

Pēteris Druķis

EKSPLUATĀCIJĀ ESOŠU ĒKU DROŠUMA VĒRTĒŠANAS METODOLOĢIJA

Promocijas darbs



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Būvniecības inženierzinātņu fakultāte
Būvniecības un rekonstrukcijas institūts

Pēteris Druķis

Doktora studiju programmas “Būvzinātne” doktorants

**EKSPLUATĀCIJĀ ESOŠU ĒKU
DROŠUMA VĒRTĒŠANAS METODOLOĢIJA**

Promocijas darbs

Zinātniskā vadītāja
Asociētā profesore *Dr. sc. ing.*,
LĪGA GAILE

Rīga 2022

ANOTĀCIJA

Būvzinātnē jau vairākus gadsimtus tiek veikti dažādi pētījumi par būvkonstrukciju spēju izturēt tām paredzētās slodzes noteiktā laika periodā un kopš XX gadsimta šādi pētījumi galvenokārt tiek veikti, izmantojot drošuma teoriju. Kopš pagājušā gadsimta 90tajiem gadiem šīs teorijas principi par atsevišķu būvkonstrukciju drošumu ir noteiktas arī būvkonstrukciju projektēšanas normatīvos, un konkrēti drošuma raksturotāji atkarībā no paredzētās konstrukcijas lietošanas apstākļiem tiek noteikti kā obligāti noteiktām konstrukcijām.

Savukārt praksē, vērtējot esošo būvju konstrukciju drošumu, speciālisti pamatā savus secinājumus par konstrukciju drošumu joprojām balsta uz atsevišķo elementu tehnisko nolietojumu, un ekstrapolējot ar dažādām metodēm šo elementu nolietojumu, izdara secinājumus gan par konkrētā elementa spēju pildīt savas funkcijas, gan arī visas konstruktīvās sistēmas funkcionētspēju jeb drošumu.

Jāatzīst, ka lielākajā daļā gadījumu vērtētajam nav zināma konkrētā elementa ietekme uz konstrukcijas spēju pildīt savas funkcijas, tādējādi jebkāds šāds vērtējums par atsevišķo elementu drošumu pēc nolietojuma līmeņa var būt maldinošs kopējās konstrukcijas sistēmas drošuma kopsakarībā.

Promocijas darba izstrādes rezultātā ir radīta metodoloģija, ar kuras palīdzību ir iespējams novērtēt ekspluatācijā esošu ēku drošuma līmeni. Ēkas kopējais drošuma līmenis tiek raksturots ar “Globālo drošuma indeksu”, un tas ļauj kvantificēt un salīdzināt dažādu ēku drošuma līmeņus, un atkarībā no ēkas lietošanas veida, noteikt zemāko pieļaujamo drošuma līmeni. Metodoloģijas definēšanas ietvaros izstrādātas vairākas jaunas metodes (ēku kvantitatīvā riska klasificēšanas metode; metode atsevišķu ekspluatācijā esošu konstrukciju drošuma līmeņa noteikšanai, kas projektētas balstoties uz dažādām normatīvajām bāzēm). Promocijas darba ietvaros ir veikts arī apjomīgs pētījums par esošo publisko ēku stāvokli Latvijā, kā arī analizēta esošo būvju vērtēšanas prakse Eiropā.

Metodoloģijas pielietojuma rezultāti verificēti ar skaitliskajiem eksperimentiem, izmantojot pirmā un otrā tuvinājuma drošuma metodes (FORM un SORM) pie dažādiem konstrukciju bojājumu scenārijiem, kā arī veikts metodoloģijas praktiskais pielietojums reālam objektam publiskai ēkai Valmierā.

Promocijas darbs sastāv no kopsavilkuma, ievada, septiņām nodaļām, kas sadalītas apakšnodaļās, secinājumiem un literatūras saraksta. Pirmajā nodaļā sniegts darbs vispārējs raksturojums, otrajā nodaļā atspoguļots publikāciju apskats par šo tēmu, 3., 4. un 5. nodaļā ir izklāstīts pētījumu izpildes un mērķa sasniegšanas process, 6.nodaļā ieteikumi par šīs metodoloģijas praktisko ieviešanu un 7. nodaļā sniegti secinājumi un ieteikumi turpmākajam darbam.

Darbs satur 135 lappuses, 59 attēlus, 50 tabulas un literatūras sarakstu ar 83 nosaukumiem. Promocijas darbs sarakstīts latviešu valodā.

ANOTATION

In construction science, various studies have been carried out for several centuries on the ability of building structures to bear the loads assigned to them for a certain period of time, and since the 20th century, such research has been carried out mainly using reliability theory. Since the 1990s, the principles of this theory regarding the reliability of individual building structures have also been defined in structural design standards, and specific reliability characteristics, depending on the conditions of use of the intended structure, are defined as mandatory for certain structures.

In practice, when assessing the structural reliability of existing structures, specialists still base their conclusions on structural reliability on the technical depreciation of individual elements, and extrapolating the depreciation of these elements with different methods, draw conclusions about both the ability of a particular element to perform its functions and the whole structural system functionality or reliability.

It must be acknowledged that in most cases the assessor is not aware of the impact of a particular element on the ability of a structure to perform its functions, so any such assessment of the reliability of individual elements at the level of depreciation can be misleading in relation to overall structural reliability.

As a result of the development of the dissertation, a methodology has been created with the help of which it is possible to assess the level of reliability of existing buildings. The overall reliability level of a building is described by the "Global Reliability Index", which makes it possible to quantify and compare the reliability levels of different buildings and, depending on the type of use of the building, to determine the lowest permissible reliability level. Within the framework of defining the methodology, several new methods have been developed (quantitative risk classification method for buildings; method for determining the reliability level of individual structures in operation, designed on the basis of various regulatory bases). Within the framework of the dissertation, an extensive study has been carried out on the condition of existing public buildings in Latvia, as well as the practice of evaluating existing buildings in Europe has been analyzed.

The results of the application of the methodology were verified by numerical experiments using the first and second approximation reliability methods (FORM and SORM) for different structural damage scenarios, as well as the practical application of the methodology to a real object for a public building in Valmiera.

The dissertation consists of a summary, introduction, seven chapters divided into subsections, conclusions and list of bibliography. The first chapter provides a general description of the work, the second chapter reviews the literature on the topic, Chapters 3, 4 and 5 describe the process of research implementation and achievement of the goal, Chapter 6 recommendations for practical implementation of this methodology and Chapter 7 provides conclusions and recommendations for further work.

The work contains 135 pages, 59 figures, 50 tables and a bibliography with 83 titles. The dissertation is written in Latvian.

SATURS

Anotācija	2
Anotation	3
SATURS.....	4
1. DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS.....	7
Tēmas aktualitāte un pētījuma problēmas nostādne.....	7
Promocijas darba mērķis	11
Promocijas darba uzdevumi	11
Promocijas darba zinātniskā novitāte	12
Promocijas darba praktiskais lietojums.....	12
Pētījuma rezultāti.....	13
Pētījuma ierobežojumi.....	13
Pētījuma teorētiskais un metodoloģiskais pamats	14
Rezultātu aprobācija starptautiskās konferencēs	14
Promocijas darba autora zinātniskās publikācijas	15
2. LITERATŪRAS APSKATS.....	16
2.1. Vispārīgi par drošumu	16
2.2. Konstrukciju drošuma teorija	17
2.2.1. Drošuma koncepts un robežstāvokļi	17
2.2.2. Drošuma nestspējas robežstāvoklis. Fundamentālais princips.....	20
2.2.3. Drošuma mainīgie lielumi	26
2.3. Konstrukcijas drošuma raksturotājs β	30
2.4. Konstrukciju sistēmas drošums	35
2.4.1. Konstrukciju sistēma	35
2.4.2. Slodžu modelēšana	36
2.4.3. Materiālu modelēšana	37
2.4.4. Konstrukcijas sistēmas modelēšana	38
2.5. Akceptējamais risks.....	45
2.6. Ēku drošuma novērtēšana.....	48
2.6.1. Drošuma vērtēšanas teorija	48
2.6.2. Drošuma vērtēšanas metodes	52

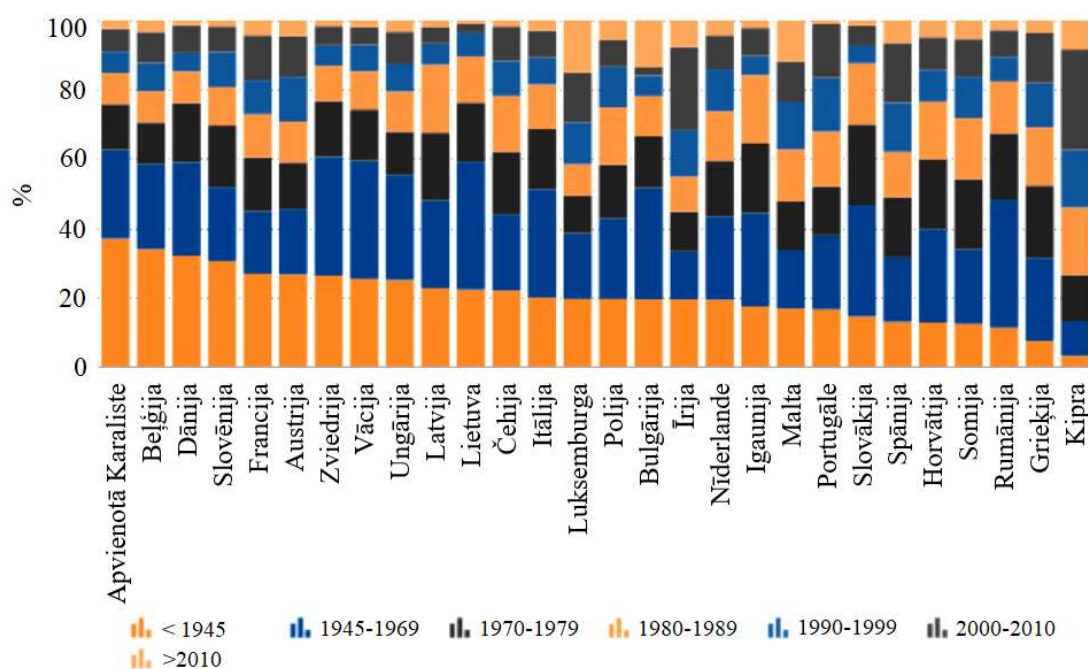
2.7. Tiltu konstrukciju vērtēšana	56
2.8. Nodaļas secinājumi	59
3. PĒTĪJUMA TEORĒTISKAIS PAMATOJUMS	60
3.1. Eksploatācijā esošo ēku kvalitatīvā novērtējuma analīze.....	60
3.1.1. Kvalitatīvās vērtēšanas metode	60
3.1.2. Publisko ēku risku vērtēšanas rezultāti	62
3.2. Esošo būvju vērtēšanas prakse Eiropā	71
3.3. Uz dažādu normatīvo bāzu projektēto konstrukciju drošuma līmeņa noteikšana ...	73
3.3.1. Metodes teorētiskais pamatojums	73
3.3.2. Drošuma indeksa β noteikšanas praktiskais pielietojums (case study). Tērauda kopne un sija.....	77
3.3.3. Drošuma indeksa β noteikšanas praktiskais pielietojums (case study). Dzelzsbetona paneļi.....	81
3.4. Nodaļas secinājumi	84
4. EKSPLOATĀCIJĀ ESOŠU ĒKU KOPĒJĀ DROŠUMA LĪMEŅA NOTEIKŠANAS METODOLOĢIJA.....	86
4.1. Vispārīgi	86
4.2. Ēkas tehniskā apsekošana.....	89
4.3. Ēkas konstrukciju tehniskā izpēte	90
4.4. Kopējais ēkas konstrukcijas drošuma līmeņa izmaiņu novērtējums	91
4.4.1. Ēkas kopējā drošuma līmeņa noteikšana.....	91
4.4.2. Nosacītā tilpuma metode ietekmes koeficienta W noteikšanai	93
4.4.3. Skaitliskais eksperiments un rezultātu analīze	100
4.5. Nodaļas secinājumi	102
5. ĒKAS DROŠUMA VĒRTĒŠANAS METODOLOĢIJAS PRAKTISKAIS PIELIETOJUMS (CASE STUDY).....	103
5.1. Eksploatācijā esošās ēkas drošuma līmeņa noteikšana	103
5.1.1. Objekta raksturojums	103
5.1.2. Ēkas tehniskā apsekošana.....	104
5.1.3. Konstrukciju tehniskā izpēte	107
5.1.4. Ēkas drošuma līmeņa noteikšana	110
5.2. Ēkas drošuma rezultātu kalibrēšana ar matemātisko simulāciju	120
5.2.1. Konstrukcijas sistēmas definēšana un robežstāvokļi	120

5.2.2. Pirmās kārtas tuvinājums	122
5.2.3. Otrās kārtas tuvinājums	123
5.2.4. Rezultātu verifikācija	124
5.3. Nodaļas secinājumi	125
6. IETEIKUMI METODOLOĢIJAS PRAKTISKAI IEVIEŠANAI	126
6.1. Publisko ēku tehniskā apsekošana.....	126
6.2. Vienotā platforma par tehniskās apsekošanas datiem	127
7. SECINĀJUMI	128
IZMANTOTĀ LITERATŪRA	130

1. DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte un pētījuma problēmas nostādne

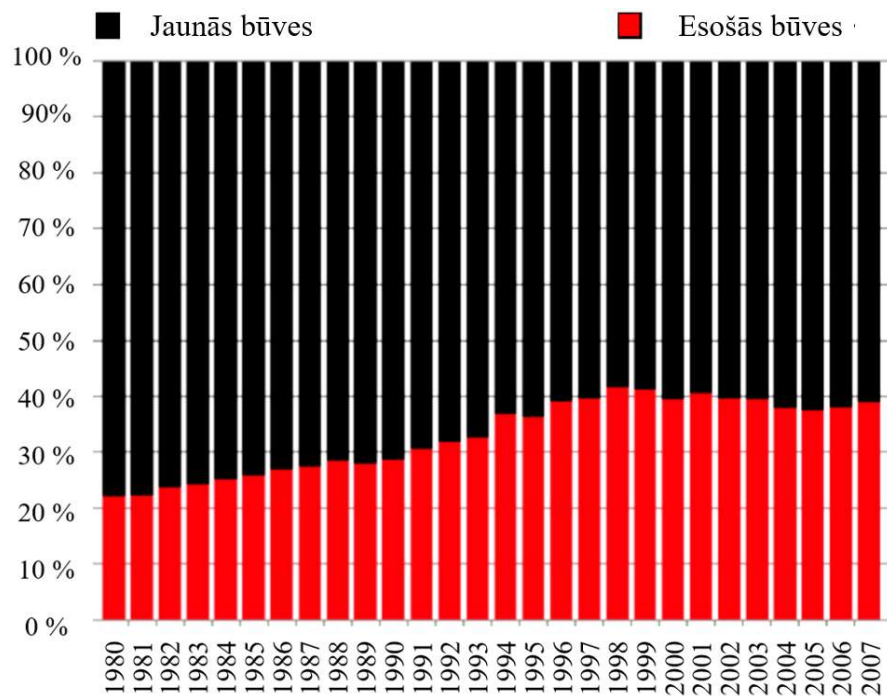
Saskaņā ar Eiropas Komisijas 2016. gada ziņojumam par ēku energoefektivitātes problemātiku [1], 2010. gadā Eiropā > 30% ēku bija vecākas par 50 gadiem (1.1. att.). Šodien šis īpatsvars ir vēl lielāks. Atbilstoši normatīviem, saskaņā ar kurām šīs ēkas tika projektētas, to lietošanas resurss ir iztecējis. Pastāv dažādi viedokļi, vai to ekspluatācija būtu jāpārtrauc, jo tās rada apdraudējumu sabiedrībai un videi, vai arī ir būtu pieļaujama šo ēku tālāka izmantošana. Šajā ziņojumā ir arī dati par to, ka 70 % ēku, kurās sabiedrība uzturēsies 2050. gadā, ir uzceltas un tiek lietotas jau pirms 2010. gada.



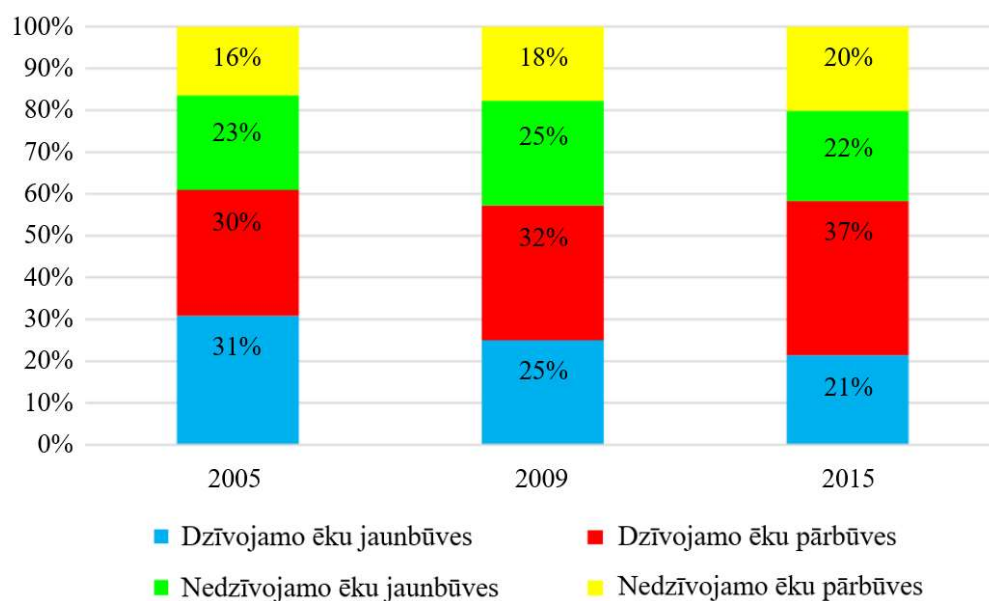
1.1. att. Dzīvojamo ēku sadalījums pēc to izbūves gadiem.

Ir pieejami arī dati [2] par laiku posmu no 1980.gada līdz 2007.gadam attiecībā uz projektēšanas un būvniecības darbu apjomu saistībā ar jaunām un lietošanā esošām konstrukcijām. Arī šie dati uzrāda nemainīgu esošo konstrukciju īpatsvara pieaugumu (skat. 1.2. att.).

Savukārt saskaņā ar pētījumu attiecībā uz klimata pārmaiņām ēku būvniecības nozarē, dati liecina, ka sākot ar 2010. gadu Eiropā vairāk tiek veikti esošu būvju pārbūves darbi nekā jaunbūvju celtniecība, kas uzskatāmi redzams attēlā 1.3. [3]. Ja vēl 2005. gadā pārbūves sastādīja ir 46 % no kopējā būvniecības apjoma, tad jau 2009. gadā šis apjoms ir audzis līdz 50 %, bet 2015. gadā ir palielinājies līdz 57 %. Var secināt, ka jaunbūvju apjomam Eiropas Savienībā ir tendence samazināties, bet pārbūvju apjomam palielināties.



1.2. att. Būvinženieru darba sadalījums ar konstrukcijām.



1.3. att. Pārbūvju un jaunbūvju sadalījums.

Tādējādi var secināt, ka nākotnes inženieriem būs jāstrādā nevis tikai ar jaunu ēku izbūvi, bet arī ar esošo ēku uzturēšanu. Saistībā ar to ir aktuāli vairāki jautājumi:

1. Kāds ir ekspluatācijā esošo ēku drošuma līmenis.

Saskaņā ar esošo nozares praksi ekspluatācijā esošas ēkas, ja tās tiek pareizi ekspluatētas, tiek uzskatītas par drošām cilvēkiem un videi. Tomēr sakarā ar tehnoloģisko progresu, kā arī ar normatīvo aktu izmaiņām, kas zināmā mērā ir saistīts arī ar dažādu valstu integrāciju vienotā

ģeopolitiskā telpā, gan īpašnieku, gan apkalpojošo personu uzdevumi ēku lietošanā kļūst arvien sarežģītāki.

Ekspluatācijā esošās ēkas ir projektētas atbilstoši tā laika drošuma līmenim, kad tās tika būvētas, savukārt šodienas prasībām atbilstošais un sagaidāmais drošuma līmenis ir augstāks. Tam klāt ir nākušas arī jaunas prasības (energoefektivitāte, ilgtspēja un vides resursu taupīšana, sociālās prasības), kuru nodrošināšana ēkas īpašniekiem prasa papildus resursus. Tādēļ ēku konstrukciju drošumam šodienas apstākļos tiek pievērsta īpaša uzmanība. Īpaši tas attiecas uz sabiedriski nozīmīgām jeb publiskām ēkām atbilstoši normatīvu prasībām [4].

Dažādām ēkām, atkarībā no to būvniecības laikmeta piemēram, Latvijā, drošuma līmenis ir atšķirīgs. Ņemot vērā, ka ēkas lietotāji galvenokārt rēķinās ar vienādu drošuma līmeni, var rasties situācijas, kas rada nelaimes gadījumus tikai tādēļ, ka ēka nenodrošina to drošuma līmeni, ko tās lietotājs sagaida. Lai arī lielākā daļa Latvijas ēku ir būvētas pirms vairāk nekā 30 gadiem, kad spēkā bija tā laika padomju būvnormatīvi vai pat vēl agrāk [1], ir arī ēkas, kas ir izbūvētas laika posmā no 1990. līdz 2010. gadam saskaņā ar nacionālajiem būvnormatīviem, kā arī ēkas, kas tapušas pēdējo gadu laikā, kad Latvijā jau ir spēkā Eiropas Savienības būvnormatīvi un standarti, t. sk. Eirokodeksi.

Tāpat, neskatoties uz normatīvo regulējumu, ka ēkas īpašniekam jāuztur sava ēka drošā stāvoklī, praksē īpašnieki to ne vienmēr spēj nodrošināt. Un tam ir arī savi objektīvie iemesli. Eiropas Savienība ar speciālu regulējumu [5] par saskaņotu būvizstrādājumu tirdzniecības nosacījumiem, tās 1. pielikumā, kas saucas "Pamatprasības" (*Basic requirements*), ir noteikusi septiņas pamatprasības, kuras ir saistošas visām Eiropas Savienībā būvētajām un lietotajām būvēm, neatkarīgi no to izbūvēšanas laika, īpašnieka, novietojuma vai veida. Šīs Regulas pielikuma preambula ir:

"Būvēm kopumā un to atsevišķām daļām ir jāatbilst to paredzētajiem mērķiem, jo īpaši ņemot vērā visā būves ekspluatācijas ciklā iesaistīto personu veselības aizsardzību un drošību. Normālos ekspluatācijas apstākļos visā ekonomiski pamatotā ekspluatācijas laikā būvēm ir jāatbilst šīm pamatprasībām."

Šīs pamatprasības nebija spēkā, kad šīs ēkas tika būvētas, tomēr tas neatbrīvo ēkas īpašnieku no pienākuma nodrošināt savas ēkas atbilstību šīm prasībām. Īpaši tas attiecas uz ēkām, kurās uzturas sabiedrība, jeb Publiskās būves [6]. Tas prasa ievērojamus resursus un kompetenci, bet ēkas īpašnieki to ne vienmēr ir spējīgi nodrošināt.

2. Ko darīt ar ēkām, kurā konstrukciju projektētais lietošanas laiks ir beidzies.

Šis jautājums sabiedrībā ir kļuvis aktuāls pēdējās divās dekādēs. Meklējot atbildi uz šo jautājumu, rodas nākamie - vai šādas ēkas būtu jānojauc; vai to konstrukcijas būtu jāmaina; ja nē, kurš uzņemsies atbildību par to drošību turpmākajā kalpošanas laikā; kādam būtu jābūt ēkas drošuma līmenim pēc tās renovācijas (atjaunošanas) vai pārbūves; uz kādu termiņu būtu pagarināms ēkas lietošanas resurss un kurš par to atbild?

Līdzšinējais normatīvais būvju regulējums galvenokārt attiecas uz jaunu konstrukciju projektēšanu un būvniecību, tajos nav iestrādātas ekspluatācijas prasības esošu konstrukciju novērtējumam un drošumam. Konstrukciju normatīvi ir izstrādāti ar pieņēmumu, ka konstrukcijas kalpos noteiktu termiņu, taču tajos nav noteiktas prasības, kā rīkoties ar konstrukcijām pēc šī termiņa beigām. Vai konstrukcijas, kurām ir beidzies termiņš, kādam tās ir projektētas, būtu uzskatāmas par nedrošām un to lietošana būtu jāpārtrauc. Ja nē, tad kāds ir to turpmākais lietošanas termiņš. Īpaši aktuāli šis jautājums ir gadījumos, kad tiek veikta daļēja ēkas pārbūve vai atjaunošana, un tiek apvienotas jaunās konstrukcijas ar jau esošajām konstrukcijām. Rodas jautājumi vai jauno konstrukciju projektētājs, vai būvnieks uzņemas atbildību arī par vecajām konstrukcijām; vai jauno konstrukciju prognozētais lietošanas laiks būtu attiecināms arī uz esošajām konstrukcijām?

3. Vai un kā novērtēt esošo konstrukciju drošuma līmeni.

Starp projektēšanu un novērtēšanu ir būtiskas atšķirības. Projekta nenoteiktības rodas no jauno konstrukciju paredzētajiem slodžu un pretestības raksturotājiem. Šīs nenoteiktības reprezentē izkliedi visdažādāko konstrukciju raksturotājiem dēļ tajos izmantoto materiālu kvalitātes nevienādīguma, atšķirīgajām būvniecības tehnoloģijām un specifisko slodžu sadalījumu konkrētajā objektā. Konservatīvs projekts neradīs ievērojamu konstrukciju sadārdzināšanos, turpretī konservatīvs novērtējums var izsaukt nevajadzīgus un dārgus remontus vai pārbūves vai arī nonākt otrā galējībā – neatklāt būtiskus trūkumus ēkas lietošanā, kas var izraisīt traģiskas sekas.

Šie augstākminētie trīs jautājumi ir aktuāli šodienas būvinženieru un būvniecības nozares profesionāļu, tostarp arī būvzinātnes pārstāvju, vidū. Eiropas Komisijas pētniecības centrs (*Joint Research Centre*) 2015. gadā nāca klajā ar speciālu zinātnes un politikas ziņojumu (*Science un Policy Report*) par aktivitātēm normatīvajā regulējumā un pētniecībā saistībā ar ekspluatācijā esošo konstrukciju novērtējumu [2], kurā izcelta problemātika un izaicinājumi attiecībā uz esošo būvju konstrukcijām.

Latvijā šī jautājuma problemātika īpaši saasinājās pēc 2013. gada Zolitūdes notikumiem. Jaunajos ēku būvnoteikumos [4] visiem publisko ēku īpašniekiem ir uzdots ne vēlāk kā līdz 2019. gadam ar intervālu turpmāk reizi 10 gados veikt ēkas tehnisko apsekošanu ar mērķi identificēt, vai tās atbilst būtiskajām prasībām, tostarp mehāniskās stiprības un stabilitātes prasībām? Taču - kā praktiski novērtēt ekspluatācijā esošu konstrukciju drošumu. Ko darīt ar konstrukcijām, kas projektētas pēc iepriekšējiem normatīviem, taču šodien industrija strādā pēc citām normatīvajām prasībām. Vai tās būtu jāpārvērtē un jāatjauno atbilstoši šodienas prasībām un drošuma līmenim. Kādas ir jaunākās tendences pasaulē, vai tās ir piemērojamas Latvijas apstākļiem. Šie jautājumi ir promocijas darbā veikto pētījumu pamatā.

Pētījuma autors uzskata par svarīgu noteikt skaidras un šodienas zināšanām par konstrukciju uzvedības raksturu atbilstošas tehniskās prasības un metodoloģiju esošo ēku konstrukciju drošuma vērtēšanā. Ņemot vērā, ka CEN atbildīgā standartizācijas tehniskā komisija strādā pie papildinājumiem konstrukciju projektēšanas normatīvos (EN), lai noteiktu vienotu kārtību attiecībā uz šādu ēku pārbūvēm un atjaunošanām pēc 2022. gada [7], ir svarīgi saprast esošo ēku drošuma līmeni, t.sk. radot vienotu metodisko bāzi, kā notektbūvju drošumu, ņemot vērā Latvijas tehniskos, ekonomiskos un sociālos aspektus.

Promocijas darba mērķis

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt metodoloģiju ekspluatācijā esošo ēku kopējā drošuma līmeņa novērtēšanai, balstītu ēkas kopējā drošības līmeņa kvantitatīvajā vērtējumā, ņemot vērā ēkas nesošo elementu un to savienojumu tehnisko stāvokli, to individuālo nozīmi kopējās ēkas konstrukcijas mehāniskās izturības un stabilitātes nodrošināšanā, kā arī iespējamā sabrukuma sekas.

Promocijas darba uzdevumi

Lai īstenotu darba mērķi, noteikti vairāki uzdevumi:

1. Izstrādāt metodoloģijas teorētisko pamatojumu:

- a) veikt aktuālo pētījumu analīzi par esošo ēku konstrukciju drošuma novērtēšanas metodēm un modeļiem;
- b) veikt esošo ēku konstrukciju drošuma novērtēšanas prakses analīzi Eiropas dalībvalstīs;
- c) veikt ekspluatācijā esošo publisko ēku konstrukciju tehniskā stāvokļa kvalitatīva novērtējuma analīzi un tā ietekmējošo faktoru sintēzi uz Latvijā pieejamo datu pamata;
- d) izstrādāt metodi, kas ļauj noteikt teorētiskos drošuma līmeņus dažādiem konstrukciju elementiem, t. sk. projektētiem ārpus Eirokodeksu metodoloģijas ietvara, un veikt metodikas praktiskā lietojuma piemēru izstrādi.

2. Izstrādāt metodoloģiju ekspluatācijā esošo ēku kopējā drošuma noteikšanai, kas balstīta ēkas kopējā drošuma līmeņa kvantitatīvajā vērtējumā, ņemot vērā nesošo elementu un to savienojumu tehnisko stāvokli, to individuālo nozīmi kopējās ēkas konstrukcijas mehāniskās izturības un stabilitātes nodrošināšanā, kā arī iespējamā sabrukuma sekas.

3. Veikt izstrādātās metodoloģijas validāciju:

- a) analizēt ēkas kopējā drošuma līmeņa noteikšanas metodoloģiju, veicot rezultātu novērtējumu būtisko parametru izmaiņu gadījumā un robežgadījumos;
- b) veikt iegūto rezultātu salīdzinājumu ar citām, alternatīvām metodēm;
- c) izstrādāt praktiskus piemērus attiecībā uz ekspluatācijā esošo ēku kvantitatīvu drošuma vērtēšanu, lietojot izstrādāto metodoloģiju.

