 4. – 239.-251. lpp.

104. Modena C., Fianchetti P. Zonta D., Menga R., Pizzigalli E., Ravasio F., Muti M., Meloni R., Bordone G. Static and Dynamic Analysis of "Maniace Castle" in Siracusa-Sicily// III Int. Seminar: Historical Constructions 2001 – Possibilities of Numerical and Experimental Techniques. – 2001. gada 7.-9. novembris, Portugāle, Guimaraes: - Konferences rakstu krājums – 933.-942.lpp.
105. Page A.W. The biaxial compressive strength of brick masonry// ICE proceedings. – 1981. Sēj. 2. Nr. 71. – 893.-906.lpp.
106. Page A. W. The strength of brick masonry under biaxial tension-compression// International Journal of Masonry Constructions. – 1983. Nr .3. – 26.-31.lpp.
107. Papayianni I., Stefanidou M. Characteristics of bricks of Byzantine period// 12th International Brick/Block Masonry Conference. - 2000. gads, Spānija, Madride: - Konferences rakstu krājums - 1729.-1736.lpp.
108. Pelīte U., Lešinskis A. Vēsturisko publisko ēku mikroklimata nodrošināšanas sistēmu optimizācija// RTU 46.Starptautiskā zinātniskā konference, 2005. gada 13.-15. oktobris. Rakstu krājums - RTU Zinātniskie raksti, sērija 2, sējums 6 - Arhitektūra un būvzinātne. Rīga. 2005. - 194.-202.lpp.
109. Rībenis A., Galviņš J. Dzintarnieks M., Doma baznīca. Mūrjavu ķīmiskā izpēte. - Rīga. V/U „Restaurācijas institūts”, 1990. - 12 lpp.
110. Ronca P. The Significance of the Gauging System in the Flat-jack In Situ Test// The Masonry Society Journal. – 1996. Sēj. 14. Nr.1. – 79.-86.lpp.
111. Ronca P., Tiraboschi C., Binda L. In situ flat-jack tests matching new mechanical interpretations// 11th International Brick/Block Masonry Conference. – 1997. gads. Ķīna, Šanhaja: - Konferences rakstu krājums, Sēj. 1. 357.-366.lpp.
112. Roman H., Gomes I. Numerical modelling of blockwork prisms tested in compression using the finite element method with interface behaviour// 13th International Brick and Block Masonry Conference. 2004. gads, Nīderlande, Amsterdama: - Konferences rakstu krājums, Sēj. 2. – 421.-429. lpp.
113. Rossi P.P. Analysis of mechanical characteristics of brick masonry tested by means of in situ tests// 6th IBMaC. – 1982. gads, Itālija, Roma: - Konferences rakstu krājums.
114. Rossi P.P. Flat-jack Test for the Analysis of Mechanical Behaviour of Brick Masonry Structures// 7th International Brick Masonry Conference. – 1985. gads, Austrālija, Melburna: - Konferences rakstu krājums. Sēj. 1.
115. Rossi P.P. Recent Developments of the Flat jack Test of Masonry Structures// 2nd Joint USA-Italy Workshop of Evaluation and Retrofit of Masonry Structures. – 1987. gads