4. Sniegt ieteikumus metodoloģijas praktiskai ieviešanai.

Promocijas darba zinātniskā novitāte

Izstrādāta jauna metodoloģija ekspluatācijā esošu ēku kopējā drošuma kvantitatīvai novērtēšanai, izmantojot praktiski iegūstamu informāciju par atsevišķo konstrukciju drošuma raksturotājiem. Metodoloģija balstīta ēkas kopējā drošības indeksa ieviešanā, kas globāli raksturo ēkas mehānisko stiprību un stabilitāti.

Promocijas darbā papildus piedāvātas vairākas jaunas metodes, kas izmantotas izstrādātajā metodoloģijā:

- 1) jauna metode, balstīta riska pārvaldības principos, ēku iedalīšanai kategorijās, izmantojot vizuāli konstatējamus bojājumus un nepilnības, tādējādi kvalitatīvi ļaujot identificēt lielākos riska objektus valsts publisko ēku fondā;
- 2) jauna metode, balstīta Eirokodeksos definētajos drošuma konceptos, kas ir piemērota ekspluatācijā esošo ēku nesošo komponentu drošuma novērtēšanai, kā arī vispārēji dažādu būvnormatīvu sistēmu drošuma līmeņu salīdzināšanai;
- 3) izstrādāta “nosacītā tilpuma” metode svāra koeficientu noteikšanai, kas ļauj ņemt vērā ēkas komponentu (kopņu, saišu, kolonnu, plātņu utt.) individuālo nozīmi kopējā ēkas konstrukciju mehāniskās izturības, stabilitātes nodrošināšanā. Iegūti nosacītā ietekmes koeficienta W (svāra koeficienta) diapazoni daudzstāvu karkasa ēkām ar regulāru kolonnu tīklu.

Piedāvāti jauni parametri globālais ēkas drošuma indekss A un relatīvais globālais ēkas drošuma indekss A_{GRI} , kas raksturo jaunas vai ekspluatācijā esošas ēkas tehnisko stāvokli un ļauj kvantitatīvi salīdzināt dažādu ēku kopējo drošuma līmeni.

Atšķirībā no pieejamām drošuma līmeņa vērtēšanas metodēm, kas balstītas uz specifiskām zināšanām par varbūtības un sistēmas teorijas algoritmu praktisku pielietojumu, šajā promocijas darbā izstrādātā metodoloģija ir mazāk komplicēta, tādējādi nodrošinot to, ka to spēs lietot tie inženiertehniskie speciālisti, kas ikdienā veic ēku inženiertehniskās apsekošanas/izpēti. Izstrādātā metode nodrošina arī vienotu rezultātu atspoguļojumu, kas nodrošina to, ka iegūti rezultāti dažādām ēkām ir savstarpēji salīdzināmi, kas savienojumā ar vienotu uzskaites sistēmu nozares speciālistiem un politikas veidotājiem ļauj veikt nepieciešamos plānotos pasākumu drošuma līmeņa uzraudzībai un objektīvu lēmumu pieņemšanu.

Promocijas darba praktiskais lietojums

Izmantojot jauno ekspluatācijā esošo ēku drošuma novērtēšanas metodoloģiju, visas ar ēkas drošumu saistītās puses (ēkas īpašniekam, arhitektiem, būvkonstruktoriem, būvvaldēm un citām ieinteresētajām pusēm) var saņemt ar skaitlisko vērtību raksturotu informāciju par apsekoto ēku drošuma līmeni. Tas ļauj ērti un kvalificēti identificēt riska līmeni attiecībā uz ēkas turpmāko lietošanu un savlaicīgi reaģēt, lai izstrādātu adekvātus risinājumus konstrukciju drošuma nodrošināšanai saskaņā ar spēkā esošo normatīvu prasībām. Lai arī jaunā metode izstrādāta, balstoties datos, kas iegūti no publisko ēku apsekošanas un datu apstrādes, tā ir

izmantojama arī citu ēku, piemēram, dzīvojamo un rūpniecisko ēku drošuma klasificēšanai un to konstrukciju drošuma vērtēšanai.

Ņemot vērā to, ka būvkonstrukciju nozarē plaši tiek lietoti Eirokodeksā praktizētie termini un raksturlielumi, autors iesaka turpmāk ēkas atbilstību mehāniskās stiprības un stabilitātes prasībām izteikt nevis nolietojuma procentos (%), bet gan būvzinātnē atpazīstamā raksturotāja – ēkas drošumā, kā mērvienību lietojot ēkas kopējo drošuma indeksu, kas noteikts atbilstoši promocijas darbā piedāvātajai metodei.

Lai sasniegtu šo mērķi Latvijā, definētas nepieciešamās aktivitātes:

a) atbildīgā standartizācijas tehniskā komiteja *LVS/STK30* izstrādā piemērojamo standartu sarakstu, ko piemēro *LBN405* būvnormatīvu prasību izpildei; šajā sarakstā nepieciešams iekļaut tos nacionālos, Eiropas un starptautiskos standartus, kas piemērojami konstrukciju tehniskajai izpētei un drošuma vērtēšanai;

b) paralēli *LVS/STK30* izstrādā nacionālo standartu atbilstoši šajā promocijas darbā sniegtajiem ieteikumiem un metodoloģijai, pēc tā apstiprināšanas nacionālā standarta statusā to iekļauj a) punktā minētajā sarakstā.

Pētījuma rezultātā izstrādātā metode paver ceļu arī attiecībā uz ēkas drošuma līmeņa monitorēšanu, tostarp mašīnmācīšanās algoritmu iesaisti, lai atvieglotu un uzlabotu kopējā drošuma līmeņa nodrošināšanu ēku ekspluatācijā.

Pētījuma rezultāti

1. Pētījums par esošo būvju vērtēšanas praksi Eiropā.
2. Metode, kas balstīta riska pārvaldības principos, ēku iedalīšanai kategorijās kvalitatīvai identificēšanai, kā arī sabiedrības informēšanai par riska objektiem valsts publisko ēku fondā, izmantojot vizuāli konstatējamus konstrukciju bojājumus un nepilnības.
3. Metode, balstīta Eirokodeksos definētajā drošuma koncepcijā, kas ir piemērota ekspluatācijā esošo ēku nesošo komponentu drošuma novērtēšanai, kā arī vispārīgi dažādu būvnormatīvu sistēmu drošuma līmeņu salīdzināšanai.
4. Metodoloģija ekspluatācijā esošo ēku kopējā drošuma līmeņa kvantitatīvai novērtēšanai, izmantojot praktiski iegūstamu informāciju par atsevišķo konstrukciju drošuma raksturotājiem un ēkas kopējā drošības indeksa ieviešana, kas ņem vērā ēkas nesošo elementu un to savienojumu tehnisko stāvokli, to individuālo nozīmi kopējās ēkas konstrukcijas mehāniskās izturības un stabilitātes nodrošināšanā, kā arī tā iespējamā sabrukuma sekas.
5. Nosacītā ietekmes koeficienta W diapazoni daudzstāvu karkasa ēkām ar regulāru kolonnu tīklu.

Pētījuma ierobežojumi

Piedāvātā ēkas drošuma novērtējuma metodoloģija ir piemērojama ēkām, kurām konstrukciju nestspēju nodrošina tipveida nesošās konstrukcijas – sienas, pārsedzes, rīģeļi, kolonnas, kopnes un sijas, kas izgatavotas no dzelzsbetona, koka vai metāla. Rūpnieciski

izgatavotām tipveida konstrukcijām ir pieejami objektīvi dati par konstrukciju sākotnējo stāvokli un nosakāms konstrukcijas degradācijas (nolietojuma) līmenis ar zemu rezultātu izkliedi. Savukārt individuāli izgatavotu konstrukciju gadījumos izkļedes robežas var būt lielākas nekā noteikts izgatavošanas dokumentācijā, kā arī piemērotu testēšanas metožu izvēle ir ierobežota. Tādēļ būtu jāturpina pētījumi attiecībā uz metodoloģijas pielāgošanu individuāli izgatavotu konstrukciju gadījumos.

Metode ir ierobežota arī ar Eirokodeksos noteiktajiem drošuma nodrošināšanas pieņēmumiem – gan attiecībā uz slodžu un nestspējas modeļiem, kā arī definētajām nenoteiktībām un izkļiežu sadalījumiem.

Normatīvajā līmenī nav noteikts, kāds ir sagaidāmais drošuma līmenis ekspluatācijā esošo ēku konstrukcijām, tāpēc izstrādātā metodoloģija ir vairāk piemērota datu par ēkas drošuma līmeni ievākšanai un savstarpējai salīdzināšanai. Ir valstis, kurās esošo ēku konstrukciju drošums (drošuma indekss), salīdzinot ar projektējamo ēku konstrukcijām, ekonomisku apsvērumu dēļ ir samazināts par 1,5, kas 50 gadu intervālam attiecīgi ir robežās no 1,8–2,8 jeb sabrukšanas varbūtība P_f ir robežās no $3,6 \times 10^{-2}$ līdz $2,6 \times 10^{-3}$.

Nepieciešami papildu pētījumi attiecībā uz ēku kopējās stabilitātes kritērijiem jeb ēkas apgāšanās draudiem ģeotehnisku apsvērumu dēļ. Esošajā ēkas drošuma vērtējumā stabilitātes kritēriji netiek vērtēti.

Ēkas kopējo vērtējumu iespējams papildināt arī ar citu būtisko prasību vērtējumu, piemēram, izturību pret ugunsdrošību, nekaitīguma prasībām, akustiku, energoefektivitāti un ilgtspējas kritērijiem. Tomēr tas būtu darāms atsevišķi, un šos kritērijus nevajadzētu iekļaut ēkas drošuma raksturotājā, jo piedāvātā metodoloģija to neparedz.

Pētījuma teorētiskais un metodoloģiskais pamats

Pētījuma teorētisko bāzi veido būvmehānikas un būvkonstrukciju nozares metodes, matemātiskā analīze, matemātiskā statistika, varbūtību teorija, sistēmu teorija.

Promocijas darbā izmantotas vairākas pētniecības metodes:

- kvalitatīvā metode, izmantota veicot tiešos novērojumus par būvniecības un ēku ekspluatācijas procesiem Latvijā, un dokumentu analīze, uz to pamata veikts pētījums par esošo būvju vērtēšanas praksi Eiropā;
- analīze un indukcija izmantota, izstrādājot jauno metodoloģiju ekspluatācijā esošu ēku kopējā drošuma līmeņa kvantitatīvai novērtēšanai;
- kvantitatīvā metode izmantota skaitliskos eksperimentos un simulācijās.

Pētījumā izmantotā programmatūra:

- simulāciju veikšanai - atvērtā koda programma *Phyton 3*;
- konstrukciju aprēķiniem – komerciālā programma *Dlubal RFM 5.12*.

Rezultātu aprobācija starptautiskās konferencēs

1. 12th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques, Vilnius Technical university, Vilnius, Lithuania, 26.05.–27.05.2016.

2. 11th International Scientific and Practical Conference “Environment. Technology. Resources”, Rezekne Academy of technology, Rezekne, Latvia, 15.06.–17.06.2017.
3. 58. DAfStb-Jahrestagung 2017: “Concrete – keep thinking” and Symposium “Existing structures” (Kaiserlautern Technical university), Kaiserlautern, Germany, 19.09.–21.09.2017.
4. 3rd International Conference “Innovative Materials, Structures and Technologies”, Riga Technical University, Riga, Latvia, 28.09.–29.09.2017.
5. 13th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques, Vilnius Technical university, Vilnius, Lithuania, 17.05.–18.05.2019.

Promocijas darba autora zinātniskās publikācijas

1. Druķis, P., Gaile, L., Pakrašiņš, L.: **Inspection of Public Buildings Based on Risk Assessment.** In: Procedia Engineering. **172**, 247–255 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.106>. (Publicēts SCOPUS).
2. Druķis, P., Gaile, L., Goremikins, V.: **Case study of structural reliability of existing building.** In: Vide. Tehnoloģija. Resursi – Environment, Technology, Resources. **3**, 47–52 (2017). <https://doi.org/10.17770/etr2017vol3.2615>. (Publicēts SCOPUS).
3. Druķis, P., Gaile, L., Valtere, K., Pakrašiņš, L., Goremikins, V.: **Study of structural reliability of existing concrete structures.** In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. **251**, (2017). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/251/1/012087>. (Publicēts SCOPUS).
4. Druķis, P., Gaile, L., Goremikins, V.: **Structural reliability assessment of existing precast concrete building.** Case study. In: The proceedings of the 13th international conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques” (MBMST 2019) (2019). <https://doi.org/10.3846/mbmst.2019.015>.
5. Alekseytsev A.V., Druķis P.: **Optimization steel of structures for buildings with variable desing safety level.** In: Magazine of Civil Engineering, Publisher: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, ISSN:2071-4726E-ISSN:2071-0305 (2020), Scopus CiteScore 2018 – 2.75).

2. LITERATŪRAS APSKATS

Promocijas darba izstrādes gaitā veikta ievērojama citu pētījumu analīze par drošuma tēmu. Analizēti avoti par drošuma teorijas attīstību un tās lietošanu saistībā ar konstrukciju drošumu. Sniegts ieskats par publikācijām attiecībā uz konstrukciju drošuma konceptu un konstrukciju robežstāvokļiem, kā arī mainīgajiem lielumiem un nenoteiktībām, kas raksturo konstrukciju drošumu. Ievērojama publikāciju apskate veikta par konstruktīvo elementu galveno drošuma kvantitatīvo raksturotāju – drošuma indeksu β , kas tiek lietots kā kvantitatīvs mērs bojājumu iestāšanās varbūtībai noteiktā laika periodā. Analizēti arī avoti par drošuma sistēmām, to modelēšanas metodēm, kā arī slodžu un materiāli modelēšanu, bojājumu analīzi. Atsevišķa apakšnodaļa veltīta arī publikācijām par kompleksu sistēmu idealizācijas paņēmieniem drošuma vērtēšanas kontekstā, kā arī standartiem attiecībā uz konstrukciju drošuma vērtēšanu. Minētas arī galvenās atziņas no publikācijām par sabiedrībai akceptējamiem riskiem. Atsevišķi literatūras avotu izpētē veltīta apakšnodaļa par publikācijām ēku konstrukciju drošuma un tiltu konstrukciju drošuma vērtēšanā.

Galvenie secinājumi no atziņām, kas izriet no literatūras apskates, ir apkopoti nodaļas noslēgumā.

2.1. Vispārīgi par drošumu

Literatūras avotos par drošuma teorijas pamatlicēju tiek uzskatīts franču astronoms, matemātiķis un fiziķis Pjērs-Simons Laplass (*Pierre-Simon Laplace*, 1749-1827) [8]. Viņa piecu sējumu darbs “Debesu mehānika” (“*Celestial mechanics*”, 1799-1825) vēl šodien kalpo kā klasiskās mehānikas teorijas rokasgrāmata, un tieši Laplass ir uzskatāms par Tomasa Beijesa (*Thomas Bayes*, 1701-1761) atklātās teorēmas ieviešanu praksē, publicējot pirmo zinātnisko darbu, kurā analizēts drošuma jēdziens 1812. gadā ar nosaukumu “Analītiskā varbūtības teorija” (“*Théorie analytique des probabilités*”).

Tomēr līdz pat XX gadsimta vidum drošuma analīze galvenokārt kalpoja kā teorija, līdz pagājušā gadsimta 50-ajos gados to strauji sāka izmantot aparātbūves rūpniecībā saistībā ar straujo industrijas izaugsmi un nepieciešamību nodrošināt produkcijas kvalitāti. Šeit gan jāatzīmē, ka arī iepriekš, bez īpašas terminoloģijas un teorijas par drošumu, attiecīgā laikmeta inženieri piemēroja dažādas metodes, lai nodrošinātu to radīto izstrādājumu spēju kalpot tam paredzētajam mērķim gadījumos, ja notika kādi ārkārtas apstākļi. Par piemēru var minēt pirmos kuģus ar tvaika dzinējiem, kuri papildus tika aprīkoti ar burām, lai spētu nodrošināt to kustību gadījumos, ja pārstātu darboties tvaika dzinēji, vai pirmās automašīnas, kuras tika aprīkotas ar zirgu piejūgšanas ierīcēm [9].

Ievērojams cēlonis ir fakts, ka pirmie drošības koeficienti materiāliem, kuri praksē eksistēja līdz pat XX gadsimta 50. gadiem, tika ieviesti jau XIX gadsimta 40. gadā Liebritānijā, nosakot čuguna tiltiem pieļaujamo materiāla pretestību ne vairāk kā 77.2 MPa [10].

Ievērojami pētījumi par drošumu bijušajā PSRS telpā aizsākās pēc otrā pasaules kara, kad 1949. gadā tika izdota pirmā publikācija par konstrukciju projektēšanu, ņemot vērā to plastiskās īpašības (R.A. Rzhninitzyn) [18]. Tāpat par vienu no modernās drošuma teorijas

pamatlicēju industrijā ir uzskatāms krievu matemātiķis, zinātnieks Boris Vladimirovich Gnedenko (*Борис Владимирович Гнедэнко*), kurš sākot no XX gadsimta 60. gadiem izdeva virkni publikāciju par matemātisko drošuma teoriju, drošuma jēdzieniem, dzīves cikla analīzi, atjaunošanas un tehniskās uzraudzības teorijām. Pateicoties viņam, virknē literatūras konstrukciju drošums kā jēdziens un teorija padziļināti tiek pētīta sākot ar pagājušā gadsimta 70-ajiem gadiem. Tieši viņš ieviesa savos pētījumos jēdzienu, ka atšķirībā no drošības, drošums ir mērāms, t.i. kvantificējams [9].

Sākot ar 90. gadiem, ir izdota virkne literatūras avotu par drošuma teoriju būvniecībā. Eiropa, ASV, Krievija, Austrālija, Japāna – kopā ar industrializācijas trešo posmu strauji sāka attīstīties drošuma teorija būvniecībā visos pasaules reģionos. A.Haldar, S.Mahadevan, M.Frangopol, C.Wang, M.Ruzzene, S.Hanagud, V.D.Raizer ASV [8, 11, 12, 21, 23], J.D.Sørensen, P.Thoft-Christensen, H.O.Madsen Dānija [13, 22], J.Schneider, A.T.Beck, Vācija [14, 16], M.Sykora, M.Holicky Čehija [15], R.E. Melchers, M.G.Stewart Austrālija [16], G.Z.Yan, L.K. Zha Ķīna [17], M.Kawatani, C.W.Kim Japāna, Y.Murotsu [12, 22], Perelmuter A. B. Krievija [9], M.Lemair, A. Chateaneuf, J.-C. Mittea, Francija [18] R. Ranganathan, S.Chandrasekaranm, S.Gopalakrishnan Indija [19, 20, 21] – tie ir tikai daži no ievērojamiem autoriem un valstīm, kas pēdējās dekādēs izdod populārzinātniskas grāmatas par drošuma teoriju būvniecībā.

Teorija par konstrukciju drošumu būvniecībā ir samērā specifiska salīdzinājumā uz kopējo fonu par drošuma teoriju citās nozarēs. Virkne drošuma teorijas principu, kas tiek piemēroti aparātbūvē un mašīnbūvē, būvniecībā līdz šim nebija izmantojami. Galvenais iemesls ir izbūvējamo objektu dažādība gan to izmantojamo materiālu, gan izpildāmo darbu, gan lietošanas apstākļu, gan mērķu un termiņu aspektos. Drošuma sakarā ir jāņem vērā, ka katram atsevišķajam konstrukciju elementam ir vairāki iespējamie bojājumu scenāriji. Vispirms ir nepieciešams novērtēt konstrukcijas drošumu attiecībā uz katru atsevišķā elementa atsevišķo bojājuma scenāriju, t.i. varbūtību, ka noteiktam elementam noteiktā laika periodā neiestāsies noteikts bojājums (nestspējas vai lietojamības). Tas nozīmē, ka svarīgs ir katra atsevišķā elementa drošuma līmenis un varbūtība iestāties bojājumam. Un tikai tad var tikt analizēti visu iespējamo bojājumu scenāriji, kas pateicoties šodienas praksei un programmu nodrošinājumam, ir kļuvis iespējams. Tas ļauj spriest par konstrukciju drošuma līmeni. Tomēr jāatzīst, ka drošuma vērtēšanas metodes inženieru vidū joprojām tiek uzskatītas par sarežģītām, un konstrukciju drošuma kvantitatīva vērtēšana praksē tiek īstenota salīdzinoši reti.

2.2. Konstrukciju drošuma teorija

2.2.1. Drošuma koncepts un robežstāvokļi

Ievērojamu laika periodu konstrukciju projektēšanā tika pieņemts, ka visas slodzes un stiprības ir determinētas, jeb noteiktas. Elementu stiprība tika noteikta ar noteiktu slodzes lielumu noteiktās robežās. Attiecība starp konstrukciju stiprību un slodzi tika noteikta kā drošības koeficients. Šis skaitlis tika uzskatīts par konstrukcijas drošuma raksturotāju. Daudzos konstrukciju normatīvos par konstrukciju stiprību un iedarbēm šādi drošības koeficienti ir

atrodami joprojām. Šie lielumi tradicionāli tika noteikti balstoties uz inženieru pieredzi un praksē izdarītiem secinājumiem.

Pēdējās gadu dekādēs konstrukciju projektēšanas normatīvos terminu drošības koeficients ir nomainījis cits termins - parciālais koeficients. Slodžu un izturības raksturojošie lielumi ar noteiktām nenoteiktībām tiek definēti, un dažādi parciālie koeficienti tiek piemēroti slodžu un noturības aprēķinos, lai garantētu, ka konstrukcijas visā ekspluatācijas laikā ir pietiekami drošas. Parciālie koeficienti galvenokārt tiek balstīti uz zināšanām par noteiktu konstrukcijas elementu darbību ilgākā laika periodā (pieredzi) un kalibrēti ar normētajām slodzēm atbilstoši normatīvos vai tie tiek noteikti, izmantojot varbūtības metodoloģiju.

Ja sākotnēji konstrukciju analīze un projektēšana tradicionāli balstījās uz noteiktām jeb determinētām metodēm, tad vēlākie konstrukciju projektēšanas normatīvi balstās uz slodžu, konstrukciju pretestības, kā arī noteiktu sistēmu modelēšanas nenoteiktību pieņēmumiem, kas tiek prognozēti ar varbūtības paņēmieniem. Konstrukcijai pamatā tiek prasīts nodrošināt attiecīgu izpildījumu visā tās noteiktajā dzīves ciklā, t.i. tiek prasīts, lai tā nesabrūk vai paliek droša un izpilda noteiktas funkcionālas prasības.

Tādējādi konstrukciju sistēmas drošums tiek definēts kā varbūtība, ka konstrukcija pie noteiktiem apstākļiem saglabā noteiktas īpašības visā tās prognozētajā dzīves laikā. Lietojot specializētas metodes, tiek aprēķināta noteiktu bojājumu iestāšanās varbūtība uz noteiktu laika periodu. Modeļu informācija, kuru pamatā ir drošuma analīze, tomēr nav absolūti precīza, tādēļ nosakāmā varbūtība jāuzskata par nominālo drošuma raksturotāju, nevis kā absolūto skaitli. Tomēr, ja drošums tiek noteikts vairākām konstrukcijām, izmantojot tādu pašu informācijas līmeni un vienādus matemātiskos modeļus, tad ir noderīgi veikt salīdzinājumus šo konstrukciju drošuma līmeņiem. Jaunu konstrukciju projektēšanā tiek pielietotas varbūtības metodes, lietojot līdzīgus modeļus un informāciju no līdzvērtīgām esošām konstrukcijām, ja zināms, ka tās izpildās. Ja tiek lietotas varbūtības metodes, lai izveidotu konstrukcijas, kas nav līdzīgas jau ar esošajām konstrukcijām, tad inženieriem ir jābūt ļoti uzmanīgiem un jāpārbauda pēc iespējas vairāk izmantotie modeļi [14].

Pēc pirmajām zinātniskajām publikācijām par konstrukciju drošumu šodien nu jau arī starptautiskajos standartos [24, 25] ir definīcijas, kas ir konstrukciju drošums. Latviešu valodā tas tiek tulkots kā konstrukcijas vai tās elementu spēja izpildīt noteiktas prasības visā lietošanas laikā, kādam tā ir paredzēta (t.i. projektēta). Augstākminētajos literatūras avotos un standartos drošums tiek izteikts kā varbūtība jeb iespējamība saglabāt šo spēju noteiktā laika posmā un raksturo apgriezti proporcionāli varbūtībai iestāties bojājumam:

$$R = 1 - P_f, \quad (2.1.)$$

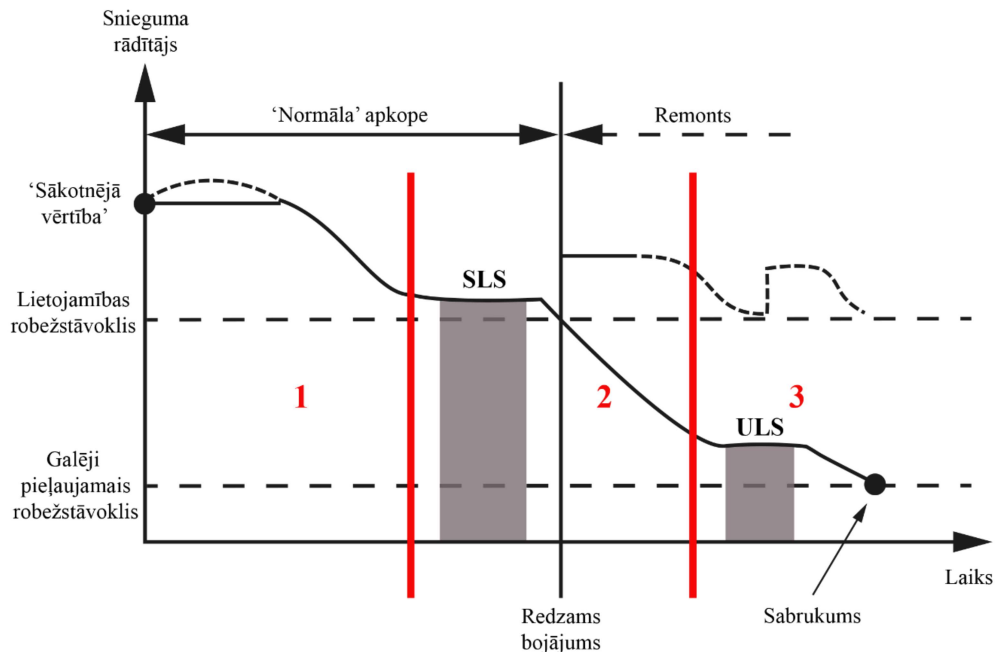
kur R - Drošums (*Reliability, nadjozhnost*);

P_f - bojājuma iestāšanās varbūtība noteiktā laika intervālā.

Konceptuāli no jebkuriem bojājumiem nav iespējams izvairīties, t. sk. arī no konstrukciju bojājumiem. Agrāk vai vēlāk bojājumi notiek un atbildi uz jautājumu – kad? sniedz drošuma teorija. Atbildes meklēšana uz šo jautājumu, izmantojot dažādus matemātiskās modelēšanas paņēmienus, ir konstrukciju drošuma teorijas pamatā. Neatkarīgi no konstrukcijām, to lietošanas apstākļiem un citiem faktoriem, noteikta līmeņa bojājumi ēkām un to elementiem iestājas prognozējamā laika termiņā un tiek izteikti ar noteiktu varbūtību.

Analizējot bojājumu iestāšanās varbūtību, konstrukciju drošuma teorijā tiek lietots jēdziens – robežstāvokļi, un attiecībā uz konstrukcijām pamatā tiek izšķirti 3 robežstāvokļi [9]:

- konstrukciju ilgmūžības robežstāvoklis (*durability, dolgovecnostj*) – termiņš, kurā konstrukcijai tiek uzturēts tās drošums pilnā apjomā. Bojājumi, kas ir raksturīgi šim robežstāvoklim, tiek raksturoti kā konstrukcijas sākotnējais degradācijas posms, un konstatējami kā aizsargpārklājuma bojājumi vai līdzvērtīgi, pamatā virsmas bojājumi (skat. 2.1. attēlā zonu 1). Šis robežstāvoklis nereti vizuāli nav konstatējams, tādēļ praksē pasākumi, kas tiek veikti, lai šo robežstāvokli attālinātu, ir noteiktas apkopes, virsmas apstrāde un tml.;
- konstrukciju lietojamības robežstāvoklis (*serviceability, rabotaspasobnostj*) – konstrukcija šajā laika nogrieznī sāk zaudēt savas īpašības. Bojājumi, kas ir raksturīgi šim robežstāvoklim, ir deformācijas (atgriezeniskās, neatgriezeniskās), plaisas, palielināta vibrācija, kas raksturo, ka nesošās konstrukcijas ir sasniegušas savas lietošanas robežstāvokli un ir nepieciešams veikt to remontu. Šajā robežstāvoklī tiek iekļauti arī nepieļaujami bojājumi konstrukciju apdares elementiem un citām, nenesošām konstrukcijām (skat. 2.1. attēlā zonu 2). Šis robežstāvoklis ir konstatējams vizuāli vai arī tiek sajūsts ar izmaiņām konstrukcijas dinamiskajā darbībā (vibrācijas) un ir veicami noteikti remonta (atjaunošanas) pasākumi, lai novērstu minēto robežstāvokli;
- konstrukciju drošības robežstāvoklis (*safety, bezopasnost*) – konstrukcija šajā laika nogrieznī ir zaudējusi savas īpašības, un iestājas bojājumi, kad konstrukcija vairs nespēj pildīt tai paredzēto funkciju – nodrošināt stiprību vai stabilitāti. Šo robežstāvokli literatūrā sauc arī par galējo robežstāvokli (*ultimate, predelnoje*). Bojājumi, kas ir raksturīgi šim robežstāvoklim, ir saistīti vai nu ar stiprības zudumu - elementu pārrāvumi un sabrukumi, nogurums vai ģeotehniskās noturības zudums, vai arī ar stabilitātes zudumu - ģeotehniskais pacēluma, iegruvuma vai uzpeldēšanas rezultāts (skat. 2.1. attēlā zonu 3). Šo robežstāvokli ir viegli identificēt vizuāli, jo konstrukcija ir sabrukusi un vairāk nespēj nodrošināt savu funkcionētspēju. Lai novērstu šo robežstāvokli vai arī pēc tā iestāšanās ir nepieciešams veikt attiecīgā konstrukcijas elementa nomaiņu vai kapitālo remontu (pārbūvi).