116. Rossi P.P. Possibilities of the Experimental Techniques for the Structural Analysis of Historical Costructions// CIMNE. – 1997. gads, Spānija, Barselona: - Konferences rakstu krājums. – 24.-46.lpp.
117. Rots J.G. Numerical simulation of cracking in structural masonry// Heron, Sēj. 36., Nr. 2., 1991. - 49-63.lpp.
118. Russo S., Boscato G., Massaria L. Nondestruktive test for structural rehabilitation. The case of Devi's and S. Donato's masonry bridges in Venice// 16th WCNDT 2004 - World Conference on NDT, 2004. gada 30. augusts – 3. septembris, Kanāda, Monreāla: - Konferences rakstu krājums – CD, 6 lpp.
119. Saisi A., Binda L., Zanzi L. Diagnostic investigation of the stone pillars of S. Nicolò l'Arena, Catania// 9th Canadian Masonry Symposium "Spanning the Centuries with Masonry", 2001. gada 4.-6. jūnijs, Kanāda, Fredriktona: - Konferences rakstu krājums – CD
120. Schlangen E. Experimental and numerical analysis of fracture processes in concrete// PhD thesis. – Nīderlande: Delft University of Technology, 1993.
121. Toumbakari E.E. Lime-pozzolan-cement grouts and their structural effects on composite masonry walls// PhD thesis. – Beļģija: Leuven Catholic University, 2002.
122. Trevits J. Rīgas Doma pamatu un pamatnes inženiertehniskā izpēte. - Rīga. SIA „LBS Konsultants”. 2007. – 70 lpp.
123. Valle S., Zanzi L. Resolution in Radar Tomography for Wall or Pillar Inspection// 6th International Conference On Ground Penetrating Radar. – 1996. gads 30. septembris – 3. oktobris, Japāna, Sendai: - Konferences rakstu krājums – CD
124. Valle S., Zanzi L., Lenzi G., Bettolo G. Structure Inspection with Radar Tomography// International Coll. on Inspection and Monitoring of the Cultural Heritage, IABSE-ISMES. – 1997. gada 15.-16. maijs, Itālija, Seriat: - Konferences rakstu krājums – 223.-230.lpp.
125. Valle S., Zanzi L. Traveltime radar tomography for NDT on masonry and concrete structures// European Journal of Environmental and Engineering Geophysics. – 1998, Sēj. 2. N. 3. – 229.-246.lpp.
126. Valle S., Zanzi L., Binda L., Saisi A., Lenzi, G. Tomography for NDT applied to masonry structures: sonic and/or EM methods// 2nd International Arch Bridge Conference. – 1998. gada 6.-8. oktobris, Itālija, Venēcija - Konferences rakstu krājums – 243.-254.lpp.

127. Valle S., Zanzi L., Rocca F. Radar tomography for NDT: comparison of techniques// Journal of Applied Geophysics. – 1999. Nr. 41. – 259.-269.lpp.
128. Valluzzi M.R., Da Porto F., Modena C. Behaviour and modelling of strengthened three-leaf stone masonry walls// Materials and Structures, RILEM. – 2004. Nr. 37 – 184.-192.lpp.
129. Van Mier J.G.M., Schlangen E., Vervuurt A. Lattice type fracture models for concrete// Continuum models for materials with microstructure. – ASV, Ņujorka: John Wiley & Sons, 1995. – 341.-377.lpp.
130. Van Vliet M., Size Effect in Tensile Fracture of Concrete and Rock// PhD thesis. – Nīderlande: Delft University of Technology, 2000.
131. Van Zijl G.P. Computational modelling of masonry creep and shrinkage// PhD thesis. – Nīderlande: Delft University of Technology, 2000.
132. Vitruvius: Ten Books on Architecture. Ingrid D. Rowland (Editor), Thomas Noble Howe (Editor). – Lielbritānija: Cambridge University Press, 2001. – 342 lpp.
133. de Vekey R.C., Sassu M. Comparison on Non-destructive In-situ Mechanical Tests on Masonry Mortars: The PNT-G Method and the Helix Method// 11th International Brick/Block Masonry Conference. Tongji University. Ķīna, Šanhaja: - Konferences rakstu krājums, Sēj. 1. 1997. – 376.-384. lpp.
134. Ventura P., Sorrentino L. A new in situ torsional test to assess masonry mortar shear strength// Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica IX Jornadas, 2005. gada 16.-19. novembris. Čīle, Concepción: - Konferences rakstu krājums – CD, 2005.
135. Vermeltoort AT. Brick-mortar interaction in masonry under pressure// PhD thesis, Eindhoven University of Technology, The Netherlands, 2005. <http://alexandria.tue.nl/extra2/200510997.pdf> (piekļuve 2011. gada 10. janvārī)
136. Vonk R.A., A micromechanical investigation of softening of concrete loaded in compression// Heron, Sēj. 38., Nr.3., 1993. – 1.-94. lpp.
137. Zanzi L., Cardarelli E., Lualdi M. Velocity and absorption analysis from tomographic sonic experiments on ancient stone piers// 63rd Meeting of European Association of Geoscientists and Engineers. – 2001. gada 11.-15. jūnijs, Nīderlande, Amsterdamā: - Konferences rakstu krājums.
138. Zanzi L., Lualdi M., Binda L. Acquisition and processing requirements for high quality 3D reconstructions from GPR investigations// International Symposium Non Destructive Testing in Civil Engineering NDT-CE 2003. – 2003. gada 16.-19. septembris, Vācija, Berlīne, : - Konferences rakstu krājums – CD, -13 lpp.