2.1. att. Konstruktijas degradācijas funkcijas grafisks attēlojums

To, kādā termiņā konstrukcija no viena robežstāvokļa pāriet citā robežstāvoklī, ietekmē gan konstrukciju materiālu īpašības, gan iedarbju un slodžu raksturs. Ja vienai konstrukcijai tās ir sekundes vai minūtes, tad citai tās var būt mēneši un gadi.

Analizējot konstrukciju drošumu, visi robežstāvokļi ir svarīgi un tos visus iespējams prognozēt jebkurai konstrukcijai ar noteiktu precizitāti. Uz šiem principiem balstās visu nozīmīgo konstrukciju ekspluatācijas drošuma nodrošināšana, kur attiecīgajiem elementiem tiek veikti noteikti uzlabojumi vai pat to nomaiņa pēc noteikto darba stundu izstrādes (lietošanas), lai arī vizuāli attiecīgās konstrukcijas vēl ir nevainojamā stāvoklī, (piemēram, atomelektrostaciju būvēm, transportlīdzekļiem, ātrgaitas liftu konstrukcijām u. tml.).

Būvniecības nozarē tomēr šāda prakse netiek īstenota, un eksistē virkne metodes, kā novērtēt, kur uz 2.1. attēlā redzamās laika ass atrodas konkrētā būve, un kādi attiecīgi pasākumi veicami, lai nodrošinātu uzlabojumus.

2.2.2. Nestspējas robežstāvoklis. Drošuma fundamentālais princips.

Īstenojot konstrukciju projektēšanu saskaņā ar Eirokodeksos noteikto drošuma līmeni, īpaši tiek uzsvērts konstrukcijas drošuma līmenis attiecībā pret tās sabrukšanas robežstāvokli [26]. Šo robežstāvokli t.i. nestspējas robežstāvokli raksturo fundamentālais nosacījums (*the Fundamental Case*), kuru izsaka sekojoši:

$$R - S \geq 0 \text{ jeb } R \geq S, \quad (2.2.)$$

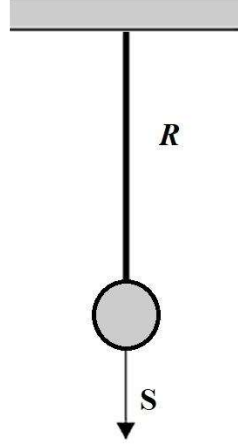
kur R – konstrukcijas stiprība;

S – iedarbes, kas iedarbojas uz konstrukciju.

Tas nozīmē, ka summāriem spēkiem, kas iedarbojas uz konstrukciju un tās elementiem ir jābūt mazākiem par spēkiem, ko apskatāmais elements spēj uzņemt. Gadījumos, ja slodzes

spēki būs lielāki par stiprības nosacījumiem, iestāsies konstrukcijas bojājums (līdzsvara vai nestspējas zudums).

Abstrahējot šo principu uz vienkāršotu gadījumu (piemēram, skat. att. 2.2.), kamēr vien $R \geq S$, tikmēr izpildīsies fundamentālais princips un konstrukcija saglabās savu nestspēju.



2.2. att. Vienkāršotais piemērs.

Tāpat vienlaikus var apgalvot arī sekojošo – bojājums īstenosies, ja

$$R - S < 0 \quad (2.3.)$$

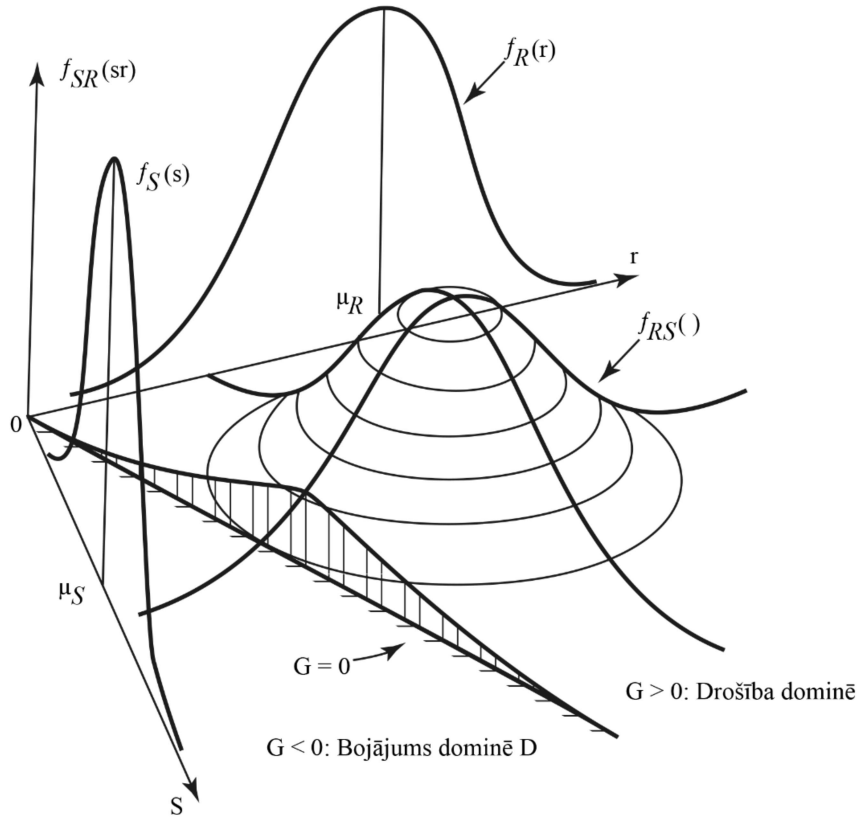
Analizējot konstrukciju drošumu [27], fundamentālajā gadījumā tiek izskatīta tikai viena slodzes iedarbe S , pret kuru darbojas viena pretestība R . Katru apraksta ar zināmu varbūtības blīvuma funkciju, f_S un f_R . Iedarbe rodas no pieliktās slodzes Q (vai nu noteikta, vai mainīga ar nejaušām sastāvdaļām). Tas ir svarīgi, ka R un S tiek izteikti vienādās vienībās. Varbūtību p_f par konstrukcijas elementa bojājumu var aprakstīt vispārīgā veidā:

$$p_f = P[G(R, S) \leq 0], \quad (2.4.)$$

kur $G(R, S)$ sauc par “galējā robežstāvokļa funkciju” un bojājuma varbūtība ir identiska ar robežstāvokļa neievērošanu.

Izteiksmi 2.4. var arī attiecināt uz visu konstrukciju kopumā. Vispārināti funkcijas f_R un f_S attiecīgi R un S ir redzamas 2.3. attēlā kopā ar funkciju (divpakāpju) $f_{RS}(r, s)$. Jebkuram bezgalīgam elementam $(\Delta r, \Delta s)$, pēdējais atspoguļo varbūtību, ka R ir vērtība starp r un $r + \Delta r$, bet S ir vērtība starp s un $s + \Delta s$, kur Δr un Δs tiecas uz nulli. Attēlā 2.3. vienādojums (2.4) ir reprezentēts ar iekrāsoto lauku bojājuma domināncei D ar neveiksmes domēnu D , kur bojājuma varbūtību var izteikt kā:

$$p_f = P(R - S \leq 0) = \int_D f_{RS}(r, s) dr ds \quad (2.5.)$$



2.3. att. Divu mainīgo (r, s) lauks un apvienotā blīvuma funkcija $f_{RS}(r, s)$, principiālās blīvuma funkcijas f_R un f_S un bojājuma plakne D .

Ja R un S ir neatkarīgi mainīgie, tad

$$f_{RS}(r, s) = f_R(r) f_S(s) \text{ un bojājuma varbūtību var izteikt} \quad (2.6.)$$

$$p_f = P(R - S \leq 0) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{S \geq r} f_R(r) f_S(s) dr ds \quad (2.7.)$$

Ievērojot, ka jebkuram nejaušajam mainīgajam lielumam X darbojas kumulatīva sadalījuma funkcija:

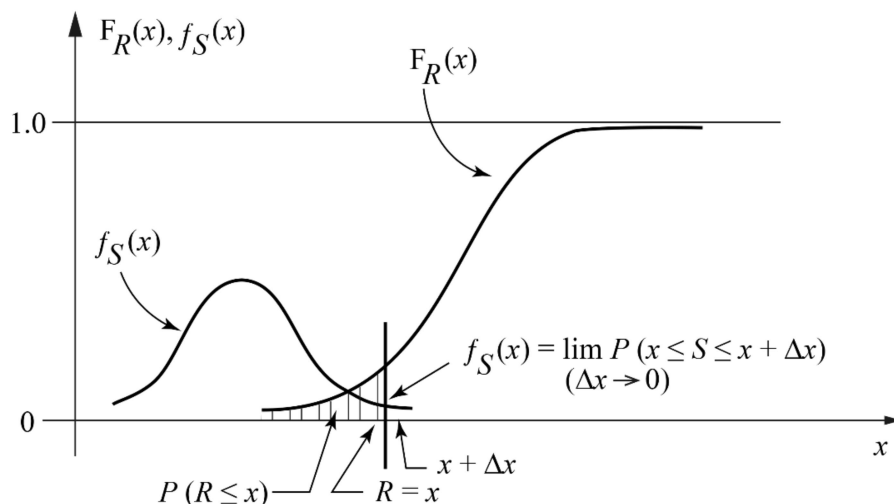
$$F_X(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f_X(y) dy, \quad (2.8.)$$

nodrošinot, ka $x \geq y$, no kā izriet, ka parastajam, bet īpašam gadījumam, kad R un S ir neatkarīgi, vienādojumu (2.7.) var izteikt vienotā integrāļa formā:

$$p_f = P(R - S \leq 0) = \int_{-\infty}^{\infty} F_R(x) f_S(x) dx, \quad (2.9.)$$

Šī izteiksme ir arī pazīstama kā “konvekcijas integrālis”, kuras nozīmi viegli izskaidrot, skatoties 2.4. attēlā. $F_R(x)$ ir varbūtība, ka $R \leq x$ vai varbūtība, ka elementa faktiskā pretestība R ir mazāka par kādu vērtību x . Tas reprezentē bojājumu, ja slodze ir $\geq x$. Varbūtība, ka tas tā ir, tiek aprakstīta ar funkciju $f_S(x)$, kas atspoguļo varbūtību, ka slodzei, kas iedarbojas uz elementu, ir vērtība starp x un $x + \Delta x$ robežās, kur $\Delta x \rightarrow 0$. Apsverot visas iespējamās x vērtības, t.i.,

ņemot vērā integrāli kopējam x , tiek iegūta kopējā bojājuma varbūtība. Tas ir redzams arī 2.5. attēlā, kur bojājuma biežuma funkcijas f_R un f_S ir novilkas pa to pašu asi.

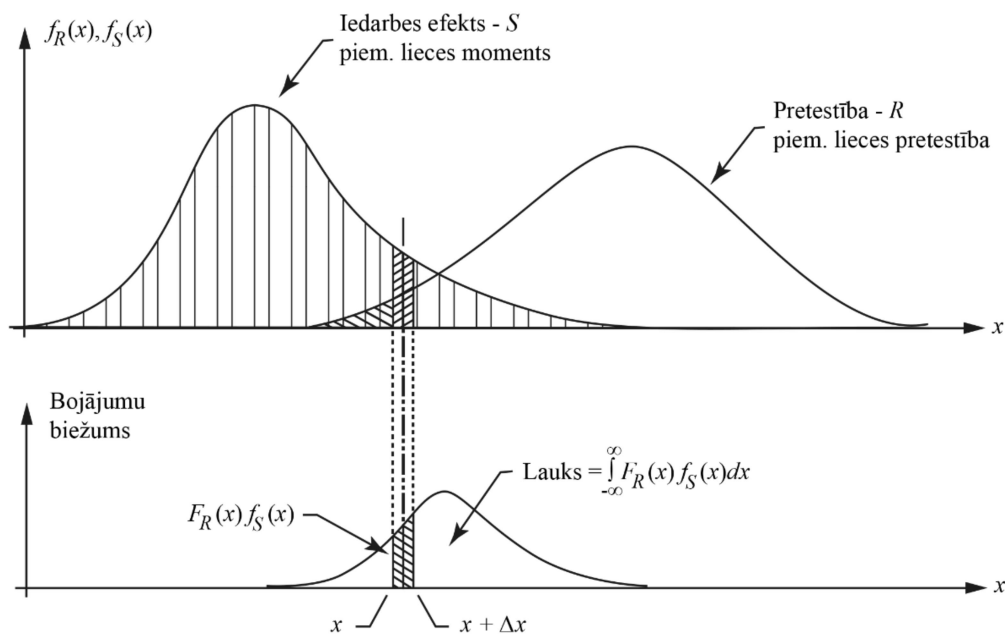


2.4. att. R – S Pamatproblēmas $F_R(x)$ un $f_S(x)$ atspoguļojums.

Izteiksmi (2.9) var izteikt vēl vienkāršāk:

$$p_f = \int_{-\infty}^{\infty} [1 - F_S(x)] f_R(x) dx \quad (2.10.)$$

Šo var uzskatīt par bojājumu varbūtību “summu” visiem gadījumiem, kad slodze pārsniedz pretestību.



2.5. att. Pretestības un slodzes funkciju vienkāršots piemērs.

Vienādojumos (2.7.–2.10.) norādītā summas zemākā robeža var nebūt pilnīgi apmierinoša, jo “negatīvā” pretestība parasti fiziski nav iespējama. Tādēļ zemākajai summas robežai ir jābūt nullei, lai gan tas var būt neliels neprecīzi, ja R vai S , vai abi kopā ir modelēti ar neierobežotiem sadalījumiem apakšējā daļā (piemēram, Gausa vai normālsadalījumā). Šī neprecizitāte rodas tikai no R un/vai S modelēšanas, nevis no teorijas, kas saistīta ar izteiksmēm (2.7.–2.10.). Šis svarīgais aspekts dažkārt tiek ignorēts, runājot par atbilstošu sadalījumu, lai atspoguļotu nejaušos mainīgos [28].

Dažiem R un S sadalījumiem ir iespējams integrēt konvekcijas integrāli (2.9) analītiski. Vislabākais piemērs ir, kad gan R , gan S ir normāli nejauši mainīgie ar vidējām vērtībām μ_R un μ_S un izkliedēm σ_R^2 un σ_S^2 attiecīgi [16]. Drošības robežai $Z = R - S$ tad ir vērtība un izkliede, ko nosaka:

$$\mu_Z = \mu_R - \mu_S \quad (2.11.a)$$

$$\sigma_Z^2 = \sigma_R^2 + \sigma_S^2 \quad (2.11.b)$$

Izteiksmi (2.4.) attiecīgi var izteikt:

$$p_f = P(R - S \leq 0) = P(Z \leq 0) = \Phi\left(\frac{0 - \mu_Z}{\sigma_Z}\right) \quad (2.12.)$$

kur Φ ir standarta normālsadalījuma funkcija.

Nejaušais mainīgais $Z = R - S$ ir parādīts 2.6. attēlā, kurā bojājuma apgabals $Z \leq 0$ ir redzams iekrāsotajā laukā. Izmantojot (2.11.) un (2.12.) izteiksmes, bojājuma varbūtību var izteikt:

$$p_f = \Phi\left[\frac{-(\mu_R - \mu_S)}{(\sigma_S^2 + \sigma_R^2)^{1/2}}\right] = \Phi(-\beta) \quad (2.13.)$$

kur $\beta = \mu_Z / \sigma_Z$, kas drošuma literatūrā tiks saukts par “drošuma indeksu” [16].

Ja kāda no standarta novirzēm σ_S vai σ_R vai abas pieaugs, vērtība kvadrātiekvā vienādojumam (2.13.) kļūs lielāka un līdz ar to arī bojājuma varbūtība p_f palielināsies. Līdzīgi, ja starpība starp slodzes iedarbes vidējo vērtību un vidējo vērtību samazināsies, tad arī bojājuma varbūtība p_f palielināsies.

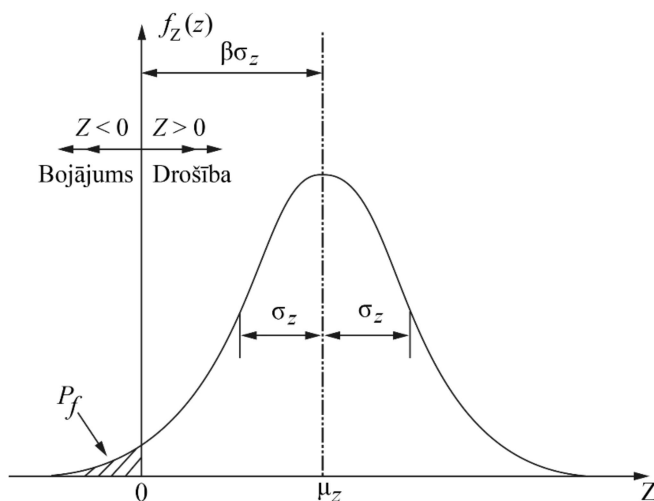
Tradicionālie determinētie pasākumi robežstāvokļa noteikšanai, proti, drošības koeficients un noslodzes koeficients, var tieši sasaistīt ar robežstāvokļa pārkāpumu varbūtību p_f . Analītiski to visvieglāk ir pierādīt ar “vienas pretestības” un “vienas slodzes iedarbes” piemēru, kur R un S (vai Q) vērtības ir normālsadalījumā.

Tomēr praksē vienkāršotie formulējumi (2.2 – 2.6) nav pilnīgi piemēroti, jo nav iespējams aprakstīt konstrukcijas drošuma problēmu ar vienkāršu R pret S , formulējot R un S kā neatkarīgus nejaušus mainīgos. Kopumā R apraksta ir materiālu īpašību funkciju un elementu vai konstrukciju izmēru funkcija, kamēr S apraksta pielikto slodzi Q funkciju, kur katrs no nosauktajiem var būt nejaušs mainīgais. R un S var arī nebūt neatkarīgi, jo piemēram, dažas slodzes iedarbojas pret bojājumiem (piemēram, apgāšanos) vai to pašu izmēri ietekmē gan R , gan S vērtības. Šajā gadījumā konvekcijas integrālis nav derīgs (2.9). Tas nav derīgs arī tad, ja ir vairāk nekā viena pieliktā slodze, kas iedarbojas uz vairāk nekā vienu elementu. Ir nepieciešams daudz precīzāks drošuma formulējums.

Apsverot ērtus vienkāršus drošības pasākumu, dažkārt tiek lietots “parastais” drošības koeficients λ_0 , ko var izteikt kā

$$\lambda_0 = \mu_R / \mu_S \quad (2.14.)$$

Šī izteiksme tomēr neraksturo tradicionālo situāciju, jo atsevišķas augšējās pieliktās slodzes robežas salīdzina ar materiālu pretestības vērtības apakšējām robežām. Šādas vērtības sauc par “raksturīgajām” vērtībām [29], kas atspoguļo to parasto izmantošanu un, piem., projektējot, tiek izmantota tikai viena konkrēta vērtība. Piemēram, tērauda stiegrojumam stiprības robežu lielākā daļa (piemēram, 95%) stiegrojuma pārsniegs. Tomēr ir arī ierobežota (bet neliela) varbūtība, ka atsevišķi stiegrojumi būs ar zemāku stiprību.



2.6. att. Drošības robežas izklike $Z = R - S$.

Pretestībai, projektētās vai “raksturīgās” vērtības ir noteiktas zemākajā pusē vidējai pretestības vērtībai (sk. 2.7. attēlu):

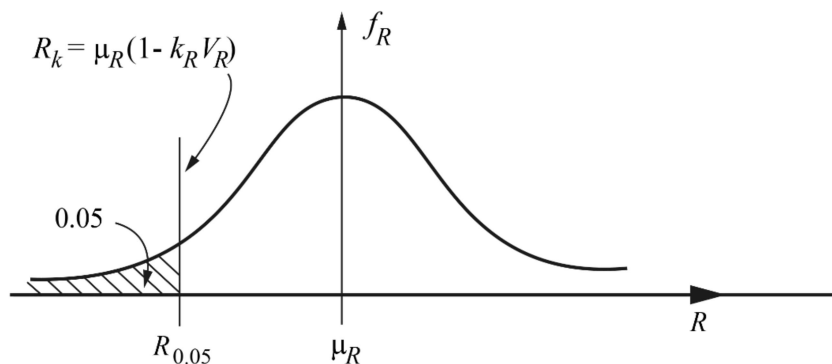
$$R_k = \mu_R (1 - k_R V_R), \quad (2.15.)$$

kur R_k – raksturīgā pretestība;
 μ_R – vidējā pretestība;
 V_R – variācijas koeficients pretestībai;
 k_R – konstante.

Šī izteiksme ir balstīta uz normālsadalījumu. R_k ir pretestības vērtība, zem kuras tikai, piemēram 5% no paraugiem slodzi neizturēs. Šo izteiksmi var pierakstīt:

$$0.05 = \Phi \left(- \frac{R_k - \mu_R}{\sigma_R} \right) \quad (2.16.)$$

un 5% “apakšējā astē” $k_{0.05} = 1.645 = (\mu_R - R_k) / \sigma_R$. Standarta izklike tādējādi tiek izteikta kā $\sigma_R = \mu_R V_R$.



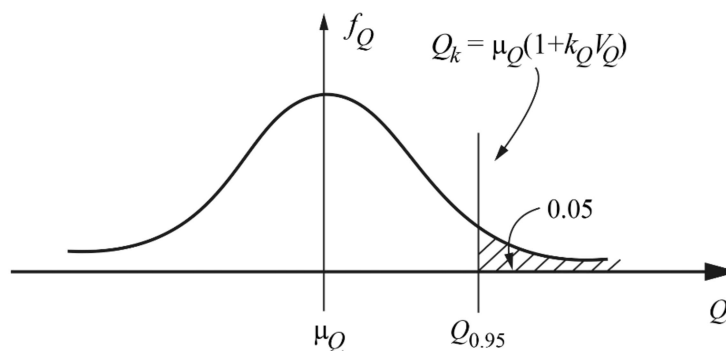
2.7. att. Raksturīgās pretestības definīcija.

Līdzīgi tiek aprakstīta raksturīgā slodze, tikai vidējās vērtības “augšējā pusē” (2.8. att.):

$$S_k = \mu_S (1 + k_S V_S), \quad (2.17.)$$

kur S_k – raksturīgā slodzes iedarbe;
 μ_S – vidējā slodzes vērtība;
 V_S – variācijas koeficients slodzei;
 k_S – konstante.

Ja tiek noteikts, ka projektējamās vērtības nedrīkst pārsniegt 95% no pieliktajām slodzes vērtībām, tad $k_S = 1.645$, ja slodzei S ir normālsadalījuma izkliedes raksturs.



2.8. att. Raksturīgās slodzes definīcija.

2.2.3. Drošuma mainīgie lielumi

Drošuma teorijā raksturlielumi, kas raksturo konstrukcijas uzvedību, tiek saukti par galvenajiem mainīgajiem un tiek apzīmēti ar $X = (X_1, \dots, X_n)$, kur n ir stohastisks galveno mainīgo skaits. Galveno mainīgo lielumu piemēri ir slodzes, iedarbes, izmēri, materiālu raksturotāji, to skaits utt. Stohastisko procesu var definēt kā laika nejaušo funkciju, tādā veidā, ka jebkurā konkrētā brīdī stohastiskā procesa vērtība ir nejaušs mainīgais lielums.

Papildus tam, ka šie mainīgie ir stohastiski, ir jāņem vērā arī katra mainīgā nenoteiktību, kuru arī modelē ar stohastiski mainīgiem lielumiem.

Izšķir šāda veida nenoteiktības [30]:

- fiziskā nenoteiktība jeb raksturīgā nenoteiktība, kas ir saistīta ar raksturlielumu dabisko nejaušību, piemēram, tecēšanas robežvērtības nenoteiktība produkcijas mainīguma dēļ (t. i. nav divu absolūti vienādu elementu);
- mērījumu nenoteiktība, kas ir saistīta ar mērījumu kļūdām, piemēram, veicot ģeometriskos izmēru mērījumus, dēļ mērinstrumentu kļūdas un mērījumu metodoloģijas starp mērījumiem ir noteikta izkliede;
- statistiskā nenoteiktība, kas ir saistīta ar nenoteiktību, kas tiek pieņemta noteikta apjoma līdzīgiem elementiem, balstoties un ierobežotu paraugu apjomu;
- modeļa nenoteiktība, kas ir saistīta ar ierobežotajām zināšanām par modeļa uzvedību vai izmantotās matemātisko modeļu idealizācijas vai nenoteiktības attiecībā uz stohastisko mainīgo varbūtības sadalījuma funkcijas veidu.

Ne vienmēr ir iespējams izvēlēties galvenos mainīgos, lai tie būtu neatkarīgi. Piemēram, spiedes un stiepes stiprība betonā un elastības modulis ir savstarpēji atkarīgi, tomēr konkrētā analīzē katrs tiek uzskatīts par neatkarīgu, kā pamatparametrs [31]. Atkarība starp mainīgajiem lielumiem palielina drošuma analīzes sarežģītību. Ir svarīgi, lai atkarības sistēma starp atkarīgiem mainīgajiem lielumiem ir zināma un izsakāma noteiktā formā. Parasti to veic ar korelāciju matricas palīdzību, tomēr jāņem vērā, ka tas sašaurina patieso informāciju.

Varbūtības sadalījumi, kas jāpiešķir pamata mainīgajiem lielumiem, ir atkarīgi no zināšanas, kas ir pieejama par konstrukciju. Ja var pieņemt, ka iepriekšējie novērojumi un pieredze līdzīgām konstrukcijām ir izmantojama attiecībā uz apskatāmo konstrukciju, tad ar noteiktu varbūtības sadalījumu šo informāciju var izmantot. Parasti gan tiek izmantota subjektīva informācija kopā ar dažādu metožu kombināciju. Tādējādi praksē subjektīva ietekme vienmēr ir klātesošā, un ļoti reti ir pieejami pietiekami dati, lai viennozīmīgi identificētu tikai vienu sadalījumu kā vispiemērotāko. [32]

Dažreiz ieteicams izmantot fiziskas pārbaudes, lai izvēlētos atbilstošu nenoteiktības sadalījumu. Šis ir ļoti populārs veids, kas tiek piemērots, piemēram tērauda spiedes stiprības (stiprības robežas) un siju vai lokšņu lieces stiprība (arī stiprības robeža) noteikšanai. [33] Citā publikācijā, piemēram, maksimālais vēja ātrums gadā tiek reprezentēts ar Gumbela sadalījumu, kā pamatā ir vēja fenomens, tomēr to jebkurā momentānā punktā vienlaikus var uzskatīt arī kā varbūtības normālsadalījumu [34].

Izkliedes robežvērtības var novērtēt ar statistikas metodēm. Šādas metodes ir pieejamas daudzās publikācijās, bet netieši arī tiek uzsvērts, ka vienmēr nepieciešama kritiska datu un pieņēmumu pārbaude.

2.2.4. Vispārināmā robežstāvokļu izteiksme

Kad jautājums ar galvenajiem mainīgajiem lielumiem un to varbūtības sadalījumiem ir atrisināts, nākamais solis ir aizstāt vienkāršoto R - S robežstāvokļa funkciju ar versiju, kas izteikta tieši ar mainīgajiem lielumiem [16]. Pieņemot, ka vektors X attēlo visus galvenos mainīgos. Tad pretestību R var izteikt kā $R = G_R(X)$ un slodzes vai slodzes iedarbes kā $S = G_S(X)$. Tā kā funkcijas G_R un G_S var būt nelineāras, kumulatīvā sadalījuma funkcija, piemēram, F_R ir jāiegūst, vairākkārt reizinot attiecīgo galveno mainīgo integrāļus (sk. 2.18):

$$F_R(r) = \int_r \dots \int f_X(x) dx \quad (2.18.)$$

Izsakot robežstāvokļa funkciju ar $G(X)$, (2.5) izteiksmi var izteikt:

$$p_f = P[G(X) \leq 0] = \int \dots \int_{G(X) \leq 0} f_X(x) dx, \quad (2.19.)$$

kur $f_X(x)$ – kopīgā varbūtības blīvuma funkcija mainīgā lieluma X n -dimensiju vektoram.

Ņemot vērā, ka pretestība R un slodzes iedarbe S nav parādīti izteiksmē – tie ir netieši norādīti X . Turklāt, pat, ja X tiktu atdalīti, R un S var neparādīties izteiksmē, un tie var tikt attēloti ar mainīgajiem, kur sastāvā tie ir ietverti. Ja visi galvenie mainīgie ir neatkarīgi, formulējums (2.19) ir vienkāršojams:

$$f_X(x) = \prod_{i=1}^n f_{X_i}(x_i) = f_{X_1}(x_1) \cdot f_{X_2}(x_2) \cdot f_{X_3}(x_3) \dots \quad (2.20.)$$

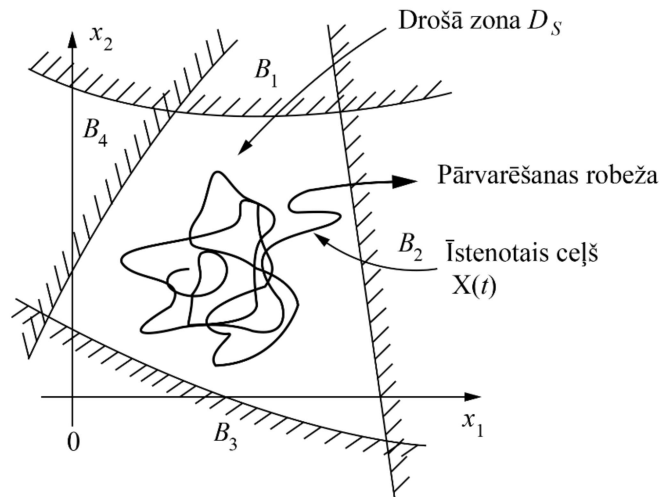
Vispārīgajā gadījumā gan konstrukcijas stiprība, gan arī slodzes uz tās mainās laikā. Ēkām un sistēmām, kurās uzturas cilvēki un kurām jānodrošina augsts drošuma līmenis, konstrukcijas bojājuma varbūtība tiek novērtēta tieši no pirmā bojājuma varbūtības. To iegūst no varbūtības, ka process $S(t)$ atstāj drošu zonu D_S konstrukcijas nominālajā kalpošanas laikā $[0, L]$ (sk. 2.9. attēlu). Šo var izteikt ar izteiksmi:

$$p_f(t) = P[R(t) \leq S(t)] \quad \forall (t \in [0 - t_L]), \quad (2.21.)$$

kur $[0, L]$ apzīmē konstrukcijas kalpošanas laiku vai citu interešu periodu;

$R(t)$ - konstrukcijas pretestība laikā;

$S(t)$ - slodzes iedarbes process.



2.9. att. Drošas zonas D_s pārvarēšana divdimensiju telpā x .

Kopumā no laika atkarīgā drošuma novērtējuma teorija ir strauji attīstījusies, lai gan dažos aspektos tā nav tik pilnvērtīga kā no laika neatkarīgā drošuma novērtēšanas teorija. No laika atkarīgā drošuma novērtēšanā plaši izmanto uz simulācijām balstītas pieejas, ja ir iespējams noteikt drošās zonas D_s (skat. att. 2.9.) pārvarēšanas biežumu.

Integrālā $G(X) \leq 0$ (2.19) reģions apzīmē (*hiper*) telpu, kurā tiek pārkāpts robežstāvoklis. Tas ir tieši analogs 2.3. attēlā parādītajai bojājuma dominancei D . Tomēr, izņemot dažus īpašus gadījumus, integrāli bojājuma laukam $G(X) \leq 0$ nevar atrisināt analītiski.

Tomēr izteiksmi (2.19) var padarīt efektīvāku, izmantojot divas dominējošās pieejas:

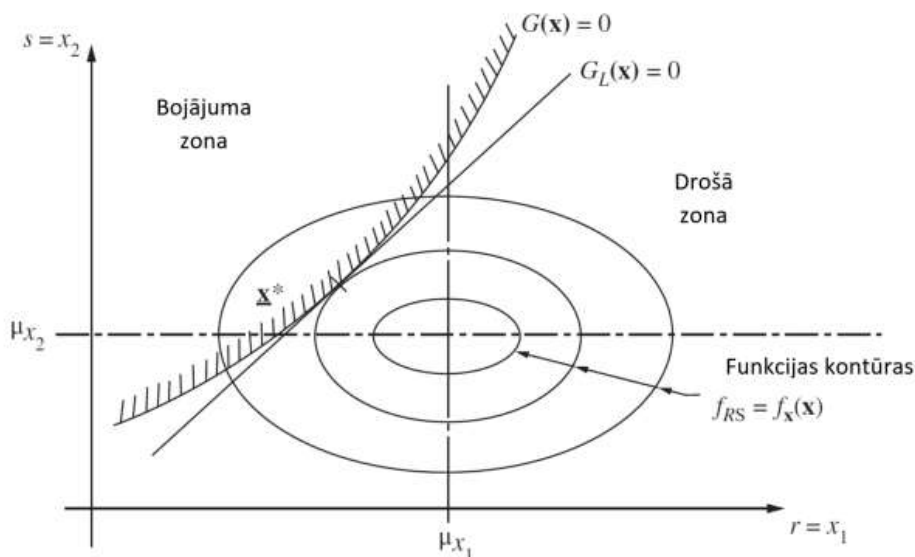
- izmantojot skaitliskas (matemātiskas) aproksimācijas jeb simulācijas (tā sauktās “*Monte Karlo*” metodes);
- pilnībā īstenojot izteiksmi, pārveidojot $f_X(x)$ (2.20) funkciju kā multinormālsadalījuma funkciju, lai noteiktu bojājuma varbūtību ar tā saukto “tuvinājuma” metožu palīdzību (FORM, SORM utt.).

2.2.4. Robežstāvokļu transformācija

Robežstāvokļu funkcija $f_X(x)$ ir nelineāra, tomēr jau kopš pagājušā gadsimta eksistē matemātiskie modeļi, kā šo funkciju aprakstīt [16]. Šie modeļi pamatā balstās uz iteratīvām metodēm, kad ar matemātisku algoritmu bojājumu robežstāvokļa funkcija tiek aprakstīta pietiekami precīzi, tādējādi izmantojot tos drošuma aprēķinus. Drošuma teorijā tiek lietotas Pirmā tuvinājuma drošuma metodes FORM (First Order Reliability Method) un Otrā tuvinājuma drošuma metodes SORM (Second Order Reliability Method).

Šo metožu būtība ir balstīta uz visu to mainīgo kopīgu varbūtības sadalījumu, kas ietekmē bojājumu vai izdzīvošanu, ieskaitot tos mainīgos, kas izraisa bojājuma pieprasījumu (slodzes) un tos, kas tos ierobežo (stiprība). Šī n -dimensiju varbūtības telpa ir aprakstāma ar funkciju, ko drošuma teorijā sauc par G -funkciju (skat att. 2.10). Pirmajā tuvinājumā nelineārā drošumu raksturojošā funkcija tiek transformēta kā lineāra funkcija, ar mērķi noteikt tuvāko attālumu

līdz kritiskajam punktam, kurš raksturo drošumu. Savukārt otrajā tuvinājumā nelineārā drošumu raksturojošā funkcija tiek transformēta kā hiperbola (kvadrātiska funkcija), lai ar to pēc iespējas tuvāk raksturotu nelineāro drošuma funkciju.



2.10. att. Robežstāvokļa funkcija $G(x) = 0$ ar galvanajiem mainīgajiem un tās linearizētā versija $G_L(x) = 0$ punktā x^* .

2.3. Konstrukcijas drošuma raksturotājs β

Kā jau minēts iepriekš (vienādojums (2.13)), konstrukcijas bojājuma varbūtība mūsdienās tiek raksturota ar drošuma indeksu. Konstrukcijas drošuma nosacījumi attiecīgi tiek izteikti kā atbilstošā konstrukcijas sabrukuma iestāšanās varbūtība P_f jeb pieņemamais minimālais konstrukciju drošuma indekss β , ko iepriekš minētajā tehniskajā literatūrā definē kā konstrukcijas drošuma raksturotāju.

Konstrukciju drošumu raksturotājs jeb konstrukciju drošuma indekss β raksturo pieļaujamo bojājuma iestāšanās varbūtību noteiktā laika periodā un to nosaka:

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f), \quad (2.22.)$$

kur Φ^{-1} ir apgriezta standartizēta normālā sadalījuma funkcija.

Dažādu valstu būvnormatīvos tiek minētas mērķa drošuma indeksa vērtības gan jaunām konstrukcijām, gan esošām konstrukcijām [2]. Jaunu konstrukciju gadījumā mērķa drošums nosaka, kādus parciālos koeficientus jāizmanto projektēšanā [35]. Piemēram, izmantojot parciālos koeficientus, kuru skaitliskās vērtības piedāvā Eirokodeksa normatīvās bāzes materiāli [36], tiek nodrošināts, ka konstrukcijām ar definēta seku klasi CC2 50 gadu kalpošanas laikā drošuma indeksam β ir jābūt ne zemākam kā 3.8.

Šajā gadījumā ir iespējams reversi noteikt analītisku izteiksmi nepieciešamajiem parciālajiem koeficientiem γ_m un γ_f . Pretestības pusē vissvarīgākais mainīgais ir materiālu stiprība, kas lielākajā daļā gadījumu tiek izteikta ar Gausa vai lognormālo sadalījumu. Šajā gadījumā piemērotas izteiksmes parciālajam koeficientam γ_m ir šādas:

$$\gamma_m = \frac{X_k}{X^*} = \frac{\mu_x(1 - 1.645 \cdot \delta_x)}{\mu_x(1 - \alpha_R \cdot \beta \cdot \delta_x)} \quad \text{Gausa sadalījums} \quad (2.23.)$$

$$\gamma_m = \frac{X_k}{X^*} = \frac{\mu_x \cdot \exp(-1.645 \cdot \delta_x)}{\mu_x \cdot \exp(-\alpha_R \cdot \beta \cdot \delta_x)} \quad \text{Lognormālais sadalījums,} \quad (2.24.)$$

kur δ_x ir materiālu īpašību nenoteiktības koeficients.

Attiecībā uz iedarbju efektu pusi patstāvīgās un mainīgās iedarbes tiek vērtētas atsevišķi. Patstāvīgajām iedarbēm G parciālais koeficients var tikt noteikts statistiski no sadalījuma, Pieņemot Gausa sadalījumu, parciālais koeficients nelabvēlīgo iedarbju efekta gadījumā tiek noteikts sekojoši:

$$\gamma_g = \frac{G^*}{G_k} = \frac{\mu_G(1 - \alpha_E \cdot \beta \cdot \delta_G)}{\mu_G(1 + k \cdot \delta_G)}, \quad (2.25.)$$

kur δ_G ir iedarbju nenoteiktības koeficients.

Vērtība $k=0$ tiek pieņemta patstāvīgajām iedarbēm (t.i. vidējā vērtība tiek izvēlēta kā raksturojošā vērtība).

Labvēlīgo iedarbju gadījumā pastāvīgajām iedarbēm parciālo koeficientu nosaka:

$$\gamma_g = \frac{G^*}{G_k} = \frac{\mu_G(1 - \alpha_{E,fav} \cdot \beta \cdot \delta_G)}{\mu_G(1 + k \cdot \delta_G)}, \quad (2.26.)$$

kur $\alpha_{E,fav}$ ir 0.32.

Mainīgām iedarbēm Q sekojoši tiek noteikts parciālais koeficients γ_q :

$$\gamma_q = \frac{Q^*}{Q_k} = \frac{F_{Q,tref}^{-1}[\Phi(-\alpha_{E,fav} \cdot \beta \cdot \delta_Q)]}{Q_k}, \quad (2.27.)$$

kur $F_{Q,tref}^{-1}$ ir apgriezts maksimums sadalījumam laika intervālā t_{ref} .

Piemēram, klimatiskajām iedarbēm, ja:

- sadalījuma maksimums references periodā t_0 ir aprakstīts ar Gumbela sadalījumu;
- raksturojošā iedarbes vērtība tiek noteikta kā 98-ā fraktile sadalījuma maksimumam pamata laika references periodā t_0 ;
- savstarpēji neatkarīgs sadalījuma maksimums ir laika references periodā t_0 ,

parciālais koeficients γ_q tiek noteikts:

$$\gamma_q = \frac{\mu_{Q,tref} [1 - \delta_{Q,tref} (0.45 + 0.78 \ln(-\ln(\Phi^{-1}(-\alpha_E \cdot \beta))))]}{\mu_{Q,t0} [1 - \delta_{Q,t0} (0.45 + 0.78 \ln(-\ln(0.98)))]} \quad (2.28.)$$

Esošu konstrukciju gadījumā ir valstis, kur minimālā mērķa drošuma indeksa vērtība ir noteikta zemāka salīdzinoši ar jaunām konstrukcijām, piemēram, Holandē [37]. Lai arī lietošanā esošām konstrukcijām drošuma sakarā nevajadzētu ievērojami atšķirties salīdzinājumā ar jaunām konstrukcijām, tomēr salīdzinot ar jaunām konstrukcijām, šeit ir jāņem vērā šādi faktori [38]:

- konstrukcijas reālais kalpošanas laiks,
- zināšanu līmenis (normatīvi, metodes),
- iespējas izmainīt drošuma līmeni (izmaksas),
- iespējamā sabrukuma sekas,
- sociāli-ekonomiskie un kultūrvēsturiskie apsvērumi.

Tabulā 2.1. ir apkopotas mērķa drošuma indeksa vērtības esošu konstrukciju sakarā, ko piedāvā starptautiskais standarts ISO 13822 [25]. Atlikušais kalpošanas laiks tiek noteikts esošas konstrukcijas novērtēšanas brīdī lietojamības robežstāvoklī un noguruma gadījumā. Mazāks periods var tikt pieņemts nestspējas jeb drošības robežstāvoklim. Šīs vērtības ir iegūtas izmantojot lognormālo vai Veibula (*Weibull*) sadalījumu pretestībai, normālo sadalījumu pastāvīgām slodzēm un Gumbela (*Gumbel*) modeli mainīgām slodzēm.

2.1. tabula

Mērķa drošuma indeksa β vērtības esošām konstrukcijām

Robežstāvoklis	Mērķa drošuma Indeks β	Periods
Lietojamības		
Atgriezenisks	0.0	Atlikušais kalpošanas laiks
Neatgriezenisks	1.5	Atlikušais kalpošanas laiks
Nogurums		
Nosakāms	2.3	Atlikušais kalpošanas laiks
Nenosakāms	3.1	Atlikušais kalpošanas laiks
Nestspējas		
Ļoti zemas sabrukuma sekas	2.3	<i>LS</i> gadi
Zemas sabrukuma sekas	3.1	<i>LS</i> gadi
Vidējas sabrukuma sekas	3.8	<i>LS</i> gadi
Augstas sabrukuma sekas	4.3	<i>LS</i> gadi
<i>LS</i> - minimālais drošuma periods (piem., 50 gadi)		

Tabulā 2.2. norādītas mērķa drošuma indeksa vērtības konstrukciju novērtēšanai, ko piedāvā standarts ISO 2394 [24], ņemot vērā relatīvās drošuma izmaksas un sabrukuma sekas.

2.2. tabula

ISO 2394 noteiktās mērķa drošuma indeksa β vērtības

Relatīvās drošuma izmaksas	Sabrukuma sekas			
	mazas	nelielas	vidējas	lielas
Augstas	0	1.5 (A)	2.3	3.1 (B)
Vidējas	1.3	2.3	3.1	3.8 (C)
Zemas	2.3	3.1	3.8	4.3

A: Lietojamības robežstāvoklim $\beta = 0$ atgriezenisks gadījums, $\beta = 1.5$ – neatgriezenisks gadījums; B: Noguruma gadījumā $\beta = 2.3 \dots \beta = 3.1$, atkarībā no noteikšanas iespējas; C: Nestspējas robežstāvoklī izmantot drošuma klasēm atbilstošus drošuma koeficientus $\beta = 3.1$, $\beta = 3.8$, $\beta = 4.3$.

Tabulā 2.3. norādītas mērķa drošuma indeksa vērtības, ņemot vērā relatīvās drošuma izmaksas un sabrukuma sekas, viena gada periodam, nestspējas robežstāvoklim [39].

2.3. tabula

JCSS noteiktās mērķa drošuma indeksa β vērtības

Relatīvās drošuma izmaksas	Sabrukuma sekas		
	nelielas	vidējas	lielas
Augstas	3.1	3.3	3.7
Normālas	3.7	4.2	4.4
Zemas	4.2	4.4	4.7

Tehniskās literatūras avotos un pētījumos minētas arī citas mērķa drošuma indeksa β vērtības. M. Sykora un M. Holický publikācijā piedāvā divus mērķa drošuma līmeņus [40]. Minimālā vērtība β_0 raksturo drošuma līmeni (mērķa drošumu), zem kura konstrukcija ir uzskatāma par nedrošu un ir nepieciešama tās atjaunošana. Otra vērtība β_{up} raksturo optimālo līmeni, kurš būtu jāsasniedz, atjaunojot konstrukcijas. Tabulā 2.4. apkopots mērķa drošuma indeksa vērtību salīdzinājums.

2.4. tabula

Mērķa drošuma indeksa β vērtību salīdzinājums ($t_{ref} = 15$ gadi)

Standarts, metode	Seku klase			
	CC1*	CC1**	CC2	CC3
EN 1990	3.6	3.6	4.1	4.6
ISO 13822	2.3/3.1***	2.3/3.1***	3.8	4.3
ISO 2394***	1.3/2.3***	1.3/2.3***	3.1	3.8
NEN 8700	1.8	1.8	2.5	3.3
Cilvēku drošība β_{hs}				
A_{col} – mazs,	-	2.2	3.0	3.4
A_{col} – liels vidējs	-	2.2	3.5	4.2
Optimizācija β_0	0.7-1.2	0.7-1.2	1.4-1.9	1.9-2.2
Optimizācija β_{up}	-	-	2.6*****	2.6-2.9

* Cilvēku drošība nav apdraudēta, ** cilvēku drošība apdraudēta, *** nelielas sabrukuma sekas, **** vidējas relatīvās drošuma izmaksas, ***** ja $c_t = 20$.

Hellebrandt, L., Steenbergen, R., Vrouwenvelder, T savā pētījumā piedāvā divas drošuma indeksa β mērķa vērtības [41]. Pirmkārt, zemākā vērtība, kad konstrukcija jāuzskata par nedrošu un to vairs nevar izmantot: $\beta_u = \beta_n - \Delta\beta = \beta_n - 1,5$. Otrā vērtība ir dota kā mērķis pārbūvju gadījumiem: $\beta_r = \beta_n - \Delta\beta = \beta_n - 0,5$. Pārbūvju gadījumiem samazinošā vērtība $\Delta\beta = 0,5$ ir vidējā starpība, kāda veidojusies, ja konstrukcija projektēta pēc veciem standartiem un Eirokodeksā noteikto drošuma līmeni.

Tabulā 2.5. dotas minimālās mērķa drošuma indeksa vērtības atbilstošajām seku klasēm, ja tiek ņemts vērā cilvēku drošums 1 gada periodam un 15 gadiem.

2.5. tabula

Minimālās mērķa drošuma indeksa β vērtības

Seku klase	1 gada periods	15 gadu periods
1	2.3	1.1
2	3.4	2.5
3	4.0	3.3

Tabulā 2.6. norādītas mērķa drošuma indeksa vērtības atbilstošajām seku klasēm, pie minimālajiem laika periodiem. Dotas vērtības trīs konstrukciju gadījumiem – jaunai, pārbūves gadījumam un nedrošai konstrukcijai, kā arī divām aprēķinu situācijām – kad vējš ir vai nav dominējošs parametrs.

2.6. tabula

Nepieciešamās β vērtības minimālajiem laika periodiem

Seku klase	Minimālais periods	β_n		β_r		β_u	
		wn	wd	wn	wd	wn	wd
1A	1 gads	3.3	2.3	2.8	1.8	1.8	0.8
1B	15 gadi	3.3	2.3	2.8	1.8	1.8	1.1*
2	15 gadi	3.8	2.8	3.3	2.5*	2.5*	2.5*
3	15 gadi	4.3	3.3	3.8	3.3*	3.3*	3.3*

β_n – drošuma indekss jaunai konstrukcijai; β_r – drošuma indekss pārbūves gadījumā; β_u – drošuma indekss, kad konstrukciju var uzskatīt par nedrošu; wn – vējš nav dominējošs; wd – vējš ir dominējošs;

* – šajos gadījumos minimālo vērtību nosaka cilvēku drošības faktors.

Eirokodeksos ir pieņēmums, ka konstrukcijas kalpošanas laika beigās tās darbības rādītājam (attiecīgi arī β vērtībai) nevajadzētu būt zemākai nekā tam, kas tiek sasniegts pie lietojamības robežstāvokļa [42].

Jāņem vērā, ka katram atsevišķajam konstrukciju elementam ir vairāki (pat virs 10) iespējamie bojājumu scenāriji. Tādēļ vispirms būtu nepieciešams novērtēt konstrukcijas drošumu attiecībā uz katru atsevišķā elementa atsevišķo bojājuma scenāriju, t.i. varbūtību, ka noteiktam elementam noteiktā laika periodā neiestāsies noteikts bojājums (nestspējas vai lietojamības), un tikai tad var spriest par visas būves konstrukcijas drošumu. Tabulā 2.7.

apkopots piemērs standarta metāla sijas eksperimentāli noteiktais drošuma indekss dažādiem bojājuma scenārijiem [9].

2.7. tabula

β vērtības atkarība no bojājuma rakstura

Nr.	Bojājuma raksturojums	Drošuma indekss β
1.	Tecēšanas robežvērtības sasniegšana vidus šķēlumā	4,11
2.	Sieniņas nestspējas zudums vidus šķēlumā	4,85
3.	Nestspējas zudums joslas loksnē	10,82
4.	Nestspējas zudums sieniņai malējā panelī	8,48
5.	Tecēšanas robežvērtības sasniegšana atbalsta punkta šķēlumā	6,77
6.	Tecēšanas robežvērtības sasniegšana šķēlumā mainīgajā daļā	9,95
7.	Lieces robežvērtības sasniegšana vidus šķēlumā	1,65

2.4. Konstrukciju sistēmas drošums

2.4.1. Konstrukciju sistēma

Vērtējot konstrukcijas, kas aptver vairāk nekā vienu apskatāmo robežvērtību, jāsaskaras ar visas konstrukciju sistēmas drošuma jautājumu. Pat vienkāršās konstrukcijās, kas sastāv tikai no viena elementa, var tikt piemēroti dažādi robežstāvokļi, piemēram, liecē, bīdē, vērpe, aksiālās slodzēs, deformācijās utt. Turklāt vairums konstrukciju sastāv no daudziem elementiem, kas šos robežstāvokļus ievērojami palielina. Šādu sistēmu literatūrā dēvē par “konstrukciju sistēmu” [14].

Visas konstrukcijas sistēmas drošums ir atkarīgs no tās atsevišķo elementu drošuma šādu iemeslu dēļ:

- iedarbes (slodzes rezultātā) uz dažādiem elementiem var tikt iegūtas no vienas vai vairākām kopējām slodzēm;
- slodzes un pretestības var nebūt neatkarīgas (piem., slodzes var būt saistītas ar elementu izmēru, un stiprība var būt saistīts ar iepriekš pieliktām slodzēm);
- starp dažādām konstrukcijas vietām var būt korelācija starp elementu īpašībām, piemēram, elementu stiprība un izturība;
- būvniecības izpildījums var ietekmēt īpašības atsevišķai elementu grupai.

Tāpat var pastāvēt robežstāvokļi tikai visai konstrukcijai kopā, nevis tās atsevišķiem elementiem (piemēram, globālās izlieces, pamatu sēšanās) un pašas konstrukcijas tehniskais risinājums var būt svarīgs. Tāpēc ir iespējams, ka konstrukciju sistēmu drošuma novērtējumā nepieciešams apsvērt vairākus un, iespējams, korelētos robežstāvokļus.

Reāla konstruktīvo sistēmu analīze pat statistiski noteiktā sistēmā var būt sarežģīts uzdevums. Parasti to atvieglo vienkāršošana un idealizācija katrā no modeļiem:

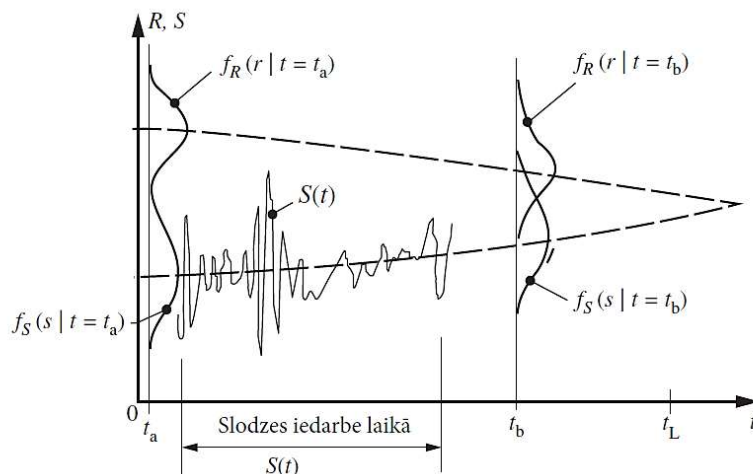
- modelējot atsevišķi pielikto slodžu un slodžu secību;
- modelējot materiālu reakcijas un stiprības raksturlielumus;
- modelējot konstrukcijas sistēmu ar tās sastāvdaļām un savienojumiem;
- modeļējot iespējamās bojājuma scenārijus

Veicot modelēšanu, parasti konstrukcijā tiek modelēta ar maksimāli pieļaujamo slodzes robežstāvokli, tomēr var būt gadījumi, kad citiem robežstāvokļiem var būt pat lielāka nozīme.

Tālāk šajā apakšnodaļā ir sniegtas atziņas no publikacijām par konstrukcijas un tās darbības idealizēšanu, kas nepieciešami globālās konstrukciju drošuma metodoloģijas izstrādē.

2.4.2. Slodžu modelēšana

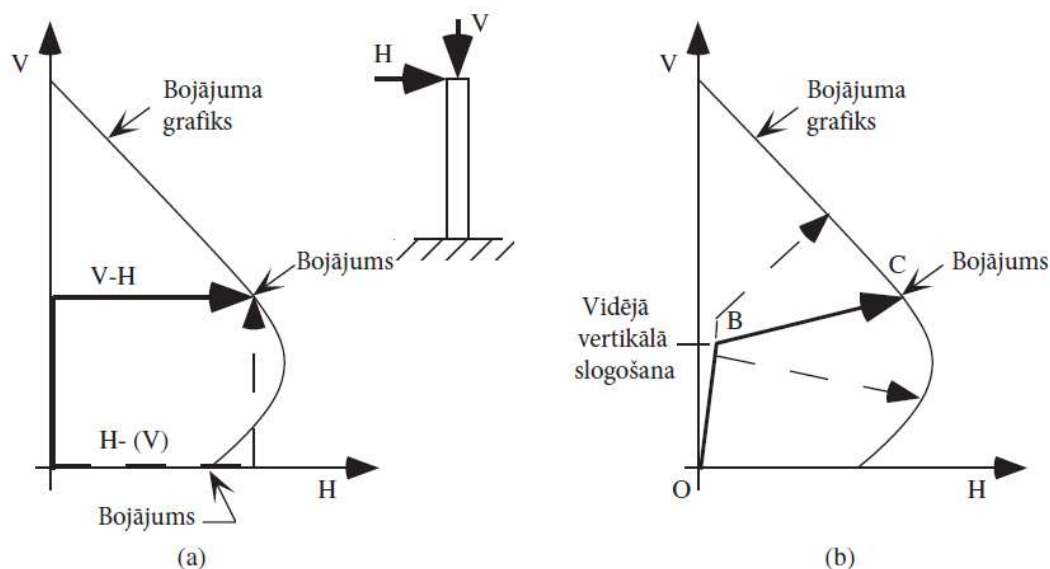
Kā iepriekš minēts, slodžu idealizācija pieļauj, ka ir tikai viena šāda slodze un ka konstrukcija tādēļ ir būtībā noslogota tikai vienu reizi. Protams, reālistisks slodzes process laikā ir citādāks (skat att. 2.11.). Ja tiek ievērtēts viss no laika atkarīgais slodzes modelis, ir iespējams, ka daļa no konstrukcijas var sasniegt lokāli nestspējas robežstāvokli, pirms tiek sasniegts vispārējais nestspējas robežstāvoklis. Tāpēc ir iespējams, ka konstrukcijas bojājumu scenārijs būs atkarīgs no precīza slogojuma scenārija. Protams, ja slogošana ir nejaušs process, tas nozīmē, ka ir neiespējami analizēt iespējamās slogošanas modeli un līdz ar to arī iespējamo bojājumu, padarot neiespējamu situācijas analīzi. Tāpat iespēja, ka vairāk nekā viens slogojuma scenārijs darbojas uz konstrukcijas sistēmu, arī palielina modelēšanas sarežģītības pakāpi.



2.11. att. Slodzes un konstrukcijas pretestības uzvedība laikā.

Šī jautājuma problemātiku literatūrā sauc par “atkarību no slogošanas ceļa”, kas norāda, ka daudzos gadījumos aplēstā scenārija varbūtība var būt atkarīga no ceļa, ko izsaka pielietoto slodzes procesu stohastiskais vektors.

Vienkāršots piemērs parādīts 2.12. attēlā (a) ar kolonu, kas tiek slogota ar vertikālo spēku V un horizontālo spēku H .



2.12. att. a) Vienkāršs slogošanas ceļa atkarības piemērs (horizontālā slodze, ko piemēro pirms vertikālās slodzes, rada atšķirīgu bojājuma scenāriju nekā lietojot slodzes apgrieztā secībā); b) Tipisks iekšējās darbības ceļš OBC daudzās reālistiskās konstrukcijās.

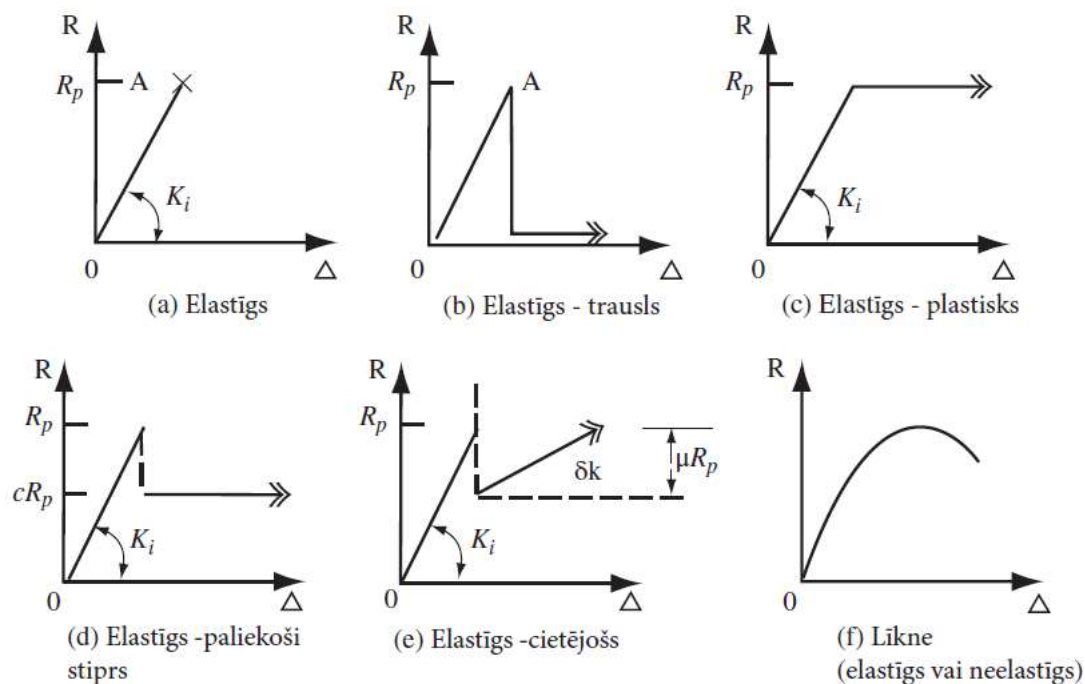
Ja kolonna tika slogota pirmo reizi ar noteiktu vertikālā spēka vērtību, kam seko pieaugošais horizontālais spēks H , slogošanas ceļš būtu $V-H$, kā parādīts attēlā. Tā kā H palielinās, galu galā, kas atzīmēts ar “bojājumu”, tiktu sasniegta kolonnas bojājuma līkne. Tomēr alternatīvais slogošanas ceļš $H-V$ nav iespējams tādām pašām bojājuma punktam, jo bojājuma līkne tiks sasniegta jau zemākā H vērtībā, pirms V pat tiktu pielikts.