139. Zanzi L., Saisi A., Binda L., Cardarelli E. Sonic tomography and flat jack experiments on the stone piers of the temple of S.Nicolo' L'Arena (Italy)// International Conference on Structural Faults and Repair. – 2001. gada 4.-6. jūlijs, Lielbritānija, Londona: - Konferences rakstu krājums – CD, -13 lpp.
140. Zanzi L., Lualdi M. Attenuation tomography on historical buildings through spectral analysis of sonic and radar data// Proceedings SAGEEP. – 2002. gada 10.-14. februāris, ASV, Lasvegasā: - Konferences rakstu krājums - CD, - 10 lpp.
141. Xue Z., Karpjoo J., Lim Sang Boem L.S., MTRMS: A TMO-based Multi-Target Real-Time Monitoring System // ICCIT '07 Proceedings of the 2007 International Conference on Convergence Information Technology. 21-23 Nov. Gyeongju 2007. 1687 – 1693.lpp.
142. *Leica CloudWorx programnodrošinājuma apraksts / Internets.* - http://hds.leica-geosystems.com/en/Leica-CloudWorx_60696.htm (piekļuve 2011. gada 10. janvārī)
143. *Leica Cyclone programnodrošinājuma apraksts / Internets.* - (145http://hds.leica-geosystems.com/en/Leica-Cyclone_6515.htm piekļuve 2011. gada 10. janvārī)
144. *Page (Recto 92) from volume II of The Forster Codex. Italy, 15th-16th century.* <http://www.vandaimages.com/>, Leonardo da Vinci (1452-1519) / Internets. - (piekļuve 2009. gada 13. jūnijs)
145. *Ring 2.0 ekrāna attēls / Internets.* – <http://www.masonryarch.com/media/screenshots> (piekļuve 2011. gada 10. janvārī)
146. *Rīgas pilsētas teritorijas grunts virsmas deformāciju ātruma mērījumi* <http://www.terrafirma.eu.com/index.htm>) / Internets. - (piekļuve 2009. gada 13. jūnijs)
147. *SOFO Bee principiālā shēma / Internets.* - <http://www.iic-hq.co.jp/english/03sp/01ii/02is/KK-03.html> (piekļuve 2011. gada 10. janvārī)
148. *Staad Pro 2006 Technical Reference manual / Internets.* - <http://www.scribd.com/doc/36446644/Staad-1-Pro-2006-Technical-Reference-Halid> (piekļuve 2011. gada 10. janvārī)
149. *Structural analysis of masonry vaults, attēli / Internets.* - <http://www.docstoc.com/docs/34330175/Structural-Analysis-of-Masonry-Vaults> (piekļuve 2011. gada 10. janvārī)
150. *UNESCO Pasaules kultūras mantojuma reģistrs / Internets.* - <http://whc.unesco.org/en/list/> (piekļuve 2011. gada 10. janvārī)
151. *Valsts Kultūras Pieminekļu arhīva reģistrs / Internets.* - <http://www.mantojums.lv/?cat=742&lang=lv> (piekļuve 2011. gada 10. janvārī)

152. СНиП 2.01.07 - 85*, 1985. “НАГРУЗКИ И ВОЗДЕЙСТВИЯ”, Госстрой СССР от 29 августа 1985 г. № 135.
153. Исследование деформаций, расчет несущей способности и конструктивное укрепление древних распорных систем. Методические рекомендации. – Москва: Объединение «Союзреставрация», 1989. – 91 лрр.