Neskatoties uz iepriekš minētajiem novērojumiem, iespējams, ka daudzu praktisku konstrukciju gadījumā slogošanas ceļa problēma nav tik kritiska, kā šķiet pirmajā redzējumā. Daļēji tas ir saistīts ar iekšējo darbību kombināciju kritiskās vietās, kas nosaka iekšējo piepūļu ceļu uz kaut ko līdzīgu (2.12. attēlā (b)), kur OB ir pašsvara un ilgstošās mainīgās slodzes, un BC , kur rada papildus slogošana. Daļēji arī acīmredzamā nejutība pret ārējiem slogošanas ceļiem ir saistīta ar daudzām reālistiskām konstruktīvajām sistēmām, kas ir apzināti izstrādātas (saskaņā ar būvnormatīviem), lai nespētu pretoties plastiskiem bojājumiem, nevis trausliem. Šajā ziņā daudzu konstrukciju uzvedība tiecas tuvojties plastiskai uzvedībai, par kuru stinguma - plastiskuma teorija nodrošina abu konstrukcijas sistēmas uzvedības tuvināšanu [16].

Slodžu modelēšana gan reti tiek praktizēta konstrukciju sistēmas drošuma nodrošināšanai. Praksē galvenokārt slodzes tiek idealizētas jeb vienkāršotas kā laika ziņā neatkarīgi nejaušie mainīgie (t. i., kā nenoteiktas maksimālās slodzes, ko piemēro tikai noteiktā laika periodā).

2.4.3. Materiālu modelēšana

Faktiskās materiālās uzvedības sarežģītības dēļ konstruktīvajos pieņēmumos parasti tiek idealizēta (skat. att. 2.13.).



2.13. att. Dažādas stiprības - deformācijas (R - Δ) attiecības.

Ja viena slodze (vai viena pilnībā atkarīga slodzes sistēma) iedarbojas uz konstrukciju, tās elementu pārvietojumus var noteikt izmantojot atbilstošus būvmehānikas aprēķinus, piemēram, elastīgās deformācijas aprēķinu (2.13. (a) att.). Šim nolūkam izmanto noteiktas materiālu elastīgās īpašības un zināmos izmērus, kā dēļ ir pieņemami zemi variācijas koeficienti mainīgajiem lielumiem.

Elementa trausls bojājums ne vienmēr nozīmē konstrukcijas atteici, tās statistiskās nenoteicamības dēļ. Tāpēc faktisko elementu uzvedību var labāk modelēt kā “elastīgu-trauslu”, kas pieņem, ka deformācija pie nulles stiprības ir iespējama elementam pat pēc maksimālās slodzes sasniegšanas (2.13. (b) att.).

Elastīgā-plastiskā uzvedība (2.13. (c) att.) ļauj atsevišķiem elementiem vai konkrētiem konstrukciju apgabaliem saglabāt savu nestspēju pie maksimālā sprieguma, ko rada deformācija. Ja elastīga elementa stingums tuvojas bezgalībai (praktiski nedeformējas), tad idealizācija ir “stingi-plastiska”.

Pat neieviešot aprēķinos drošuma koncepciju, konstrukciju analīze ar att. 2.13. (e) un 2.13. (f) attēlotajām līknēm ir pietiekami sarežģīta.

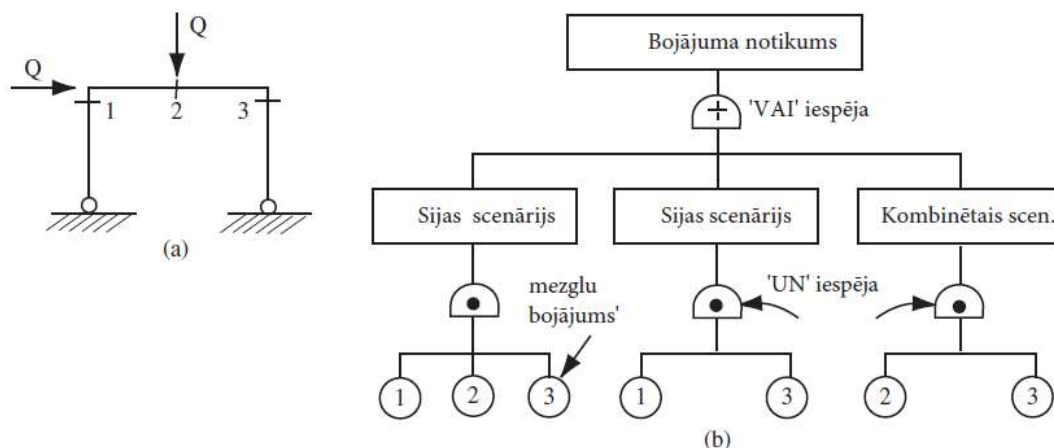
2.4.4. Konstrukcijas sistēmas modelēšana

Arī tradicionālajā determinētā konstrukciju analīzē faktiskā konstrukcija tiek idealizēta. Piemēram, rāmju konstrukcijās elementi ir idealizēti kā stieņi, savienojumi kā punkti, un kritiskie šķēlumi stiprības slodzes pārbaudei tiek idealizēti ar noteiktu skaitu iepriekš definētu punktu rāmī. Līdzīgi slodzes tiek modelētas kā punktveida slodzes vai izkliedētas slodzes. Ja

slodzes nav punktveida, nestspējas pārbaudēs kritiskie punkti var mainīties atkarībā no slodžu kombinācijas un intensitātes.

Ja ir identificēti visi konstruktīvas sistēmas bojājumu scenāriji, dažādus notikumus, kas veicina elementu bojājumu veidus, var sistemātiski uzskaitīt, izmantojot “bojājumu ceļa” koncepciju [16]. Bojājuma ceļa piemērs parādīts attēlā 2.14. (b) attiecībā uz 2.14. (a) konstrukciju.

Algoritms paredz veikt katra konstrukcijas sistēmas bojājuma analīzi un sadalīt to apakšnotikumos, kas tālāk tiek sadalīti. Zemākā apakšnotikumu ceļā konstrukcija atbilst atsevišķu elementu vai šķērsgrīzumu bojājumam. Šajā līmenī var rakstīt vietējā robežstāvokļa vienādojumus (ja ne agrāk). Bojājuma ceļa metodoloģija ir visbiežāk pielietota programmēšanā drošuma analīzei, nevis konstruktīvajās sistēmās, bet ir piemērojama arī konstruktīvajam drošumam [43]. Šīs metodes ierosina vienkāršot konstruktīvo sistēmu, piemēram, ierobežot iespējamo bojājumu veidu skaitu, t. i., konstruktīvajai sistēmai izstrādāto robežstāvokļu skaitu.



2.14. att. Bojājuma ceļa shēma.

Attiecībā uz stingru-plastisku konstrukciju sistēmām tradicionālā metode bojājumu režīma identifikācijai ir elementāru mehānismu kombinācija. Tos var iegūt sistemātiski, piemēram, izmantojot *Watwood* (1979) ierosināto algoritmu. Alternatīva ir arī izmantot algoritmu, kas nosaka visus sabrukšanas mehānismus (elementārus un kombinācijas), kā to ierosina *Gorman* (1981) [16].

Konstrukcijai ar vairākiem elementiem drošuma analīzē pielieto “bojājuma scenārija” pieeju un “izdzīvošanas scenārija” pieeju [17].

“Bojājuma scenārija” pieeja ir balstīta uz visu iespējamo konstrukcijas bojājuma scenāriju identifikāciju. Piemērs ir ideāls plastiskas konstrukcijas sabrukuma mehānisms. Katrs konstrukcijas bojājuma scenārijs parasti sastāv no elementa “bojājuma” secības (t. i., sasniedzot attiecīgā elementa robežstāvokli) līdz konstrukcija kopumā sasniedz robežstāvokli atbilstoši att. 2.13. a-e.

Iespējamos veidus, kādos tas varētu rasties, var attēlot ar “notikumu ceļu” (2.15. attēls) vai kā “bojājuma ceļu” (2.16. attēls). Katra bojājuma diagrammas atzarojums attēlo konstrukcijas locekļa atteici, un jebkurš pilnīgs virziens pa zariem, sākot no “neskartās konstrukcijas” mezgla

un noslēdzoties ar “bojājuma” mezglu, ir iespējamā elementa bojājumu secība. Šī informācija tiek nodota arī bojājumu ceļā.

Tā kā bojājums caur jebkuru bojājuma ceļu izraisa konstrukcijas bojājumu, notikums “konstrukciju bojājums” F_S ir visu iespējamo bojājumu veidu savienojums:

$$p_f = P(F_S) = P(F_1 \cup F_2 \cup \dots \cup F_m), \quad (2.29.)$$

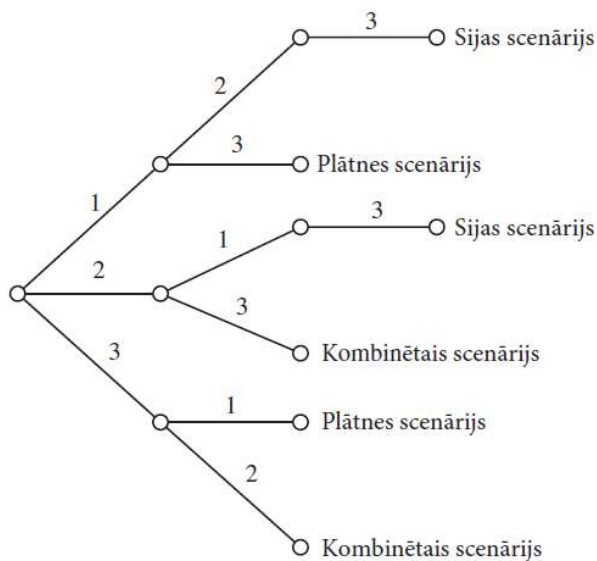
kur F_i ir “i-to režīmu bojājums”.

Katram šādam režīmam noteikts skaits elementu (vai konstruktīvo mezglu) tiks bojāti, tādējādi:

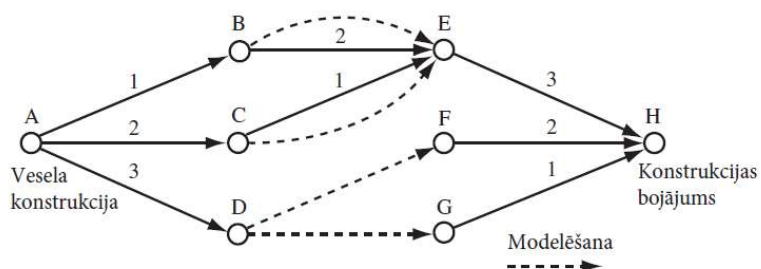
$$P(F_i) = P(F_{1i} \cap F_{2i} \cap \dots \cap F_{ni}), \quad (2.30.)$$

kur F_{ji} ir notikums “j locekļa bojājums i sabrukšanas režīmā”;

n_i apzīmē to elementu skaitu, kas nepieciešami, lai notiktu i. 2.13. attēlā (a) $m = 3$ bojājumu režīmi un $n_1 = 3$, $n_2 = 2$, $n_3 = 2$.



2.15. att. Notikuma ceļa shēma konstrukcijai att. 2.13 (a).



2.16. att. Bojājuma ceļa shēma konstrukcijai att. 2.13 (a).

Izdzīvošanas scenārija pieeja balstās uz to, lai identificētu dažādus stāvokļus (vai režīmus), saskaņā ar kuriem konstrukcija izdzīvo. 2.13. (a) konstrukcijai katrs no A, B, C, D, E, F, G (bet

ne H!) bojājuma ceļa diagrammā 2.15. attēlā attēlo šādu stāvokli (sk. arī 2.14.). Katram izdzīvošanas režīmam konstrukcija ir daļēji bojāta, bet joprojām spēj noturēt slodzi (t. i., tā joprojām ir statiski un ģeometriski ir stabila).

Konstrukcijas izdzīvošana tiek prasīta vismaz vienā izdzīvošanas režīmā, vai

$$p_s = P(S_s) = P(S_1 \cup S_2 \cup \dots \cup S_k), \quad (2.31.)$$

kur S_s ir notikums “konstrukcijas izdzīvošana”;

S_i notikums “konstrukcijas izdzīvošana i scenārijā”, $i = 1, \dots, k$.

Tādejādi:

$$p_f = P(\bar{S}_1 \cap \bar{S}_2 \cap \dots \cap \bar{S}_k), \quad (2.32.)$$

kur $\bar{S}_i$ ir notikums “konstrukcija neizdzīvo izdzīvošanas režīmā i”.

Protams, lai izdzīvotu kādā konkrētā izdzīvošanas režīmā, visiem elementiem, kas veicina šo izdzīvošanas režīmu, ir jāpaliek. Piemēram, izdzīvošana 2.15. att. B režīmā prasa elementam 3 izdzīvot. No tā izriet, ka nespēja izdzīvot noteiktā izdzīvošanas režīmā ir līdzvērtīga pietiekamam skaitam elementu, kas iesaistīti, vai

$$P(\bar{S}_i) = P(F_{1i} \cup F_{2i} \cup \dots \cup F_{li}), \quad (2.33.)$$

kur F_{ji} ir notikums “j daļībnieka atteice i-tajā izdzīvošanas režīmā”;

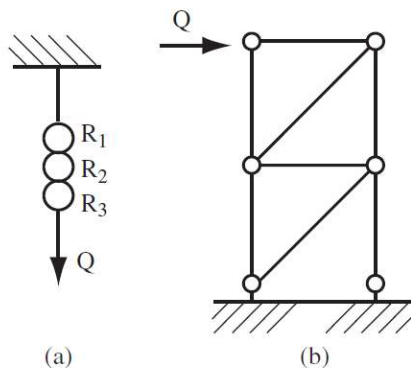
l_i reprezentē to elementu skaitu, kas nepieciešami, lai nodrošinātu i izdzīvošanas režīmu.

Izdzīvošanas režīms literatūrā ir plašāk apskatīts kā bojājumu režīma pieeja, iespējams, daļēji tāpēc, ka ir grūtības izdzīvošanas režīmu jēl kā apvienot un formulēt robežstāvokļa vienādojumā, daļēji arī tāpēc, ka rodas patiesi zemāka robeža, lai izpildītu izdzīvošanas režīma prasības.

Bojājumu modelēšana “virknes sistēmu” konstrukcijās

Sērijveida jeb virknes sistēmu raksturo ķēde un to sauc arī par “vājāka posma” sistēmu. Jebkura elementa robežvērtības sasniegšana nozīmē konstrukcijas bojājumu. Šai idealizācijai nav nozīmes elementu vai locekļu precīzajām materiālajām īpašībām. Ja elementi ir trausli, bojājumu izraisīs locekļa lūzums; ja elementi ir plastiski, bojājumu izraisīs pārrāvums. Acīmredzams, ka statiski noteicama konstrukcija ir virknes sistēma, jo jebkura tās elementa bojājums nozīmē konstrukcijas bojājumu. Tāpēc katra elementa bojājums ir iespējama bojājuma scenārijs. No tā izriet, ka sistēmas bojājuma varbūtība raksturo posma konstrukcija, kas sastāv no m locekļiem [20]:

$$p_f = P(F_1 \cup F_2 \cup F_3 \cup \dots \cup F_m) \quad (2.34.)$$



2.17. att. Virknes sistēmas piemērs.

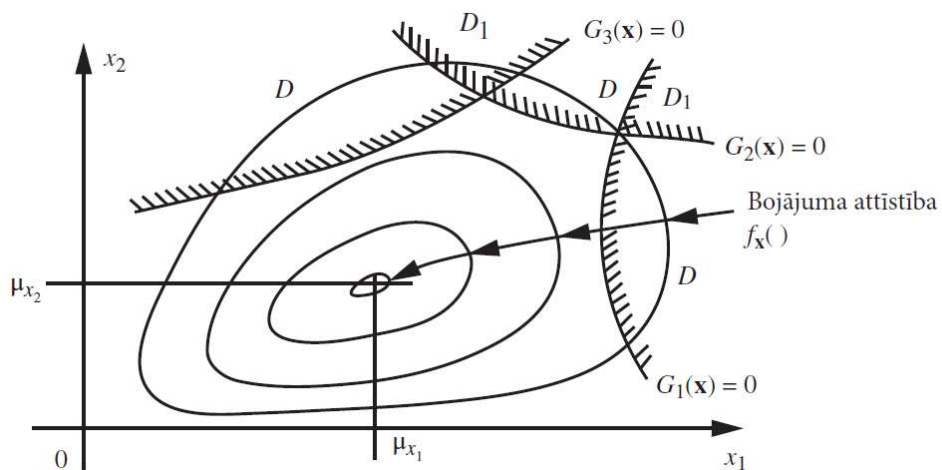
2.17. (a) attēlā ķēdē slodzes S iedarbe katrā ķēdes posmā ir identiska slodzei Q . Ja $F_{Ri}(r)$ ir kumulatīvā sadalījuma funkcija i -saites stiprībai, tad kumulatīvā sadalījuma funkcija F_R ķēdei kopumā ir:

$$F_{R(r)} = P(R \leq r) = 1 - P((R > r) = 1 - P(R_1 > r_1 \cap R_2 > r_2 \cap \dots \cap R_m > r_m) \quad (2.35.)$$

Ja stiprības īpašības ir neatkarīgi mainīgie, tad izsakāms:

$$\begin{aligned} F_R(r) &= P(R \leq r) = 1 - [1 - F_{R_1}(r_1)] \cdot [1 - F_{R_2}(r_2)] \dots = \\ &= 1 - \prod_{i=1}^m [1 - F_{R_i}(r_i)] \end{aligned} \quad (2.36.)$$

Šis algoritms drošuma teorijā tiek izmantoti otrās kārtas tuvinājumu aprēķinos (FORM).



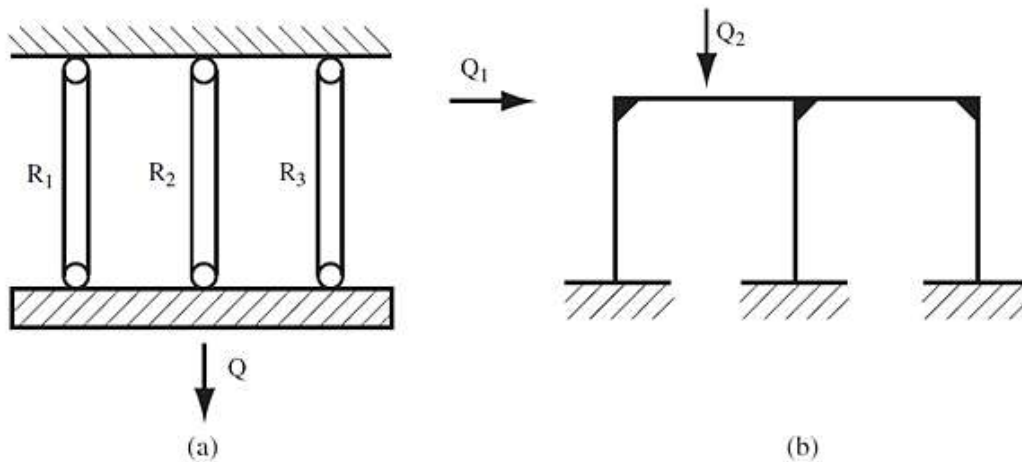
2.18. att. Konstrukciju sistēmas drošuma problēma divdimensiju plaknē ar bojājumu D un D_1 robežām.

Bojājumu modelēšana “paralēlas sistēmas” konstrukcijās

Ja elementi konstruktīvajā sistēmā (vai apakšsistēmā) darbojas vai ir savstarpēji savienoti tā, ka robežstāvokļa sasniegšana vienā vai vairākos elementos ne vienmēr nozīmē visas sistēmas bojājumu, tiek uzskatīts, ka sistēma ir “paralēla” vai “nodrošinātā” sistēma. Divas vienkāršas paralēlas sistēmas ir attēlotas 2.19. attēlā.

Nodrošinājums sistēmās var būt divu veidu. “Aktīvais nodrošinājums” notiek, kad nodrošinātājelements (-i) piedalās konstrukcijas uzvedībā pat pie zemas slodzes. “Pasīvais (vai rezerves) nodrošinājums” notiek tad, kad nodrošinātājelements (-i) nepiedalās konstrukcijas uzvedībā līdz brīdim, kad konstrukcija ir pietiekami pakļauta tās elementu degradācijai vai bojājumam.

Vai aktīvajai nodrošināšanai ir priekšrocības, ir atkarīgs no konstrukcijas elementu uzvedības īpašībām un to, kā bojājums ir definēts. Ideālām plastiskām sistēmām “statikas teorija” garantē, ka aktīvā nodrošināšana nevar samazināt konstrukcijas sistēmas drošumu [18]. Tādējādi tai ir priekšrocības.



2.19. att. Paralēlās sistēmas piemērs.

Ar aktīvo nodrošināšanu n komponentes paralēlas (apakš) sistēmas bojājuma varbūtība ir izteikta ar:

$$p_f = P(F_s) = P(F_1 \cap F_2 \cap \dots \cap F_n), \quad (2.37.)$$

kur F_n ir “ n elementa bojājums”.

No tā izriet, ka vienādojums (2.37) ir līdzvērtīgs vienādojumam (2.32), un to var attēlot x telpā ar:

$$p_f = \int_{DI \in X} \dots \int f_X(x) dx \quad (2.38.)$$

Pretstatā situācijai virknes sistēmās, paralēla sistēma var tikt bojāta tikai tad, ja visi tās nodrošināšanu veicošie elementi ir sasnieguši savus robežlielumus. Tas nozīmē, ka sistēmas elementu uzvedības raksturlielumi ir ļoti svarīgi, lai noteiktu sistēmas bojājumus. Gadījumos, ja nepieciešams verificēt vai pieņēmumi atrodas noteiktās robežās, ieteicams izmantot “korelācijas matricas”. Šajā gadījumā ņem vērā “otrās kārtas notikumus”, t. i. scenāriju

šķēlumus $P(F_i \cap F_j)$. To var izdarīt, ja zināmas korelācijas starp šiem scenārijiem (stāvokļiem). Tā kā mums šāda informācija nav zināma, varam izmēģināt dažādas korelācijas koeficientu ρ_{ij} vērtības.

Otrās kārtas robežas varbūtībai $P(F)$ aprēķina pēc vienādojumiem [16]:

$$P(F) \geq P(F_1) + \sum_{i=2}^m \max \left\{ \left[P(F_i) - \sum_{j=1}^{i-1} P(F_i \cap F_j) \right], 0 \right\} \quad (2.39.)$$

vai

$$P(F) \leq \sum_{i=1}^m P(F_i) - \sum_{i=2}^m \max_{j < i} [P(F_j \cap F_i)] \quad (2.40.)$$

Otrās kārtas tuvinājumiem nepieciešams aprēķināt varbūtības $P(F_i \cap F_j)$, ko atrod, izmantojot šādu izteiksmi [16]:

$$L(h, k, \rho) \equiv \frac{1}{2\pi} (1 - \rho^2)^{-1/2} \int_h^\infty \int_k^\infty \exp \left[-\frac{\frac{1}{2}(u^2 + v^2 - 2\rho uv)}{1 - \rho^2} \right] dudv \quad (2.41.)$$

kur

ρ – korelācijas koeficients (0-1);

h – novirzes raksturotājs nejauši mainīgam raksturlielumam (pretestība) $\frac{x_1 - \mu_{x_1}}{\sigma_{x_1}}$

k – novirzes raksturotājs nejauši mainīgam raksturlielumam (iedarbes) $\frac{x_2 - \mu_{x_2}}{\sigma_{x_2}}$

u – kovariācijas raksturotājs (pretestībai) $\frac{1}{(1-\rho)^{1/2}} \left(\frac{x_1 - \mu_{x_1}}{\sigma_{x_1}} - \frac{\rho (x_2 - \mu_{x_2})}{\sigma_{x_2}} \right)$,

v – kovariācijas raksturotājs (pretestībai) $\frac{x_2 - \mu_{x_2}}{\sigma_{x_2}}$

Šie algoritmi drošuma teorijā tiek izmantoti otrās kārtas tuvinājumu aprēķinos (SORM).

2.4.5. Bojājumu simulācija ar matemātisko modelēšanu

Drošuma literatūrā [8-22] bojājumu varbūtības noteikšanai konstrukciju sistēmās tiek ieteikts izmantot Monte Carlo simulācijas, lietojot pirmās (FORM) un otrās (FORM) kārtas tuvinājumu metodes. Ņemot vērā, ka konstrukciju sistēmās nav zināmi atsevišķo elementu galējie robežstāvokļi, tie nav zināmi arī arī visai sistēmai. Vēl vairāk, nav arī zināmi scenāriji, kādā attīstīsies bojājumi konstrukciju sistēmās. Tomēr, izmantojot pirmās kārtas tuvinājumu metodi, ar matemātiskās modelēšanas paņēmieniem mēs varam samērā precīzi definēt robežas, kādā atrodas apskatāmās konstrukciju sistēmas robežstāvokļu funkcija, un definējot bojājumu scenārijus ar otrās kārtas tuvinājumu raksturot sistēmas bojājumu.

Kopumā bojājumu varbūtību sistēmās pirmajā tuvinājumā raksturo kopējā atsevišķo elementu bojājumu varbūtība:

$$P(F) = 1 - \prod_{i=1}^m [1 - P(F_i)] \quad (2.42.)$$

kur $P(F_i)$ - sabrukšanas varbūtība atsevišķam konstrukciju elementam.

2.5. Akceptējamais risks

Svarīgi apzināties, ka ne katrs konstrukcijas bojājums novedīs pie konstrukcijas nestspējas zuduma, un vēl vairāk, pie situācijas, kad bojājuma rezultātā cietīs cilvēki vai vide. Drošuma teorijā tiek pētītas arī sekas, kas iestājas pie noteiktiem bojājumiem.

Bojājums kombinācijā ar tā radītajām sekām drošuma teorijā tiek saukts par risku [48]. Ja risks ir saistīts ar konkrētās būves laicīgu nestspējas zudumu, tad tas var būt kā akceptējams risks. Ja risks ir tāds, ka tiek radīti draudi cilvēku dzīvībai vai veselībai, šāds risks nav akceptējams.

Diskusija par tehnoloģiju radītajiem riskiem un sabiedrības attieksmi pret tiem tika pagājušā gadsimta otrajā pusē. Viens no citējamākiem avotiem pēdējās dekādēs saistībā ar risku ir Stewart M. G.; Melchers R. E. publikācija par Inženiersistēmu varbūtisko riska novērtējumu [49], kur autori uzskatāmi runā par risku, kas sabiedrībai ir akceptējams un kas nav. Ņemot vērā, ka katru gadu pasaulē iet bojā vairāk cilvēku no smēķēšanas, nekā no ceļošanas ar auto vai būvdarbiem, autors izvirzīja hipotēzi, kāds ir riska līmenis, kuru sabiedrība uzskata par pieņemamu jeb akceptējamu, neprasot veikt papildus pasākumus šajā sakarā. Kā redzams 2.8. tabulā, konstrukciju sabrukums, kā rezultātā iestājas indivīda nāve, sabiedrība akceptē, ja nāves risks ir mazāks nekā $0,12 \times 10^{-6}/\text{gadā}$ (jeb $\sim 10^{-7}/\text{gadā}$).

2.8. tabula

Sabiedrības akceptējamais riska līmenis

Aktivitāte	Notikumā vidējais bojā gājušo skaits ($\times 10^{-9}$ nāves/h)	Notikuma ilgums (h/gadā)	Nāves risks ($\times 10^{-6}/\text{gadā}$)
Klinšu kāpšana	30 000–40 000	50	1500–2000
Smaiļošana	1 500	80	120
Peldēšana	3 500	50	170
Smēķēšana	2 500	400	1000
Ceļošana ar lidmašīnu	1 200	20	24
Ceļošana ar auto	700	300	200
Ceļošana ar vilcienu	80	200	15
Ogļu rakšana (UK)	210	1500	315
Būvdarbi	70–200	2200	150–440
Darbs rūpnīcā	20	2000	40
Ēku ugunsgrēks	1–3	8000	8–24
Konstrukciju sabrukums	0,02	6000	0,1

Cits nāves riska salīdzinājums, ko sabiedrība akceptē ir apkopots tabulā 2.9 .

2.9. tabula

Pieļaujamie risku līmeņi

Personas nāves risks gadā	Raksturojošais gadījums
10^{-3}	neparasti nelaimes gadījumi; nekavējoties tiek veikti pasākumi, lai samazinātu apdraudējumu
10^{-4}	cilvēki tērē naudu, jo īpaši valsts naudu, lai kontrolētu apdraudējumu (piem., ceļa zīmes, policija, likumi)
10^{-5}	mātes brīdina savus bērnus par apdraudējumu (piem., ugunsgrēku, noslīkšanu, ļaundarībām, indēm), kā arī lidojumi
10^{-6}	vidusmēra cilvēks nerada lielas bažas; apzinās bīstamību, bet ne personiska rakstura, “Dieva vara”

Tipiski ēku konstrukciju un tiltu bojājumu rādītāji, kas balstīti uz vēsturiskiem datiem, apkopoti attiecīgi 2.10. un 2.11.tabulā. Salīdzināšanas nolūkos likmes vajadzības gadījumā tika koriģētas, cenšoties iegūt “sabrukuma” robežlielumu, kas ir vistuvāk tam, kas varētu izraisīt nāves gadījumus, un tādējādi ļautu salīdzināt ar 2.8. tabulu.

2.10. tabula

Akceptējamie risku līmeņi ēku konstrukcijām [16]

Konstrukcijas veids	Avots	Konstrukciju skaits (aplēse)	Vidējais vecums (gados)	Prognozētais drošums p_f
Dzīvojamās ēkas	Dānija	5×10^6	30	10^{-7}
Jaukta tipa ēkas	Holande (1967-1968)	2.5×10^6	-	10^{-4}
Pārvaldītās dzīvojamās ēkas	Austrālija	145 500	-	10^{-5}
Jaukta tipa ēkas	Kanāda	5×10^6	50	10^{-3}
Inženierbūves	Kanāda	-	-	10^{-4}

2.11. tabula

Akceptējamie risku līmeņi tiltu konstrukcijām [16]

Tilta tips	Avots	Konstrukciju skaits (aplēse)	Vidējais vecums (gados)	Prognozētais drošums p_f
Tērauda tilti	ASV (<1990)	-	40	10^{-3}
Liellaiduma tilti	Pasaulē (1900-1960)	55	40	3×10^{-3}
Iekārtie tilti	ASV	-	-	1.5×10^{-3}
Tilti	ASV	-	-	10^{-3}
Tilti	Austrālija	-	-	10^{-2}

Vairāku iemeslu dēļ tabulās norādītie rādītāji ir jāvērtē piesardzīgi. Ir publikācijas, kas apgalvo, ka “sabrukuma” bojājumi veido tikai aptuveni 10–20 % no visiem bojājumu gadījumiem. Daudzi mazi mēroga bojājumi ir saistīti ar lietojamības robežstāvokļa pārkāpumiem [10]. Turklāt daudzi no “sabrukuma” bojājumiem ir notikuši vēl būvniecības laikā. Ne vienmēr ir skaidrs, vai konstrukcija sabruka pie ekspluatācijas slodzes, vai arī pagaidu sloģojuma rezultātā. Arī drošuma novērtējumā ne vienmēr var ņemt vērā pieļautās kļūdas būvniecības laikā.

Praksē vērojams subjektīvs, pieņemot lēmumu par to, vai konstrukcija ir “bojāta”. Bailēs no iespējas iegūt sliktu publicitāti un pakļaut sevi izmeklēšanai, bieži vien sabrukuma sekas tiek slēptas. Iespējams, ka 2.11. tabulā minēts zemāks drošuma vērtējums tiltiem ir saistīts ar šo ietekmi.

Diamantidis & Holicky savā publikācijā [50] analizē galvenos principus ar ko atšķiras drošums no drošības. Sabiedrība sagaida, ka ēku un būvju nomnieki un lietotāji, kā arī viņu tuvumā vai ietekmes zonas esošie lietotāji būs drošībā. Cilvēki sagaida, ka ēku un konstrukciju bojājumi ir ārkārtīgi reti un apzināti palaujas uz konstrukciju plānošanu, projektēšanu, aprēķiniem, detalizēšanu, būvniecību un uzturēšanu, un tajā iesaistīto profesionāļu rūpību un ekspertīzi.

Nosakot terminu “drošums”, būtu jāņem vērā šie fakti un palāvība. Adekvāta drošība respektējot bīstamību tiek nodrošināta, ja bīstamība tiek kontrolēta ar attiecīgiem pasākumiem vai risks ir ierobežots līdz pieņemamam līmenim. Absolūta drošība nav sasniedzama.

Jēdziens “drošība” pamatā attiecas uz cilvēku drošību, kurus ietekmē konstrukciju bojājumi.

Drošība iepriekšminētajā nozīmē - pretstatā terminam “risks” - acīmredzami ir kvalitatīvs termins. Drošība tiek sasniegta, ja cilvēku bojājumu risks tiek samazināts līdz salīdzinoši mazām un tādējādi pieņemamām vērtībām. Definīcija ietver sekojošu grupu drošību:

- strādnieki būvlaukumā;
- konstrukciju lietotāji;
- citas personas konstrukciju ietekmes zonā.

Iepriekšminētajā publikācijā tā nav konstrukcija kā tāda, kas tiek apzīmēta kā droša, bet tieši cilvēki, kas atrodas tās ietekmes zonā. Drošības problēmas, kas saistītas ar precēm, sistēmām, iekārtām vai notikumiem, parasti var identificēt, vienkārši uzdodot jautājumu:

“Vai personas tiek apdraudētas, ja šis konkrētais priekšmets, sistēma vai konstrukcija tiek bojāta vai notiek attiecīgs negadījums?”

Tādēļ tipiskas drošības problēmas rodas no dzīvojamo vai komerciālo ēkas vai tiltu bojājumiem, kā arī tās var rasties tādos gadījumos kā vilcienu sadursmē, kuģu nogrimšanā utt. Tādos gadījumos tiek uzskatīts, ka šāds negadījums ir kā atsevišķa torņa sabrukšana uz neapdzīvota kalna ilgstošu sniega vētru laikā, pārliecinoties, ka šādos apstākļos neviens šajā apgabalā nav.

Lai atbildētu uz jautājumu: *“Cik drošs ir pietiekami drošs?”*, ko pacēla C.Starrs jau 1969.gadā [51], priekšnoteikums ir sagatavoties uz atbildēm virknē jautājumu sērijā. Vispirms tiek pieņemts, ka ir izzinātās visas briesmas, kas rodas kādā konkrētā situācijā.

Nākamajā solī ir jautājums par attiecīgo risku analīzi. Kas varētu notikt, kādā veidā un cik bieži? Šis ir jautājums, uz kuru objektīvi un bez jebkādiem aizspriedumiem ir jāveic analīze. Daudz sarežģītāks jautājums ir: *“kam varam atļaut notikt, cik bieži un kur?”* Atbildot uz šo jautājumu, tiek prasīti spriedumi un lēmumi attiecībā no atbildības pakāpes.

No iepriekš minēto divu jautājumu atbildēm ir vērtējums: vai ir nelabvēlīgs notikums un tā sastopamības biežums ir pieņemams? Vai situācija ir pietiekami droša?

Parasti inženierim, ja novērtējums izrādās negatīvs, jāuzdod vēl citi jautājumi, t.i.,: *“kādi piemēroti pasākumi ir vajadzīgi, lai sasniegtu nepieciešamo drošību?”*. Inženieris ir tas, kurš plāno šos pasākumus, nodod tos darbībā, kā arī uzrauga pareizu to darbību.

Pats par sevi saprotams, ka drošības pasākumiem ir lielas izmaksas. Tādēļ drošība būtībā ir jautājums ne tikai par risku un vienprātību attiecībā uz pieņemamajiem riskiem, bet arī par izmaksām sabiedrībai [52], īpaši attiecībā uz kultūrvēsturisko mantojumu [53].

Ir skaidrs, ka, apsverot iepriekš minētos jautājumus, sabiedrība tiek konfrontēta ar riskiem samērā dažādās problemātiskajās jomās. Bez apdraudējumiem no tradicionālajām dabas katastrofām, sadzīves, darba, satiksmes utt. pastāv arī riski, kas saistīti ar civilizācijas pieaugumu, un faktu, ka arvien vairāk cilvēku uzturās telpās un būvēs [54].

2.6. Ēku drošuma novērtēšana

2.6.1. Drošuma vērtēšanas teorija

Drošuma vērtēšana literatūras avotos ir tikpat veca kā teorija par drošumu. Pirmās publikācijas par vērtēšanu bijušajā PSRS telpā, ir datējamas vēl ar 60-tajiem gadiem [9]. Publikācijā [55] tiek sniegta atbilde uz aktuālu jautājumu - *Kādos gadījumos jānovērtē esošās konstrukcijas?* Izriet, ka novērtējums nepieciešams, ja:

- ir novirzes no oriģinālā projekta;
- ir šaubas par konstrukcijas drošumu;
- ir neapmierinoši iepriekš veikto pārbaužu rezultāti;
- kopējā konstrukcijā plānots iekļaut jaunus elementus;
- plānots mainīt izmantošanas veidu;
- plānots palielināt kalpošanas laiku;
- konstrukcijai redzami defekti, kas radušies lietošanas laikā;
- konstrukcija ir cietusi kādos ārkārtas apstākļos, piemēram, ugunsgrēkā.

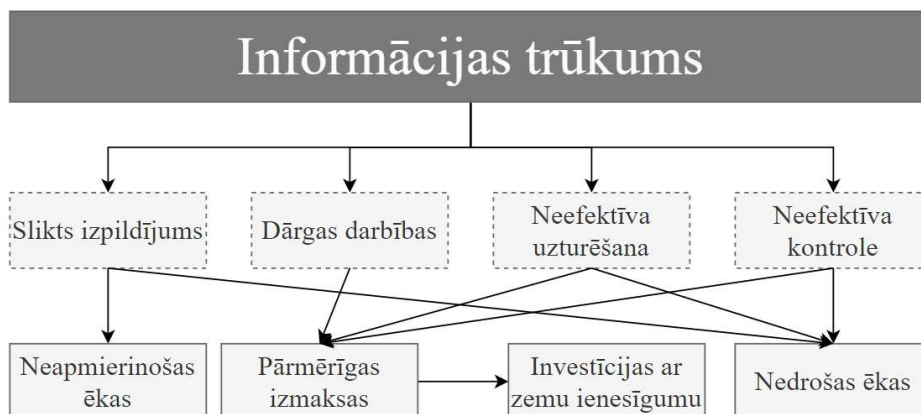
Pētījuma autors uzskata par svarīgu noteikt skaidras un šodienas zināšanām par konstrukciju uzvedības raksturu atbilstošas tehniskās prasības un metodoloģiju esošo ēku konstrukciju drošuma vērtēšanā. CEN atbildīgā standartizācijas tehniskā komisija strādā pie papildinājumiem konstrukciju projektēšanas normatīvos (EN), lai noteiktu vienotu kārtību attiecībā uz šādu ēku pārbūvēm un atjaunošanām pēc 2022. gada [7].

Starp projektēšanu un novērtēšanu ir būtiskas atšķirības. Projekta nenoteiktības rodas no jauno konstrukciju paredzētajiem slodžu un pretestības raksturotajiem un modeļu nenoteiktībām. Šīs nenoteiktības reprezentē izkliedi visdažādāko konstrukciju raksturotajos dēļ izmantoto materiālu kvalitātes neviendabības, atšķirīgajām būvniecības tehnoloģijām un

specifisko slodžu sadalījumu konkrētajā objektā. Arī konservatīvs projekts neizsauks ievērojamu konstrukciju sadārdzināšanu, turpretī konservatīvs novērtējums var izsaukt nevajadzīgus un dārgus remontus vai pārbūves.

Saskaņā ar *Eurostat* [1] datiem šobrīd vairāk kā 35% ēku Eiropā ir 50 gadi un vecākas, tādejādi palielinās pieprasījums pēc būvju, tostarp ēku, konstrukciju tehniskā stāvokļa novērtēšanas. Piemēram, Latvijā ēku normatīvos [4] ir noteikts, ka katrai publiskai ēkai vienu reizi 10 gados ir jāveic speciāla tehniskā apsekošana ar mērķi pārliecināties, vai konkrētā ēka atbilst būtiskajām prasībām, un par šādu apsekošanu ir jāsniedz profesionāls vērtējums atbilstoši normatīviem [56].

Lai gan konstruktīvajos novērtējumos ir izmantotas atšķirīgas pieejas, literatūras avotos tiek ieteiktas dažas galvenās pamatnostādnes. Ievērojams Berlīnes materiālu pētniecības un testēšanas centrs Berlīnē savās publikācijā norāda – ka galvenais izaicinājums drošuma novērtēšanā ir pieejamās informācijas trūkums [57]. Pētnieki ir apkopojuši galvenos iemeslus, kas rada problēmas ēkas ekspluatācijas laikā saistībā ar informācijas trūkumu (skat. 2.20. attēlu).



2.20. att. Galvenās problēmas, kas rodas dēļ informācijas trūkuma ēku lietošanas laikā.

No šo apkopojumu rezultāta secināts, ka pastāv tieša korelācija starp informācijas trūkumu un ēkas bojājumiem. Tādejādi informācija par ēkas konstrukciju stāvokli ir vitāli svarīga pirmām kārtām jau pašam ēkas īpašniekam, lai tas spētu pieņemt adekvātus pasākumus nepieciešamības gadījumā.

Informācijas tūkums kā faktors tiek norādīts arī starptautiskos vērtēšanas standartos [58]. Informācijas Tādēļ eksistē virkne metodes, ar kuru palīdzību var noteikt informāciju gan par konstrukciju materiālu un materiālu pretestības pusi, gan par slodžu un iedarbes pusi.

Kā biežāk lietotā metode ierobežotas informācijas apstākļos ir veikt informācijas atlasī (izpēti) uz vietas objektā. Virknē dažādos avotos tiek ieteikta izlases pārbaudes metode, lai uz šīs informācijas pamata izdarītu nepieciešamos secinājumus. Kā piemēru skat 2.12. tabulu [59]:

Ieteicamās minimālās prasības dažādu līmeņu pārbaudēm (*katram nesošā elementa veidam)

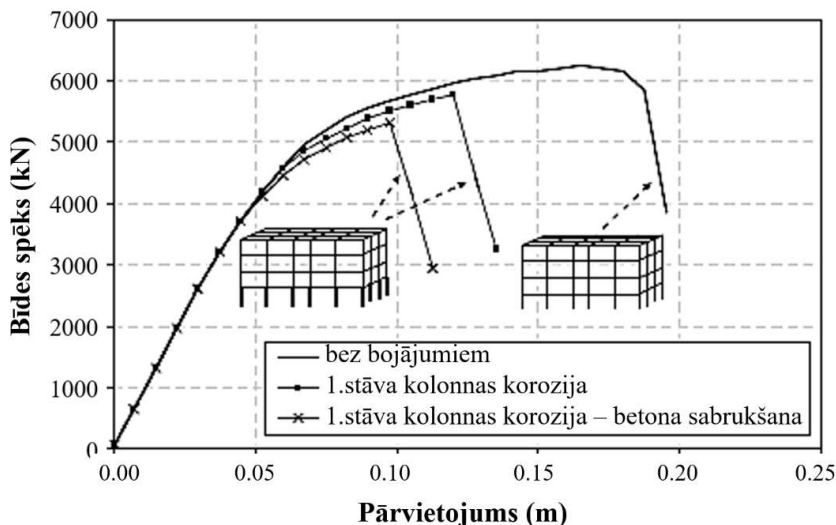
Informācijas līmenis	Veiktas parbaudes apjoms (% no elementiem*)	Paraugu apjoms
Ierobežots	20	1
Paplašināts	50	2
Pietiekams	80	3

Pagājušajā gadsimtā pamatā, lai noskaidrotu informāciju par ekspluatācijā esošu konstrukciju raksturotājiem, tika izmantotas dažādas sagraujošās vai daļēji sagraujošās metodes [9]. Šobrīd, pateicoties tehnoloģiju attīstībai, faktiski nu jau visām materiālu grupām informācijas ieguvei tiek izmantotas metodes, kas vai nu vispār neietekmē konstrukcijas, vai arī dara to ļoti minimāli. Informācijas ticamība šiem rezultātiem ar katru gadu pieaug, par to liecina publikācijas attiecībā uz betona konstrukciju [60], mūra konstrukciju [61], tērauda konstrukciju [62] un koka konstrukciju [63] nesagraujošajām kontroles metodēm. Īpaši būtisks šis apstāklis ir ekspluatācijā esošajām vēsturiskajām ēkām, kur šādu metožu kompleksi nereti ir vienīgie materiālu raksturotāju noteikšanas līdzekļi no kultūrvēsturisko vērtību saglabāšanas [64].

Būvkonstrukcijas tiek projektētas, lai tās būtu drošas visā tām paredzētajā kalpošanas laikā, tomēr tās ietekmē daudzi faktori, kurus ne vienmēr iespējams paredzēt. Statistiski būvju sabrukšanai nav liela varbūtība, tomēr risks pastāv vienmēr. Tā kā konstrukcijas sabrukšanas gadījuma sekas var būt nozīmīgas, tad būvkonstrukciju projektēšanā jānodrošina iespējami mazāks sabrukuma risks un iespējami lielāks drošums, kā arī jānovērtē jau esošas konstrukcijas pēc līdzīgiem nosacījumiem. 2.1. attēlā redzamais grafiks attēlo iespējamo konstrukcijas darbības attīstību laikā, ko vērtē pēc kāda konstrukcijas snieguma rādītāja. Šis rādītājs var tikt raksturots ar dažādiem lielumiem, piemēram, nestspējas raksturotājiem, materiāli fizikāliem raksturotājiem vai drošuma raksturotājiem.

Esošu konstrukciju reālā kalpošanas laika sākumā šis rādītājs var palikt nemainīgs, piemēram, metāla konstrukcija pareizi aizsargājot pret koroziju vai pārslodzēm. Iespējama arī par raksturotāju palielināšanās laikā, piemēram, betona konstrukcijām, kad to stiprība pieaug. Tomēr visos gadījumos pēc kāda noteikta laika konstrukcijas snieguma rādītājs sāk samazināties, piemēram, tērauda korozijas vai betona plaisāšanas dēļ. Kādā brīdī tiek sasniegts lietojamības robežstāvoklis (SLS), kad esošajā konstrukcijā jau ir redzami defekti. Ja netiek veikti konstrukcijas uzlabojumi, šis rādītājs turpina samazināties un situācija pasliktinās, līdz tā sasniedz nestspējas robežstāvokli (ULS) un var iestāties konstrukcijas sabrukums. Ja konstrukcija tiek uzlabota un atjaunota, tad tās darbības rādītājs atgriežas virs lietojamības robežstāvokļa. Tāpēc Eirokodeksos ir pieņemums, ka konstrukcijas kalpošanas laika beigās tās darbības rādītājam nevajadzētu būt zemākam nekā tam, kas tiek sasniegts pie lietojamības robežstāvokļa [65].

Fakts, ka elementi maina laikā savas veiktspējas īpašības, izriet arī no pētījuma, kas tika veikts attiecībā uz dzelzsbetona konstrukcijām zemestrīču gadījumos. Kā redzams 2.21. attēlā, kad kolonu stiegrojuma korozija kopā ar betona materiāla nolietojums samazina spēju pretoties bīdes spēkiem gandrīz par 20 %, kā arī par 50 % samazina elementu pārvietojumus.



2.21. att. Betona nolietojuma ietekme gadījumos, ja notiek pirmā stāva kolonu korozija.

Kā jau tika pieminēts 2.4. nodaļā, konstrukciju drošuma teorijā pamata tiek izmantotas dažādas modelēšanas metodes, lai noteiktu nepieciešamos raksturotājus. Atbilstoši modelēšanas apjomam drošuma teorijā modelēšanu iedala četrās grupās [16]:

- I grupa. Neskaidros parametrus modelē ar vienu raksturīgu vērtību, piemēram, ar kādādu no būvnormatīvos noteikto parciālo drošības koeficientu;
- II grupa. Neskaidros parametrus modelē ar vidējām vērtībām un standarta novirzēm, kā arī korelācijas koeficientiem starp stohastiskajiem mainīgajiem. Netieši pieņem, ka stohastiskie mainīgie parasti ir ar normālā sadalījuma izkliedi;
- III grupa. Nenoteiktos lielumus modelē to raksturojošās izkliedes funkcijās. Bojājumu varbūtību izmanto kā drošuma raksturotāju;
- IV grupa. Šajās metodēs tiek ņemtas vērā arī bojājumu sekas (izmaksas) un risks (sekas, reizinātas ar bojājuma varbūtību), kas tiek izmantots kā drošuma raksturotājs. Tādā veidā var salīdzināt dažādus risinājumus, balstoties uz ekonomiskajiem apsvērumiem, ņemot vērā nenoteiktību, izmaksas un ieguvumus.

I grupas metodes var kalibrēt, piemēram, izmantojot II grupas metodes, II grupas metodes var kalibrēt, izmantojot III grupas metodes utt.

Lai novērtētu II un III grupas metožu piemērotību, var izmantot vairākas metodes, piemēram, ar simulācijas paņēmieni tiek izveidoti stohastiski mainīgi paraugi un tiek izmantots relatīvs bojājumu skaits, lai novērtētu bojājumu varbūtību. Simulācijas paņēmieni atšķiras ar paraugu ģenerēšanas procesu.

Savukārt IV grupas metodēs tiek arī ņemtas vērā bojājumu sekas. Izmaksu un ieguvumu analīzēs (vai RISKU analīzēs) kopējie paredzētie izmaksu un ieguvumu rādītāji konstrukcijai tās paredzamajā kalpošanas laikā tiek maksimāli palielināti:

$$\text{Max } W(z) = B(z) - C_i(z) - C_{in}(z) - C_{rep}(z) - P_f(z)C_f, \quad (2.43.)$$

kur z - projekta / lēmuma mainīgā;

B - sagaidāmie kapitalizētie ieguvumi;

C_i - sākotnējās (vai būvniecības) izmaksas;

C_{in} - paredzamās kapitalizētās pārbaudes izmaksas;

C_{rep} - sagaidāmās kapitalizētās remonta izmaksas;

C_f - kapitalizētās bojājumu izmaksas.

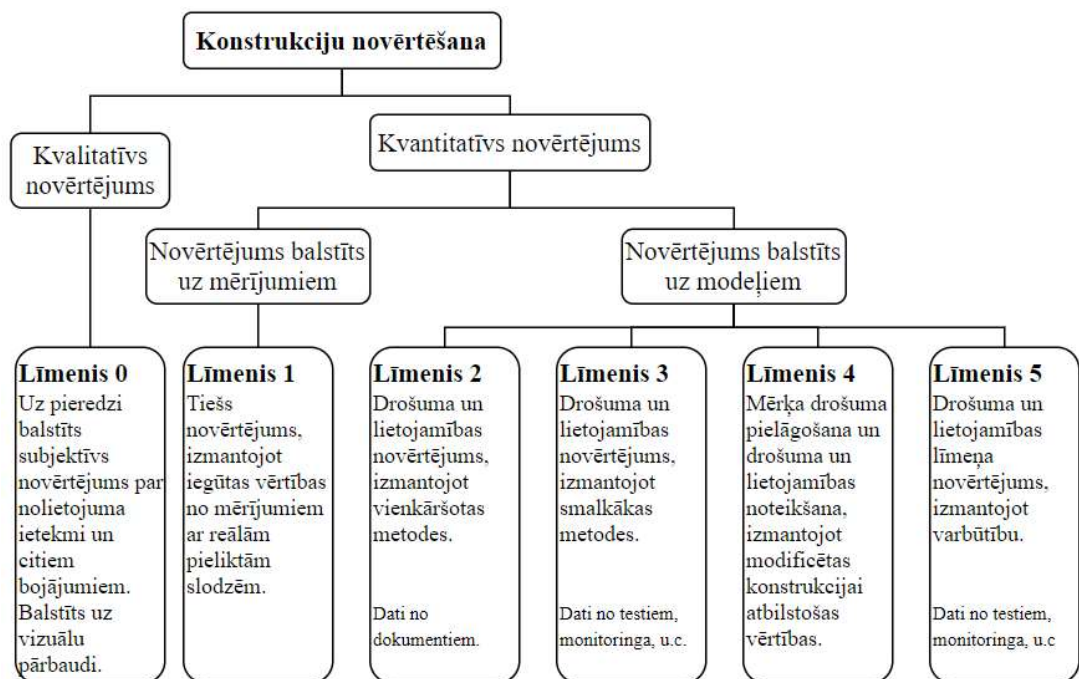
Izmaksu optimizētas pārbaudes stratēģijas ir balstītas uz izmaksu un ieguvumu analīzi, ja pārbaudes, remonta un bojājumu izmaksas ir samazinātas, piem., pārbaudes vietas un pārbaudes laiks un īpašības kā lēmumu mainīgā.

2.6.2. Drošuma vērtēšanas metodes

Kā viens no visaptverošiem priekšrakstiem par konstrukciju drošumu vērtēšanu, kurā apvienota arī starptautiskā prakse, ir vadlīnijas F08a par esošu konstrukciju novērtēšanu, kuras 2006. gadā izdeva SAMCO (*Structural Assessment, Monitoring and Control*), kurā pārstāvētās dažādu valstu speciālās organizācijas, kas ikdienā veic konstrukciju drošuma novērtēšanu [57]. Neskatoties uz faktu, ka šīs organizācijas biedri galvenokārt veic inženierbūvju vērtēšanu, attiecīgās vadlīnijas attiecināmas arī uz ēku konstrukcijām. Vadlīnijās vienuviet apkopotas sešas populārākās pasaulē piedāvātās konstrukciju vērtēšanas metodes jeb līmeņi. Tiek norādīts, ka šiem līmeņiem robežas ir nosacītas un nav strikti noteiktas, t.i. tās var izmantot savstarpēji papildinot vai atsevišķi.

Tiek rekomendēts konstrukcijas novērtējumu sākt ar zemāku, bet konservatīvāku līmeni un pāriet uz augstāka līmeņa novērtējumu gadījumā, ja iepriekšējā metode neizpildās.

Tāpat minēts, ka vienā novērtēšanas procedūrā dažādiem elementiem būtu jāizmanto līdzvērtīga līmeņa metodes. Piemēram, nav lietderīgi elementa pretestību un iedarbju parametrus noteikt ar vienkāršotām, bet neprecīzām metodēm, un izmantot pilno varbūtību novērtējumu kopējā analīzē. Jāatzīmē, ka ir iespējami gadījumi, kad atšķirīgu metožu pielietošana ir rekomendējama. Piemēram, kad sākotnējais zemākā līmeņa novērtējums neizpildās, tālākajā darbībā konstrukcijas pretestības un iedarbju parametru vērtības tiek noteiktas detalizētāk (izmantojot negraujošās pārbaužu metodes), bet novērtējums var tikt veikts pēc iepriekš izmantotā zemākā līmeņa metodes, sniedzot labus rezultātus.



2.22. att. Esošo konstrukciju novērtēšanas līmeņi pēc SAMCO.

Līmenis 0: Neformāls kvalitatīvs novērtējums:

Novērtējums, kas balstīts uz inženiera pieredzi, visbiežāk izmantots, lai sākotnēji vispārēji un vizuāli novērtētu konstrukciju – redzami bojājumi, tērauda korozija, plaisas betonā;

Līmenis 1: Iedarbju noteikšana, balstīta uz mērījumiem:

Lietojamības novērtēšana, kas balstīta uz tiešiem konstrukcijas darbības mērījumiem, kas salīdzināti ar pieļaujamām vērtībām. Visbiežāk ar šī līmeņa novērtējumu tiek noteiktas izlieces, konstrukciju pašsvārstību frekvences, svārstību amplitūdas, plaisu izmaiņas, bet netiek veikta konstrukcijas konstruktīvā analīze. Pieļaujamās vērtības var tik definētas būvnormatīvos vai arī konkrētam gadījumam;

Līmenis 2: Parciālo faktoru metode, kas balstīta uz dokumentu izpēti:

Nestspējas un lietojamības novērtējums, izmantojot informāciju, kas iegūta, pētot aprēķina, būvniecības un pārbaužu rezultātu dokumentāciju, kā arī vizuālo apsekošanu. Konstrukcijas būvmehānikas aprēķini tiek veikti, izmantojot vienkāršotas metodes, kas lietotas projektēšanas procesā. Ja nepieciešams, iespējams izmantot arī precīzāku analīzi, piemēram, galīgo elementu metodi. Drošuma un lietojamības pārbaude tiek balstīta uz parciālajiem faktoriem.

Līmenis 3: Parciālo koeficientu metode, kas balstīta uz papildus izpētēm:

Nestspējas un lietojamības novērtējums, izmantojot informāciju, kas iegūta no konkrētā objekta. Tipiskākie parametri, kas tiek analizēti ir konstrukcijas ģeometriskie lielumi un materiālu raksturlielumi, kas var tikt noteikti, izmantojot negraujošās pārbaudēs iegūto informāciju.

Lai pareizi novērtētu datus, testi jāveic adekvātam paraugu daudzumam, iegūstot statistiski atbilstošus rezultātus. Konstrukcijas būvmehānikas aprēķini tiek veikti, izmantojot smalkākas aprēķinu metodes un detalizētus aprēķina modeļus, piemēram, galīgo elementu aprēķinu programmas, kā arī aprēķinos izmantotie parametri jāpielāgo reālajiem. Drošuma un lietojamības pārbaude tiek balstīta uz parciālajiem faktoriem.

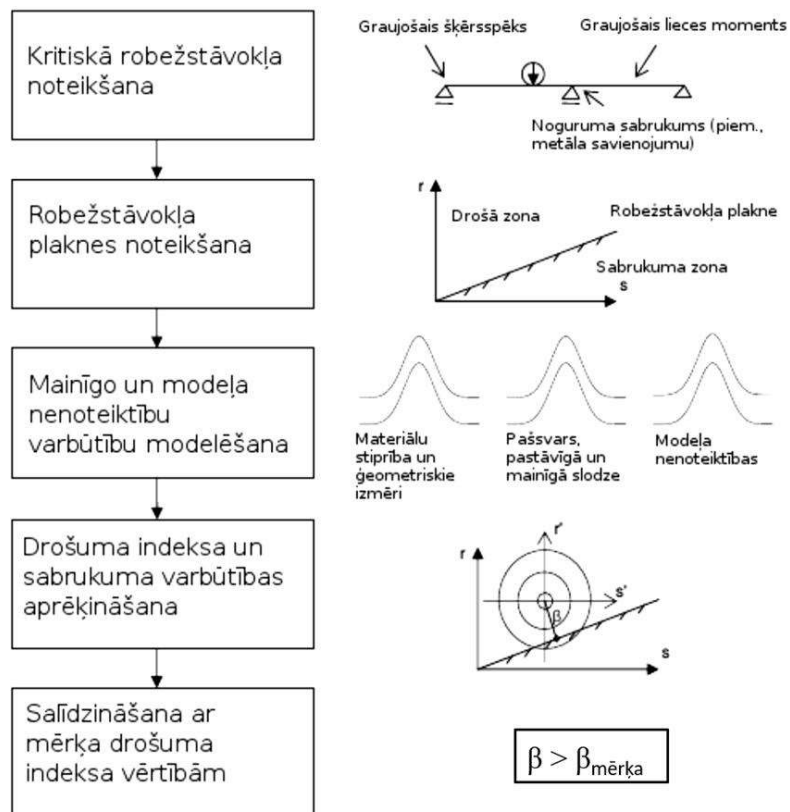
Līmenis 4: Modificēts mērķa drošums, parciālo koeficientu modificēšana:

Konstrukcijas nestspēja tiek noteikta, izmantojot atbilstošus modificētus parciālos faktorus. Konstrukcijai specifiski parametri un ārējie apstākļi var ietekmēt drošumu. Praktiski parciālo faktoru modificēšana ir varbūtību novērtējums, kas izmantota konstrukciju grupām, kurām ir līdzīga konstruktīvā darbība vai iedarbes uz tām.

Līmenis 5: Pilnīgs varbūtību novērtējums:

Novērtējums, kurā ņemti vērā visi pamata mainīgie lielumi ar to statistiskajiem parametriem. Atšķirībā no 4. līmeņa metodes, konstrukcijas drošuma analīze ir veikta tieši, neizmantojot parciālos faktorus, bet nenoteiktības slodzei un pretestībai. Šī līmeņa novērtējums rezultātā sniedz konstrukcijas vai elementa drošuma indeksu vai sabrukuma iestāšanās varbūtību. Nenoteiktības ir modelētas, izmantojot varbūtību principus, shēma redzama 2.23. attēlā.

Vairākos no aplūkotajiem zinātniskajiem rakstiem ir sniegti ieteikumi attiecībā uz simulācijas metodēm. Kā viena no zināmākajām simulācijām ir Monte-Karlo simulācija [66], kas ir risku analīzes metode, izmantojot statistiskos novērojumus un nenoteiktību. Šo metodi iespējams izmantot, lai atrisinātu jebkuru varbūtību uzdevumu. Visnoderīgākā Monte-Karlo simulācija ir gadījumos, kad ir sarežģīti vai neiespējami izmantot citas metodes. Monte-Karlo simulācija atbilst iepriekš aprakstītajam 5. līmeņa konstrukciju novērtējumam.



2.23. att. Esošo konstrukciju novērtēšanas shēma.

Starptautiskajā līmenī konstrukciju drošuma vērtēšana ir arī standartizēta. Šeit jāmin tādi standarti, kā ISO 13822 [25], kas sniedz vispārējus principus esošu konstrukciju novērtēšanai, kā arī standartu ISO 2394 [24] tas nosaka vispārējos principus dažādu konstrukciju drošuma vērtēšanai un drošuma līmenim. ISO 13822 standarta norādījumi pielietojami esošām konstrukcijām, kuras projektētas saskaņā ar kādiem akceptētiem principiem vai projektēšanas metodēm. Tomēr jāatzīst, ka šo starptautisko standartu piedāvātas versijas ir vispārīgas, un to praktiskais īstenošanai nepieciešam vēl papildus skaidrojumi.

Ļoti ievērojama apjoma publikācija par konstrukciju drošuma vērtēšanu ir veikusi ES Komisijas Apvienotais pētniecības centrs (JRC), 2015.gadā publicējot ziņojumu par jauniem Eiropas tehniskajiem noteikumiem attiecībā uz esošu būvju novērtēšanu un atjaunošanu [2]. Šajā pētījumā ir veikta apjomīga analīze par atsevišķu Eiropas Savienības dalībvalstu tehniskajiem normatīviem šajā sakarā, un fakstiksi šis ir mandāts jaunam Eiropas standartam pie Eirokodu saimes attiecībā uz konstrukciju drošuma vērtēšanu. Šī standarta projekts ir jau piejams arī publiski [7] un to plānots apstiprināt kā EN standartu tuvāko gadu laikā.

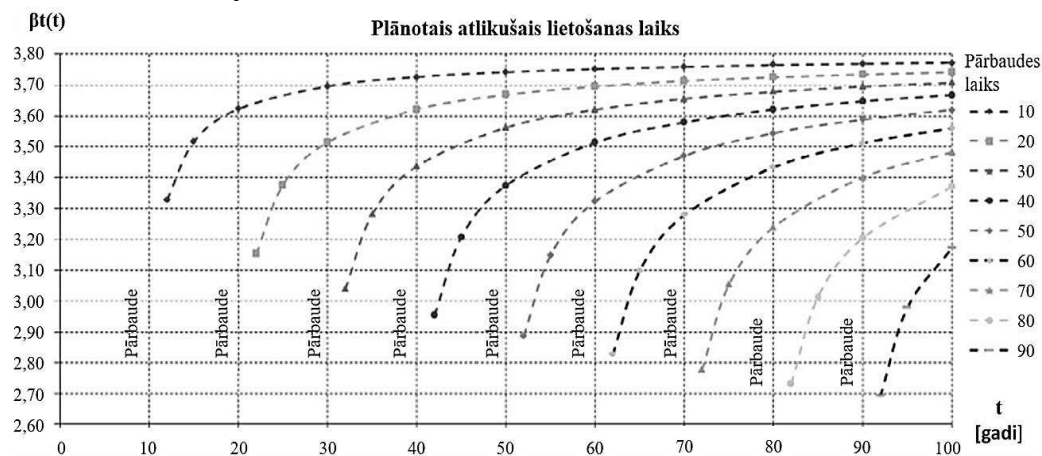
2.7. Tiltu konstrukciju vērtēšana

Kopumā ēku konstrukciju drošuma vērtēšana uz citu būvju, citu konstrukciju un citu apsvērumu fona ir salīdzinoši neliela. Ievērojams literatūras avotu apjoms ir atrodams par novitātēm un piedāvājumiem citās vērtēšanas metodēs, kur pieredzi ir iespējams pārņemt ekspluatāciju esošo ēku konstrukciju drošuma vērtēšanā. Piemēram, eksistē vērtēšanas metodes ēku ugunsdrošības līmeņa noteikšanā, energoefektivitātē, ilgtspējas vērtējumi utt.

Tomēr ievērojami tuvāk ēkām un izpētes vērta ir tiltu konstrukciju drošuma vērtēšana, par ko zinātniskajā literatūrā pēdējos gados ir atrodams ievērojams literatūras un metodoloģijas apjoms. Tilts kā konstrukcija ir līdzīga rakstura būve, tikai ar ievērojami garāku prognozēto lietošanas laiku kā ēkai. Sabrukuma seku dēļ tilti parasti ir CC3 seku klasē saskaņā EC1990 [65]. Piemēram, saskaņā ar EC1990 prasībām, tiltu konstrukciju lietošanas laiks, kuru ņem vērā drošuma prognozēšanā ir 100 gadi, pretēji ēku konstrukciju 50 gadiem. Lai gan šeit jāmin, ka attīstoties dzīves labklājībai, arī ēku konstrukciju lietošanas resurss modernos nozares standartos pieaug līdz 100 gadiem [58].

Ekspluatācijā esošo tiltu konstrukciju drošumu vērtēšanā ir analogi izaicinājumi kā ēkām. Publikācijā [67] tiek piedāvāts risinājums, kā noteikt drošuma indeksu konstrukcijām atkarībā no inspekciju intervāla un plānotā atlikušā lietošanas laika (skat. 2.23. attēlu).

Atkarībā no tilta vecuma un atlikušā lietošanas laika pētījuma autori piedāvā metodi, kur ar teorētiskiem pieņēmumiem iespējams spriest par drošuma indeksu. Redzams, ka pretēji EC0 piedāvātajam modelim, šajā gadījumā mērķa drošuma indeksa vērtība samazinās pieaugot atlikušajam lietošanas laikam (skat. tabulas 2.12. un 2.13.). Redzam, ka tā mainās no 3,773 līdz 2,692. Publikācijas autori iesaka izmantot šo metodi, lai noteiktu materiālu un slodžu parcelos koeficientus konstrukcijām, kuras atrodas lietošanā.



2.24. att. Drošuma indekss β atkarībā no inspekciju intervāla un plānotā atlikušā lietošanas laika.

Tāpat aktuāla tēma tiltu drošumā ir atļaut to izmantot gadījumos, kad ir krīzes vai ārkārtas situācijas, un ir nepieciešams ļaut tiltu šķērsot cilvēkiem ar vai bez transporta līdzekļiem kādā noteiktā laika periodā. Šādam novērtējumam publikācija [68] piedāvā tiltu konstrukciju novērtējumu krīzes un ārkārtas apstākļos, kur tiek izdarīts secinājums, ka atsevišķos gadījumos zemākais pieļaujamais drošuma indekss β īsā laika intervālā pie noteiktiem apsvērumiem var

būt pat zem 1 (skat. var būt negatīvs, jeb tilta sabrukšanas varbūtība var pārsniegt 0.5).

2.13. tabula

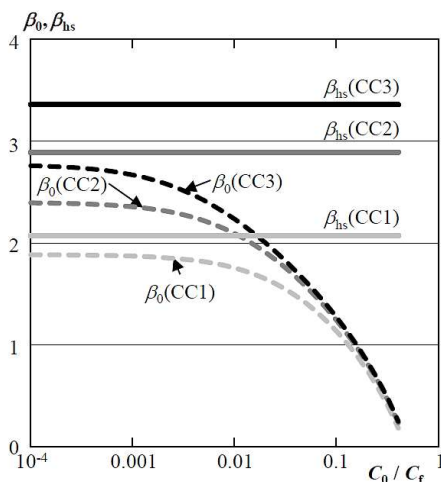
Drošuma līmenis lietotu tiltu novērtēšanā, ja to vecums < 60 gadiem, neņemot vērā materiālu nolietojumu

Atlikušais lietošanas laiks [gadi]	Tilta vecums [gadi]									
	10		20		30		40		50	
	β_t	P_{ft}	β_t	P_{ft}	β_t	P_{ft}	β_t	P_{ft}	β_t	P_{ft}
2	3.328	$4.38 \cdot 10^{-4}$	3.153	$8.09 \cdot 10^{-4}$	3.039	$1.19 \cdot 10^{-3}$	2.954	$1.57 \cdot 10^{-3}$	2.886	$1.96 \cdot 10^{-3}$
5	3.517	$2.19 \cdot 10^{-4}$	3.377	$3.67 \cdot 10^{-4}$	3.282	$5.16 \cdot 10^{-4}$	3.208	$6.68 \cdot 10^{-4}$	3.149	$8.21 \cdot 10^{-4}$
10	3.623	$1.46 \cdot 10^{-4}$	3.515	$2.20 \cdot 10^{-4}$	3.437	$2.94 \cdot 10^{-4}$	3.375	$3.70 \cdot 10^{-4}$	3.323	$4.46 \cdot 10^{-4}$
20	3.697	$1.09 \cdot 10^{-4}$	3.622	$1.46 \cdot 10^{-4}$	3.563	$1.83 \cdot 10^{-4}$	3.514	$2.21 \cdot 10^{-4}$	3.471	$2.59 \cdot 10^{-4}$
30	3.727	$9.70 \cdot 10^{-4}$	3.669	$1.22 \cdot 10^{-4}$	3.621	$1.47 \cdot 10^{-4}$	3.580	$1.72 \cdot 10^{-4}$	3.545	$1.97 \cdot 10^{-4}$
40	3.743	$9.08 \cdot 10^{-4}$	3.696	$1.09 \cdot 10^{-4}$	3.656	$1.28 \cdot 10^{-4}$	3.621	$1.47 \cdot 10^{-4}$	3.589	$1.66 \cdot 10^{-4}$
50	3.753	$8.72 \cdot 10^{-4}$	3.714	$1.02 \cdot 10^{-4}$	3.679	$1.17 \cdot 10^{-4}$	3.648	$1.32 \cdot 10^{-4}$	3.620	$1.47 \cdot 10^{-4}$
60	3.760	$8.48 \cdot 10^{-4}$	3.726	$9.72 \cdot 10^{-5}$	3.696	$1.10 \cdot 10^{-4}$	3.668	$1.22 \cdot 10^{-4}$		
70	3.766	$8.31 \cdot 10^{-4}$	7.735	$9.38 \cdot 10^{-5}$	3.708	$1.05 \cdot 10^{-4}$				
80	3.770	$8.18 \cdot 10^{-4}$	3.742	$9.12 \cdot 10^{-5}$						
90	3.773	$8.07 \cdot 10^{-4}$								

2.14. tabula

Drošuma līmenis lietotu tiltu novērtēšanā, ja to vecums ≥ 60 gadiem, neņemot vērā materiālu nolietojumu

Atlikušais lietošanas laiks [gadi]	Tilta vecums [gadi]							
	60		70		80		90	
	β_t	P_{ft}	β_t	P_{ft}	β_t	P_{ft}	β_t	P_{ft}
2	2.828	$2.35 \cdot 10^{-3}$	2.777	$2.75 \cdot 10^{-3}$	2.732	$3.15 \cdot 10^{-3}$	2.692	$3.56 \cdot 10^{-3}$
5	3.098	$9.75 \cdot 10^{-4}$	3.053	$1.13 \cdot 10^{-3}$	3.014	$1.29 \cdot 10^{-3}$	2.978	$1.45 \cdot 10^{-3}$
10	3.279	$5.22 \cdot 10^{-4}$	3.239	$6.00 \cdot 10^{-4}$	3.204	$6.78 \cdot 10^{-4}$	3.172	$7.57 \cdot 10^{-4}$
20	3.434	$2.97 \cdot 10^{-4}$	3.401	$3.35 \cdot 10^{-4}$	3.371	$3.74 \cdot 10^{-4}$		
30	3.512	$2.22 \cdot 10^{-4}$	3.483	$2.48 \cdot 10^{-4}$				
40	3.561	$1.85 \cdot 10^{-4}$						



2.25. att. Tiltu drošuma indeksu vērtības atkarībā no ekonomiskajiem (β_0) un cilvēku drošības (β_{hs}) faktoriem pie izmaksu koeficienta C_0/C_f dažādām seku klasēm references periodā viena nedēļa.

Tiltu nozarē atšķirībā no ēkām, drošuma vērtēšana kā viens no kritērijiem pastāv jau vairākas dekādes. Tomēr šis nozares speciālisti pēdējās dekādēs ir izdevuši virkni publikāciju, kur pauž satraukumu par kopējo tiltu stāvokli pasaulē, un virkne negadījumi dažādos reģionos pēdējā dekādē ir likušas aktivizēties nozares pārstāvjiem, kas kopā ar zinātniekiem meklē jaunas metodes, kā objektīvi nodrošināt drošu tiltu uzturēšanu [69; 70]. Un arī tiltos, analogi ēku sektorā, arvien vairāk publikāciju ir par ilgtspējas kritērijiem attiecībā uz tiltu projektēšanu un uzturēšanu [71]. Tāpat ir aktuāls jautājums par ekspluatācijas laika pagarināšanu [72].

Apvienojoties industrijas un zinātnes pārstāvjiem no visas Eiropas zem aktivitātes ar kodētu saīsinājumu TU1406 [73], tiek meklēti jauni un adekvāti risinājumi, kā nodrošināt pieprasīto drošības līmeni tiltiem ar atbilstošām tiltu infrastruktūras pārvaldības metodēm. Īstenojot aktīvu pārvaldības stratēģijas, tiek meklēti jauni nepieciešamie uzturēšanas pasākumi, lai nodrošinātu aktīvu vēlamu drošuma līmeni. Tiltu gadījumā šie rādītāji var būt gan kvalitatīvi, gan kvantitatīvi, un tos iegūt tiltu pārbaužu laikā, izmantojot vizuālās pārbaudes metodes, nesagraujošās testu metodes vai pagaidu, vai pastāvīgu monitoringa sistēmu. Pēc tam iegūtie rādītāji tiek salīdzināti ar tiltu darbības raksturotājiem, lai novērtētu, vai drošuma nosacījumi ir izpildīti.

Ir zināms, ka Eiropā pastāv liela atšķirība attiecībā uz to, kā šie rādītāji kvantitatīvi tiek noteikti un lietoti, tādēļ TU1406 galvenais mērķis ir pirmo reizi apvienot gan pētniecības, gan praktizējošo kopienu, lai paātrinātu Eiropas pamatnostādnes izstrādes šajā jomā. Tiek analizēti arī jauni rādītāji, kas saistīti ar tiltu ilgtspējīgas darbības nodrošināšanu.

Pati metode, kā tiek īstenota sadarbība starp zinātnes un nozares pārstāvjiem caur sadarbības platformu būtu izmantojama arī ēku industrijā.

2.8. Nodaļas secinājumi

Iepazīstoties ar literatūras avotiem, ir izdarāmi sekojoši secinājumi par drošumu un tā vērtēšanas aktualitātēm pasaulē, kā arī par pieredzi, kuru varam aizgūt no citu kritēriju vērtēšanas (tie nav prioritārā kārtībā):

- 1) drošuma populārākā mērvienība, ko visplašāk lieto industrija un zinātne attiecībā uz drošuma raksturošanu, ir drošuma indekss;
- 2) vērtēšanas algoritmi kļūst komplicētāki, tomēr lietošanas metodes kļūst vienkāršākas, un īpaši svarīga ir rezultātu saprotamība, lasāmība un reproducējamība;
- 3) arvien pieaugoša nozīme ir ekonomiskiem, sociāliem un vides aspektiem, izdarot secinājumus par ēkām un to konstrukciju elementiem;
- 4) lēmumu pieņemšanā būtiska nozīme ir informācijas pieejamībai un tās ticamībai;
- 5) šobrīd pasaulē attiecībā uz ēkām dominē Eirokodeksos noteiktie drošuma līmeņi, tomēr ir atbalstāma arī starptautisko un nacionālo standartu izmantošana;
- 6) lēmumu pieņemšanā ir svarīga risku analīze, tomēr to diferenciācija atkarībā no sekām ir svarīga visos līmeņos;
- 7) būtiska loma ekspluatācijā esošo ēku drošuma novērtēšanā ir materiālu nolietojumam;
- 8) ēkas drošuma novērtēšanā un arī turpmākās ekspluatācijas prognozēšanā ir svarīgi ņemt vērā laika faktoru;
- 9) ēku drošuma datiem ir svarīga vienota platforma, ja ir vēlēšanās attīstīt nākotnes tehnoloģijas drošuma monitorēšanā (piemēram, izmantojot mākslīgo intelektu);
- 10) ēku izbūvē un lietošanā pār jebkuriem citiem apsvērumiem prevalē cilvēku drošība
- 1) drošuma populārākā mērvienība, ko visplašāk pielieto industrija un zinātne attiecībā uz drošuma raksturošanu ir drošuma indekss;
- 2) vērtēšanas algoritmi kļūst komplicētāki, tomēr pielietošanas metodes kļūst vienkāršākas un īpaši svarīga ir rezultātu saprotamība, lasāmība un reproducējamība;
- 3) ekonomiskiem, sociāliem un vides aspektiem ir arvien pieaugoša loma, izdarot secinājumus par ēkām un to konstrukciju elementiem;
- 4) informācijas pieejamībai un tās ticamībai ir būtiska loma lēmumu pieņemšanā;
- 5) Eirokodeksos noteiktie drošuma līmeņi attiecībā uz ēkām dominē šobrīd pasaulē, tomēr arī starptautisko un nacionālo standartu izmantošana ir atbalstāma;
- 6) risku analīze ir svarīga lēmumu pieņemšanā, tomēr tā diferenciācija atkarībā no sekām ir svarīga visos līmeņos;
- 7) materiālu nolietojumam ir būtiska loma ekspluatācijā esošo ēku drošuma novērtēšanā;
- 8) ir svarīgi ņemt vērā laika faktoru ēkas drošuma novērtēšanā un arī turpmākās ekspluatācijas prognozēšanā;
- 9) vienota platforma ēku drošuma datiem ir svarīga, ja ir vēlēšanās attīstīt nākotnes tehnoloģijas drošuma monitorēšanā (piemēram, izmantojot mākslīgo intelektu);
- 10) cilvēku drošība prevalē pār jebkuriem citiem apsvērumiem ēku izbūvē un lietošanā.

3. PĒTĪJUMA TEORĒTISKAIS PAMATOJUMS

Promocijas darba gaitā veikti vairāki pētījumi ar mērķi izstrādāt metodoloģiju ēku drošuma kvantitatīvai vērtēšanai, ko darba autors turmāk rekomendē ieviest ēku tehniskās apsekošanas praksē:

- a) veikta ekspluatācijā esošu ēku konstrukciju tehniskā stāvokļa kvalitatīva novērtējuma analīze un to ietekmējošo faktoru sintēze, pamatojoties uz Latvijā pieejamiem datiem;
- b) veikta esošo ēku konstrukciju drošuma novērtēšanas prakses analīze Eiropas dalībvalstīs;
- c) noteikti teorētiskie drošuma līmeņi dažādiem konstrukciju elementiem, t. sk. projektētiem ārpus Eirokodeksu metodoloģijas ietvara.

Balstoties šajos pētījumos, ir gūts teorētiskais pamatojums metodoloģijas izstrādei ekspluatācijā esošu ēku kopējā drošuma līmeņa noteikšanai.

3.1. Ekspluatācijā esošo ēku kvalitatīvā novērtējuma analīze

3.1.1. Kvalitatīvās vērtēšanas metode

Sākot pētījumu, tika konstatēts, ka ir pieejami dati par ēku kopskaitu Latvijā un atsevišķiem raksturotājiem, tomēr nav pieejami objektīvi dati, kas raksturotu šo ēku tehnisko stāvokli. Tādēļ promocijas darbā viens no uzdevumiem bija veikt ekspluatācijā esošu ēku konstrukciju tehniskā stāvokļa kvalitatīvo novērtējumu, veikt iegūto datu analīzi un to ietekmējošo faktoru sintēzi.

Šim nolūkam tika izstrādāta metode, kas balstās uz vizuāli konstatējamu ēku konstrukciju bojājumu klasificēšanu trijās kategorijās no 1 līdz 3, kur kategorijas tiek noteikta pēc vispārējiem konstrukciju degradācijas pamatprincipiem un to robežstāvokļiem (skat 2.1. att.):

Metode piedāvā iegūto datu apstrādi atbilstoši riska pārvaldības principiem. Uz riska grafika vertikālās ass tiek izvietotas iespējamās sekas notikuma gadījumā, uz horizontālās ass notikuma iespējamība (bojājuma pakāpe jeb riska koeficients). Izmantojot šādu principu, ir iespējams novērtēt un iedalīt būves pēc bojājuma pakāpes un būves nozīmības (seku klases), lai identificētu riskus un to ietekmi uz ēkas ekspluatācijas drošību.

Konstrukciju mehāniskā stiprība un stabilitāte

Ēkām apsekošanas laikā, vizuāli novērtējot bojājumu mehānisko stiprību un stabilitāti, tiek pieversta uzmanība šādām ēku daļām: pamati, ārējās norobežojošās konstrukcijas, visas pieejamās nesošās konstrukcijas, kā arī jumta konstrukcijas.

Apsēkotāja uzdevums, veicot ekspluatācijas kontroles, ir konstatēt konstrukcijas, kurām bojājumi pēc vizuālajām pazīmēm (plaisas, izlieces, korozija) rada aizdomas, ka tiek pārsniegti lietošanas robežstāvoklis (skat. 2.1. att., SLS zona).

Atkarībā no ēkas konstruktīvās shēmas un konstrukciju tehniskā stāvokļa ir jānovērtē šādi kritēriji [5]:

- nesošo konstrukciju spēja uzņemt projektētās iedarbes;

- vai deformācijas nepārsniedz noteiktos robežlielumus;
- vai konstatēti ēkas konstrukciju sagrūvums.

Tabulā 3.1. apkopoti piedāvātie riska koeficienti (RF) bojājumu mehāniskās stiprības un stabilitātes novērtējumā:

3.1. tabula

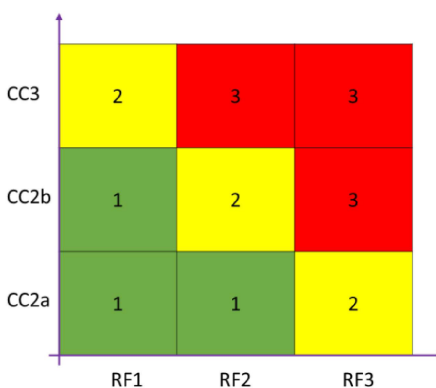
Ēkas bojājumu klasifikācija mehāniskai stiprībai un stabilitātei

Riska koeficients	Pārbaudes rezultāts
RF1	Konstatēti nelieli mehāniskās stiprības un stabilitātes prasību pārkāpumi, kas nerada būtisku risku ēkas lietotāju veselībai un / vai dzīvībai
RF2	Konstatēti mehāniskās stiprības un stabilitātes prasību pārkāpumi, kas rada būtisku risku ēkas lietotāju veselībai un / vai dzīvībai
RF3	Konstatēti būtiski mehāniskās stiprības un stabilitātes prasību pārkāpumi, kas rada nepieļaujamu risku ēkas lietotāju veselībai un / vai dzīvībai

Tehniskā stāvokļa vērtējums pēc riska pārvaldīšanas principiem

Kā tika minēts iepriekš, kvalitatīvā apsekošanas metode piedāvā veikt iegūto datu apstrādi atbilstoši riska pārvaldīšanas principiem. Katru būvi pēc tās konstrukcijas un lietošanas veida var klasificēt noteiktā “seku klasē” (Eirokekssos [31] to sauc par “consequence class”), apzīmē CC 1 – CC3. Grafikā uz horizontālās ass tiek sniegti vērtējumi skalā RF1-RF3 (apkopoti 3.1. tabulā), savukārt uz vertikālās ass norādīta ēkas “seku klase” saskaņā ar Eirokeksa klasifikāciju.

Riska klasificēšanas princips attētos 3.1. attēlā.



3.1. att. Risku klasificēšanas princips

Saskaņā ar augstākminēto attēlu tiek izdarīts secinājums par ekspluatācijā esošas ēkas riska vērtējumu no skalā no 0 līdz 3, kur:

“1” – labs stāvoklis / drošs; konstatēti nelieli defekti, kas neapdraud ēkas drošību. Jāpievērš uzmanība apkopes laikā;

- “2” – slikts stāvoklis / drošība jāuzlabo; konstatēti trūkumi, kas rada draudus ēkas drošībai; jānovērš bojājumi;
- “3” – bīstams stāvoklis / nedrošs; atklāti bojājumi, kas rada nopietnus draudus ēkas drošībai; ēkas vai tās daļas ekspluatācija nekavējoties jāpārtrauc.

Gadījumā, ja ēkai pēc tās apsekošanas nav konstatēti bojājumi konstrukcijās, tad neatkarīgi no seku klases ēkai tiek sniegts vērtējums “0” – teicams stāvoklis / drošs; defekti nav identificēti; nekāda darbība nav nepieciešama.

3.1.2. Publisko ēku risku vērtēšanas rezultāti

Pārbaužu apjoms un novērtējumu īpatsvars

Sadarbībā ar Būvniecības valsts kontroles biroju (BVKB) laikā no 2016. gada janvāra līdz 2017. gada decembrim šī metode tika izmanota, birojam īstenojot Būvniecības likumā noteikto funkciju par publisko ēku ekspluatācijas kontroli.

Latvijā saskaņā Valsts Zemes dienesta datiem uz 2015. gadu kopumā bija reģistrētas 1 391 522 ēkas, no kurām 25.9 % jeb 359 897 ir dzīvojamās ēkas, 72.2 % jeb 1 005 355 ir publiskās ēkas, 1.9 % jeb 26 270 ir inženierbūves.

BVKB kompetencei piekritīgās ēkas ir publiskās ēkas, kuras paredzēts vienlaicīgi uzturēties vairāk kā 100 cilvēkiem. Ņemot vērā, ka Valsts Zemes dienesta ēku reģistros nav pieejami dati par publiskām ēkām, un vēl vairāk - kura no publiskajām ēkām ir paredzēta, lai tajā uzturēties vienlaicīgi vairāk nekā 100 cilvēki, sadarbībā ar BVKB tika izstrādāta speciāla atlases kārtība, lai noteiktu BVKB kompetencei piekritīgās publiskās ēkas (ēkas virs 1000 m², pamatojoties uz ēkas lietošanas veidu un minimālo platību, kas nepieciešama cilvēkam atbilstoši ugunsdrošības normatīviem).

BVKB kompetencei piekritīgo publisko ēku skaitu Latvijā skatīt 3.2.tabulā.

3.2. tabula

Publisko ēku kopējais skaits Latvijā, kurās uzturas vairāk nekā 100 cilvēku un ar platību virs 1000 m² (BVKB piekritīgās) un apsekoto ēku skaits pēc kvalitatīvās vērtēšanas metodes

Ēkas lietošanas veids pēc būvju klasifikācijas	Klasifi. kods	Kop. ēku skaits	BVKB ēkas	Īpat-svars, %	Apsek. ēkas	Īpat-svars, %
Viesnīcu ēkas	121	5 452	525	6,5	127	19,5
Biroju ēkas	1220	7 125	1602	20,5	215	10,5
Vairumtirdzniecības un mazumtirdzniecības ēkas	1230	8 116	874	11,2	249	22,1
Sakaru ēkas, stacijas un ar tiem saistītās ēkas	1241	2 608	174	2,2	27	12,3
Garāžu ēkas	1242	11 569	0	0	0	0
Ražošanas ēkas	125	50 307	0	0	0	0
Ēkas izklaides pasākumiem	1261	1 198	331	7,5	2	0,3
Muzeji un bibliotēkas	1262	562	105	1,3	18	14
Skolas, universitātes un zinātniskajai pētniecībai paredzētās ēkas	1263	3 800	1972	23,3	766	32,8
Ārstniecības vai veselības aprūpes iestāžu ēkas	1264	1 341	461	5,2	117	22,3
Sporta ēkas	1265	1 041	338	4,1	64	15,5
Lauksaimniecību ēkas	1271	84 300	0	0	0	0
Kulta ēkas	1272	1297	67	8,9	20	2,2
Kultūrvēsturiski objekti	1273	49	15	0,4	1	2,6
Citas, neklasificētas ēkas	1274	828 857	551	9	17	1,9
Kopā		1 007 622	7 015	0,7	883	12,6

Saskaņā ar Valsts Zemes dienesta datiem ir iespējams noteikt, kuras no BVKB kompetencei piekritīgajām ēkām ir izgatavotas attiecīgi no koka, dzelzsbetona, mūra, metāla vai jaukta tipa konstrukcijām, kā arī to vecumu un atrašanās adresi. Šo datu kopsavilkumu skatīt 3.3. tabulā.

3.3. tabula

Kopsavilkums par BVKB piekritīgo ēku skaita pēc to konstrukciju veida, vecuma un atrašanās reģiona

Galvenās konstrukcijas	Īpatsvars, %	Ēkas vecums	Īpatsvars, %	Ēkas novietojums	Īpatsvars, %
Dzelzsbetona	13,56	Līdz 5 gadi	8,20	Rīga	51,45
Koka	1,74	5 – 50 gadi	42,51	Kurzeme	13,57
Metāla	6,07	No 50 gadi	49,29	Latgale	13,51
Mūra	61,92			Vidzeme	10,76
Jaukta tipa	16,71			Zemgale	10,71

Plānojot tehniskās apsekošanas tika ievērtēts, lai pārbaudēm tiktu pakļauts līdzvērtīgs īpatsvars no attiecīgo ēku vecuma, atrašanās reģiona, lietošanas veida un materiāla, kā arī, lai tas būtu reprezentatīvs un varētu izdarīt objektīvus secinājumus par kopējām tendencēm attiecībā uz sabiedrisko ēku drošību Latvijā.

Apsekoto ēku īpatsvaru skatīt 3.2 un 3.4 tabulās.

3.4. tabula

Kopsavilkums par BVKB apsekoto ēku skaita pēc to konstrukciju veida, vecuma un atrašanās reģiona

Galvenās konstrukcijas	Īpatsvars, %	Ēkas vecums	Īpatsvars, %	Ēkas novietojums	Īpatsvars, %
Dzelzsbetona	18,4	Līdz 5 gadi	5,9	Rīga	12,86
Koka	6,6	5 – 49 gadi	25,6	Kurzeme	10,29
Metāla	23,9	No 50 gadi	2,5	Latgale	17,72
Mūra	10,2			Vidzeme	4,37
Jaukta tipa	13,1			Zemgale	15,98

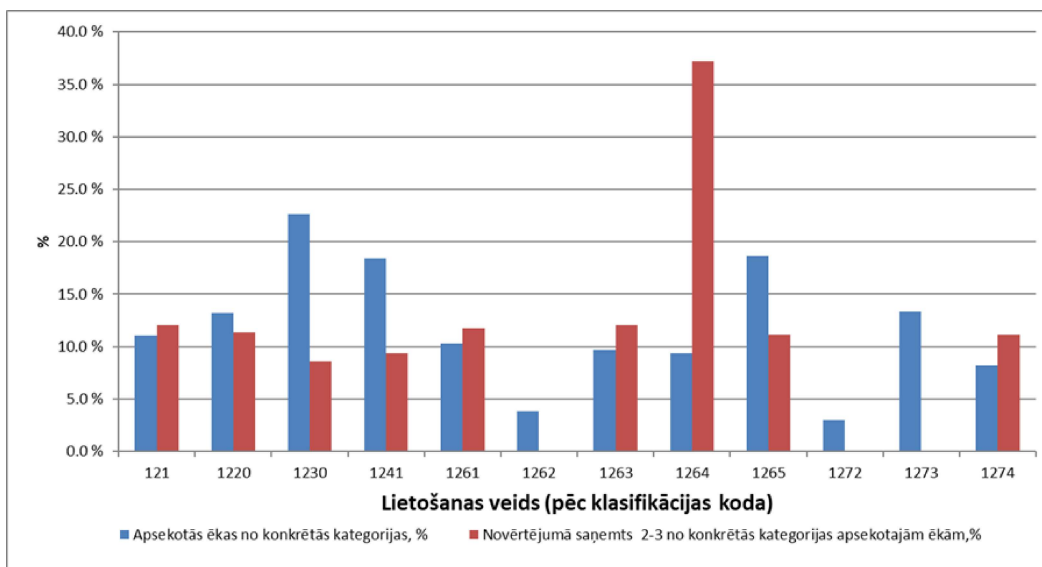
Apsekošanas rezultāti

Saskaņā ar iepriekš aprakstīto metodiku veikto pārbaužu rezultāti ir apkopoti tabulās 3.5 – 3.8 un grafikos attēlos 3.2 – 3.5.

3.5. tabula

Veikto apsekojumu rezultāti pēc ēkas lietošanas veida

Klasifikācijas kods	Pārbaudīto ēku skaits	Vērtējums	% no pārbaudītajām ēkām
121	51	0-1	87,9
	7	2-3	12,1
1220	187	0-1	88,6
	24	2-3	11,4
1230	181	0-1	91,4
	17	2-3	8,6
1241	29	0-1	90,6
	3	2-3	9,4
1261	30	0-1	88,2
	4	2-3	11,8
1262	4	0-1	100
	0	2-3	0
1263	168	0-1	88,0
	23	2-3	12,0
1264	27	0-1	66,8
	16	2-3	37,2
1265	56	0-1	88,9
	7	2-3	11,1
1272	2	0-1	100
	0	2-3	0
1273	2	0-1	100
	0	2-3	0
1274	40	0-1	88,9
	5	2-3	11,1
Kopā:	777	0-1	88,0
	106	2-3	12,0

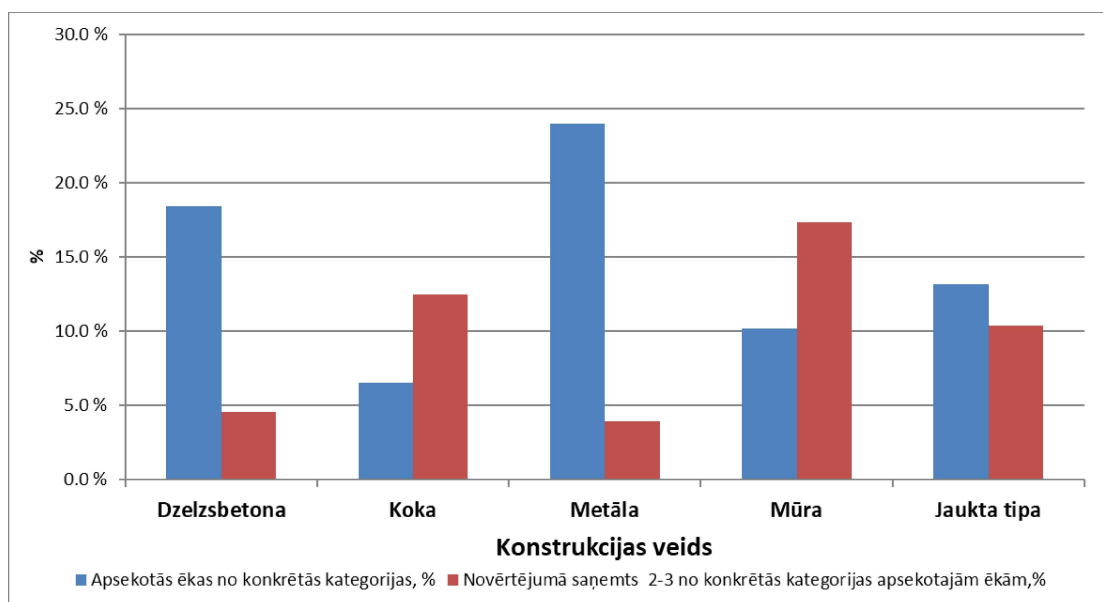


3.2. att. Vērtējumu 2-3 saņēmušās ēkas procentuāli pēc lietošanas veida

3.6. tabula

Veikto apsekojumu rezultāti pēc ēkas konstrukciju materiāla

Konstrukciju materiāls	Pārbaudīto ēku skaits	Vērtējums	% no pārbaudītajām ēkām
Dzelzsbetona	167	0-1	95,4
	8	2-3	4,6
Koka	7	0-1	87,5
	1	2-3	12,5
Metāla	98	0-1	96,1
	4	2-3	3,9
Mūra	367	0-1	82,7
	77	2-3	17,3
Jaukta tipa	138	0-1	89,6
	16	2-3	10,4
Kopā	777	0-1	88,0
	106	2-3	12,0

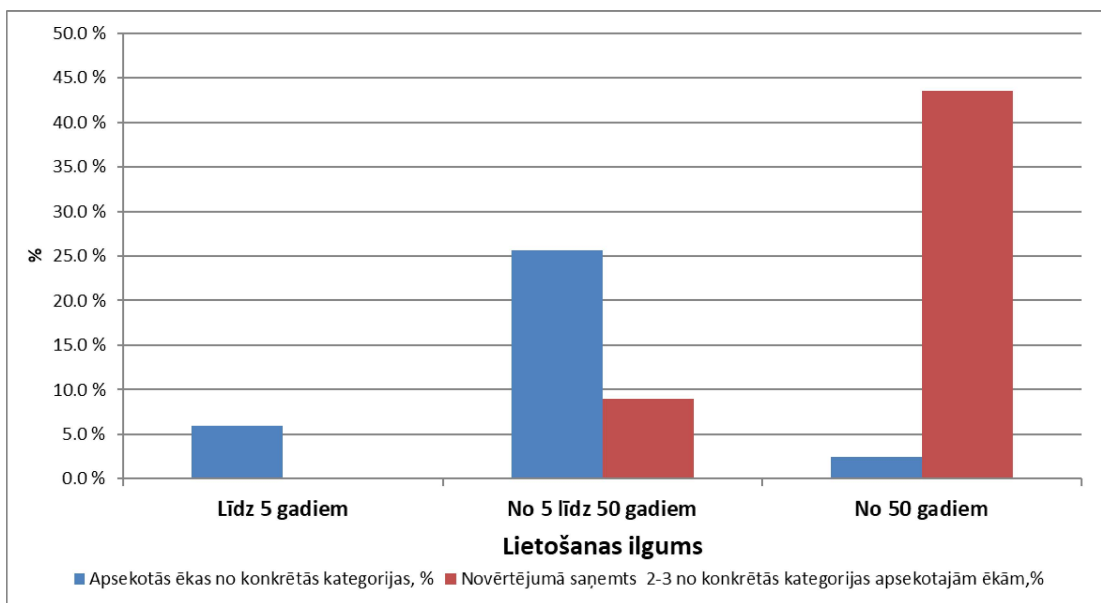


3.3. att. Vērtējumu 2-3 saņēmušās ēkas procentuāli pēc konstrukciju veida

3.7. tabula

Veikto apsekojumu rezultāti pēc ēkas vecuma

Konstruktiju materiāls	Pārbaudīto ēku skaits	Vērtējums	% no pārbaudītajām ēkām
Līdz 5 gadi	34	0-1	100
	0	2-3	0
5-49 gadi	695	0-1	91,0
	69	2-3	9,0
50 gadi un vairāk	48	0-1	46,5
	37	2-3	43,5
Kopā	777	0-1	88,0
	106	2-3	12,0

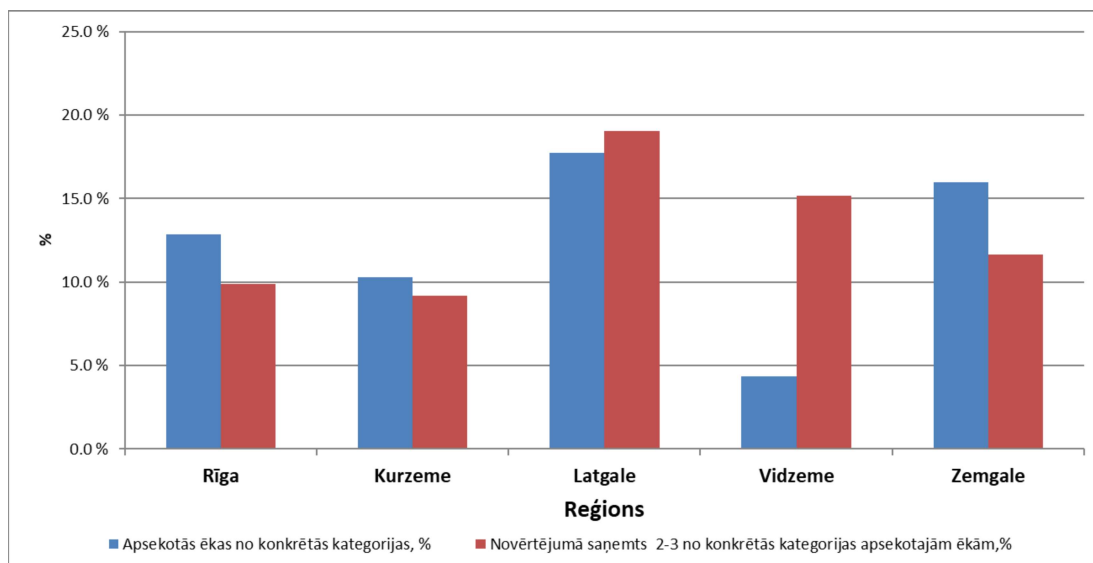


3.4. att. Vērtējumu 2-3 saņēmušās ēkas procentuāli pēc ēkas vecuma

3.8. tabula

Veikto apsekojumu rezultāti pēc ēkas atrašanās reģiona

Konstrukciju materiāls	Pārbaudīto ēku skaits	Vērtējums	% no pārbaudītajām ēkām
Rīga	418	0-1	90,09
	46	2-3	9,91
Kurzeme	89	0-1	90,82
	9	2-3	9,18
Latgale	136	0-1	80,95
	32	2-3	19,05
Vidzmes	28	0-1	84,85
	5	2-3	15,15
Zemgale	106	0-1	88,33
	14	2-3	11,67
Kopā	777	0-1	88,0
	106	2-3	12,0



3.5. att. Vērtējumu 2-3 saņēmušās ēkas procentuāli pēc reģiona

Veicot datu analīzi apsekotajām ēkām, netika atrasta korelācija starp apsekojamo ēku skaitu konkrētā kategorijā un vērtējuma rezultātu diapazonā 2-3 pēc lietošanas veida vai reģiona. Lai arī atsevišķi vienā kategorijā - ārstniecības vai veselības aprūpes iestāžu ēkas, atklāto bojājumu īpatsvars ir augstāks, salīdzinot ar citiem ēku lietošanas veidiem, tomēr analizējot dziļāk iemeslus, šāda situācija skaidrojama ar nepietiekošu tehnisko uzurēšanu, neveltot pienācīgus resursus savlaicīgai konstrukciju apkopei. Kopumā ēkām pēc lietošanas veida vai reģiona korelācijas koeficients ir robežās no 0,07 līdz 0,09, tādējādi var secināt, ka ēkas tehnisko stāvokli Latvijā neietekmē tas, kādam mērķim tā tiek lietota un kur tā tiek lietota.

Atšķirīgi dati tika konstatēti attiecībā uz ēkas vecumu un ēkas konstrukciju materiālu. Šeit ir redzama zināma korelācija, un iegūtie rezultāti uzrāda, ka drošuma līmenis ir zemāks ēkām virs 50 gadu vecuma, un, ja tās ir izgatavotas no mūra konstrukcijām vai koka.

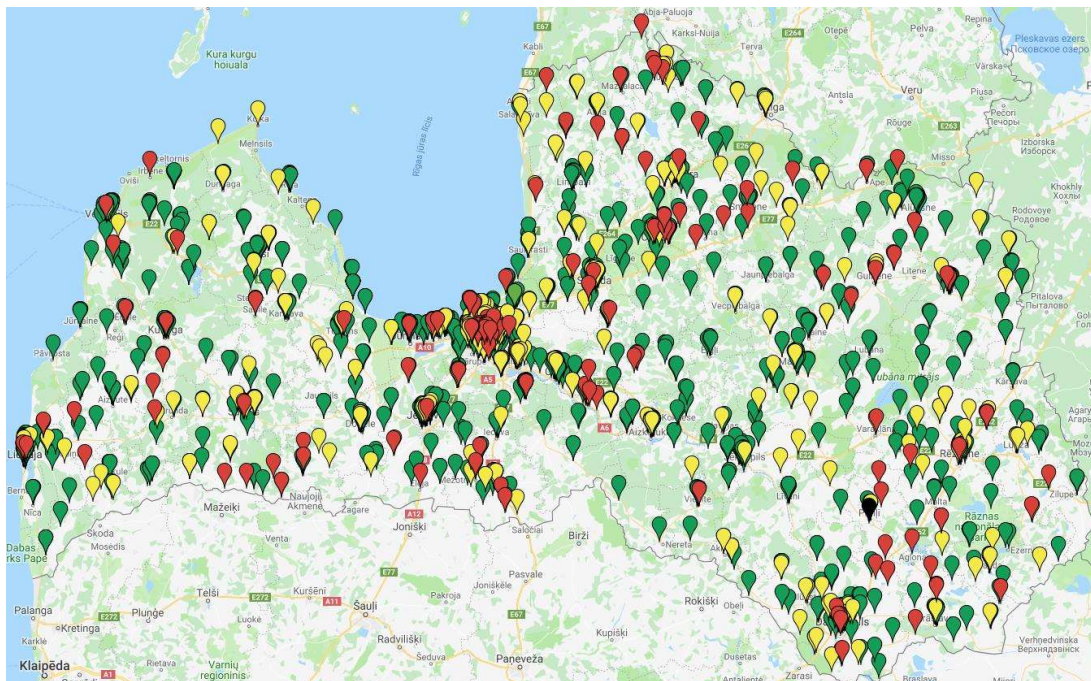
3.1.3. Rezultātu publiskošana sabiedrībai

Sadarbībā ar BVKB tika nolemts arī tas, ka ir svarīgi operatīvi informēt sabiedrību par sabiedrisko ēku drošību. Šim nolūkam tika izstrādāta interaktīvā karte (3.7. att.), kur atspoguļotas visas veiktās pārbaudes, izmantojot luksofora simbolus (3.6. att.):



3.6. att. Informatīvais luksofors.

Interaktīvās kartes pamatā ir “Google Map”, un tā lietotājiem ļauj interaktīvi lasīt sīkāku informāciju par veiktajām pārbaudēm, kas veiktas konkrētajai ēkai, pārbaudes kopējo rezultātu un būves atrašanās vietu. 2020. gada augustā bija fiksēti vairāk nekā 93 000 unikālu skatījumu, kas liecināja par sniegtās informācijas aktualitāti.



3.7. att. Interaktīvā pārbaudžu rezultātu karte.

(<https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=zvz8kIVSI8zA.kDknNWOdGSXk>)

3.2. Esošo būvju vērtēšanas prakse Eiropā

Ņemot vērā kopējo likumdošanas attīstību Eiropā klimata pārmaiņu jomā, ir arvien vairāk izaicinājumi esošo arī ēku veikspējas uzlabošanai mūsdienu prasībām. Visās valstīs ekspluatācijā esošu būvju drošība tiek uzraudzīta. Tomēr pastāv būtiskas atšķirības šo būvju projektēšanas un izbūves normatīvos un tradīcijās, tādēļ likumsakarīgas ir arī pastāvošās prasības ekspluatācijā esošu būvju uzraudzībā un lietošanā.

Šajā apakšnodaļā apkopots pētījums, kura mērķis ir izanalizēt Eiropas Savienības dalībvalstīs pastāvošo praksi attiecībā uz būvju konstrukciju drošuma vērtēšanu, lai atklātu citu valstu pieredzi un atziņas par drošuma vērtēšanas praksi. Pētījums balstīts publikācijā [2] pieejamo datu analīzē.

Atšķirības starp dalībvalstīm var pastāvēt attiecībā uz šādiem kritērijiem:

- uzraudzības objektu – ēku un inženierbūvju dažādība;
- normatīvo regulējumu (vērtēšana ir obligāta vai brīvprātīga);
- vērtēšanas regularitāti (vērtēšana ir ar noteiktu laika intervālu vai pie noteiktām darbībām ar būvi, piemēram, mainoties ēkas īpašniekam, mainot lietošanas veidu, pēc negadījumiem (zemestrīces, transporta izraisīti bojājumi, terorakti) vai pirms pārbūves vai atjaunošanas darbiem utt.);
- vērtēšanas saturu (metodoloģija) – vai tā ir vispārēja vizuāla pārbaude vai detalizētāka pārbaude, t. sk. instrumentāla;
- pieļaujamo (akceptējamo) drošuma līmeni (sabrukšanas varbūtības līmenis; zemāks vai līdzvērtīgs jaunbūvēm).

Atšķirības veido gan pastāvošās tradīcijas, gan profesionālo nozaru (būvnieku, būvju īpašnieku, u. c.) un akadēmiskās vides (izpētes, publikācijas) aktivitātes. Aktivitātes visvairāk ietekmē notikušie negadījumi ar būvēm, ejot bojā ievērojamam skaitam cilvēku. Pēc šādām traģēdijām parasti sabiedrība pieprasa aktivitātes, lai negadījumi neatkārtotos, un tas būvniecības nozarei liek meklēt risinājumus.

Saistībā ar šo jautājumu pēdējās desmitgadēs ir tapušas vairākas publikācijas par konstrukciju vērtēšanu, kurās tiek atsevišķi runāts arī par konstrukciju drošumu. Šī tēma ir īpaši aktuāla pēdējos gados, kad saskaņā ar dažādu ziņojumu palīdzību politikas veidotāji sāk uzsvērt nepieciešamību pievērsties esošo būvju atjaunošanas svarīgumam, tostarp attiecībā arī uz konstrukcijām.

2012. gadā Eiropas Komisija izdeva speciālu mandātu, ar kuru uzdeva Eiropas standartizācijas institūcijai CEN strādāt pie esošo Eirokodeksu uzlabošanas, un to nākamajās redakcijās (2. paaudzē) iestrādāt prasības attiecībā uz esošo būvju pārbūvēm un atjaunošanu.

Šajā darbā iesaistoties arī Eiropas Komisijas Apvienotajam pētniecības centram (*EC Joint Research Center*) – turpmāk JRC, 2013.–2015. gadā publicēts dokuments, kurā apkopots normatīvo dokumentu saraksts attiecībā uz būvju drošuma vērtēšanu 12 Eiropas Savienības valstīs - Kiprā, Čehijā, Dānijā, Francijā, Vācijā, Grieķijā, Īrijā, Itālijā, Holandē, Spānijā, Šveicē un Apvienotajā Karalistē [2]. Dokumentā nav iekļauta Latvijas prakse. Tieši šis fakts likās interesants, lai salīdzinātu minētā pētījuma datus ar Latvijas praksi.

Šajā sakarā tika izstrādāti 10 jautājumi (skat tabulu 3.9), lai novērtētu kopainu būvju vērtēšanas praksē Eiropā (12 dalībvalstīs un Latvijā), kā arī, lai pamatotu kvantitatīvas drošuma metodes izstrādi promocijas darbā. Atbildes meklētas publikācijas [2] referenču dokumentos un Latvijas normatīvajos aktos. Iegūtie rezultāti ir apkopoti tabulā 3.10.

3.9. tabula

Izpētes jautājumi

Nr.p.k.	Jautājums	Jautājuma mērķis
1.	Vērtēšana saistoša vai brīvprātīga?	saņemt atbildi par to, vai konstrukciju drošuma vērtēšanu būves īpašniekam ir jāveic obligāti vai tā ir viņa brīva izvēle
2.	Starptautiskie standarti vai nacionālā pieeja?	saņemt atbildi par to, vai konstrukciju drošuma vērtēšana dalībvalstī tiek veikta atbilstoši ISO vai EN standartiem vai saskaņā ar nacionālo nozares praksi
3.	Kvalitatīvā vai kvantitatīvā vērtēšana?	saņemt atbildi par to, vai vērtēšana tiek izdarīta pēc subjektīvām pazīmēm, analizējot snieguma atbilstību zināmiem priekšrakstiem (kvalitatīvā vērtēšana), vai arī tiek izdarīti metriski mērījumi un iegūtais rezultāts tiek kvantificēts (kvantitatīvā vērtēšana)
4.	Drošuma mērvienība?	saņemt atbildi par to, kā tiek mērīts drošums? Lai veiktu drošuma mērījumus, ir jābūt noteiktiem kritērijiem par to, kas ir drošums un vai to ir iespējams objektīvi izmērīt
5.	Tikai tilti vai arī ēku konstrukcijas?	saņemt atbildi par to, vai konstrukciju drošuma vērtēšana pēc normatīviem tiek veikta tikai tiltu konstrukcijām vai arī ēku konstrukcijas tiek pakļautas reglamentētajai vērtēšanai.
6.	Tikai viena metode vai vairākas izvēles?	saņemt atbildi par to, vai konkrētajā valstī konstrukciju drošuma vērtēšana tiek noteikta saskaņā ar vienu metodi konkrētai konstrukcijai, vai arī tiek piedāvātas pēc izvēles vai citiem kritērijiem dažādas metodes
7.	Drošuma līmeņi vienādi vai atšķirīgi?	saņemt atbildi par to, vai vērtējot konstrukcijas, drošuma līmenis ekspluatācijā esošām konstrukcijām tiek noteikts tāds pats kā jaunām vai atšķirīgs?
8.	Metodes vai vērtības?	saņemt atbildi par to, vai drošuma vērtēšana tiek noteikta metodei (tas ir kārtība, kā tiek veikts novērtējums) vai sasniedzamajam rezultātam (tas nozīmē, ka vērtēšanas metodes netiek noteikta, bet tiek noteiktas prasības sasniedzamajam rezultātam)
9.	Konstrukcijai vai būvei?	saņemt atbildi par to, vai, pastāvošajā praksē vērtētas, tiek tikai atsevišķas konstrukcijas, vai visa būve kopumā?
10.	Ieteikumi?	saņemt atbildi, vai kopā ar novērtējumu ir jāsniedz arī ieteikumi nepieciešamajiem uzlabojumiem, vai arī tas netiek regulēts

Pētījuma rezultāti

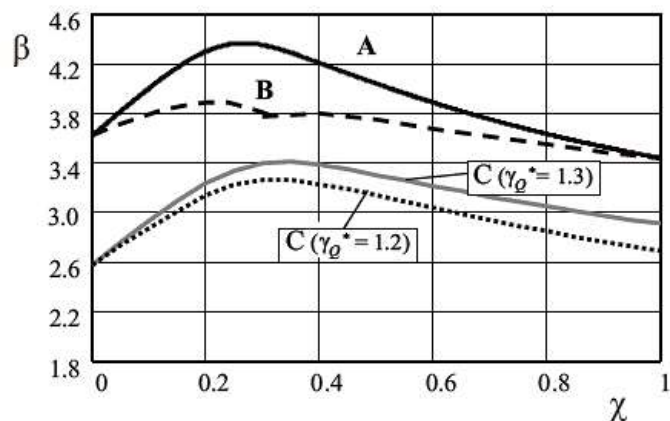
Jautājuma Nr.p.k. (skat. tab. 3.8.)	Dalībvalstu skaits atbilstoši jautājuma atbildei		
1.	Saistoši	Brīvprātīgi	Cits
	7	5	1
2.	Atzītie standarti	Nacionālās prasības	Cits
	3	7	3
3.	Kvalitatīvā vērtēšana	Kvantitatīvā vērtēšana	Jaukts
	4	4	5
4.	Drošuma indekss/sabrukšanas varbūtība	Cits	Netiek
	5	7	1
5.	Tilti	Ēkas	Abi
	5	-	8
6.	Viena metode	Dažādas metodes	Cits
	8	5	-
7.	Vienādi	Atšķirīgi	Cits
	2	3	8
8.	Metode	Rezultāts	Abi
	1	4	8
9.	Konstrukcijai	Būvei	NA
	9	4	-
10.	Ir	Nav	NA
	1	-	12

Piezīme. NA – nav atrasts

3.3. Uz dažādu normatīvo bāzu projektēto konstrukciju drošuma līmeņa noteikšana

3.3.1. Metodes teorētiskais pamatojums

Normatīvais regulējums būvniecības jomā visā pasaulē neizbēgami laika gaitā mainās. Standarti un normatīvi, saskaņā ar kuriem šobrīd jāveic ēku projektēšana, ievērojami atšķiras no normatīviem, piemēram, pirms 30 gadiem. Līdz ar to atšķiras arī drošuma līmenis ēkām, kas projektētas saskaņā ar dažādiem projektēšanas normatīviem. Latvijā šobrīd spēkā esošajos projektēšanas standartos Eirokodeksi, ieteiktais mērķa drošuma līmenis ir augstāks nekā vairumam ekspluatācijā esošo ēku, kas bija projektētas PSRS laikā un līdz Eirokodeksu ieviešanai 2015. gadā (skat. att. 3.8.). Par to liecina arī pētījumi, kas veikti bijušajā PSRS teritorijā, kuros salīdzināti drošuma līmeņi [75].



3.8.att. Drošuma indeksa izmaiņas atkarībā no slodzes koeficienta nesošām tērauda jumta konstrukcijām (raksturīgās mainīgās slodzes un kopējās raksturīgās slodzes attiecība) [75]; viena lietderīgā slodze; A – Eirokodeksa kombinācija saskaņā ar (6.10); B - Eirokodeksa kombinācija saskaņā ar (6.10a un 6.10b); C – saskaņā ar *SNIP*.

Visi minētie pētījumi veikti izmantojot komplicēto FORM metodi, kas minēta darba literatūras apskatā. Tā kā promocijas darbā izstrādātajā metodoloģijas 3. posmā nepieciešams noteikt ēku elementu individuālos drošuma indeksus β , kā arī lielākā daļa ēku projektētas pirms Eirokodeksa stāšanās spēkā, nepieciešama praktiska metode to aprēķinam.

Darbā izstrādātā metode balstīta uz Eirokodeksos definētajiem drošuma konceptiem, un, izmantojot konkrētā gadījumā atrastos, daļējos drošuma koeficientus iteratīvi piemeklē drošuma indeksa β vērtību. Izstrādātā metode piemērota ekspluatācijā esošo elementu drošuma novērtēšanai konkrētiem objektiem, kā arī vispārīgi dažādu būvnormatīvu sistēmu drošuma līmeņu salīdzināšanai.

Pēc literatūras apskates 2.nodaļā var secināt, ka viens no populārākajiem konstrukciju drošuma līmeņa raksturotājiem ir drošuma indekss (β), kas tieši korelē ar bojājumu iestāšanās varbūtību (P_f) nestspējas robežstāvoklim noteiktā laikā intervālā, kas vienāda ar konstrukcijas sabrukšanas varbūtību. Kā arī izriet, ka mērķa drošuma līmeņi ir kalibrēti atbilstoši vēsturiski pastāvošajai praksei, kas daļēji ieviesti konstrukcijas projektēšanas standartos.

Izplatītākā metode ir daļējo koeficientu jeb faktoru projektēšanas metode, kurā daļējie drošuma faktori ir atkarīgi no šiem mērķa drošuma līmeņiem [58].

Eirokodeksos tiek izmantoti divi daļējie drošuma faktori, veicot standarta projektēšanas procedūras. Tie ir materiāla īpašību γ_m drošības koeficienti un slodžu γ_f drošuma koeficienti. Vienkārša metode attiecīgā daļējā koeficienta γ_f iegūšanai ir mainīgās iedarbes Q_d aprēķina vērtības dalīšana ar tās reprezentatīvo vai raksturīgo vērtību Q_k . Līdzīgi iespējams iegūt daļējo koeficientu γ_m . Parasti izmanto normālo sadalījumu materiāla īpašību raksturīgajām un aprēķina vērtībām, kā arī pastāvīgajām slodzēm G . Sniega slodzēm izmanto Gumbel sadalījumu [76] (skat. 3.11. tabulu).

Nestspējas un slodžu raksturotāji saskaņā ar Eirokodeksiem

Mainīgais	Sadalījums	Vienādojums
R_k	Lognormālais	$\mu_R \cdot \exp(-1,645V_R)$
R_d	Lognormālais	$\mu_R \cdot \exp(-\alpha_R \beta_d V_R)$
G_k	Normālais	μ_G
G_d	Normālais	$\mu_G (1 + 0,7 \beta_d V_G)$
Q_k	Gumbela	$\mu_Q (1 - V_Q (0,45 + 0,78 \ln(-\ln(0,98))))$
Q_d	Gumbela	$\mu_Q (1 - V_Q (0,45 + 0,78 \ln(-\ln(\Phi^{-1}(\alpha_E \beta))))$

Piezīme. Šajās sakarībās μ , σ un V ir atbilstoši mainīgā vidējā vērtība, standarta novirze un variācijas koeficients, α ir FORM (First Order Reliability Method) jutības faktors un β drošuma indekss, Φ^{-1} ir sabrukuma varbūtības funkcija; γ – attiecīgais drošuma koeficients.

Drošuma indeksa (β) noteikšana atsevišķiem konstrukciju elementiem tiek meklēta ar iterācijas palīdzību, atrodot tā β_0 vērtība, kas ir tuvākā, lai nodrošinātu šādu nosacījuma izpildi:

$$U = (\gamma_G E_{G,k} + \gamma_Q E_{Q,k}) / \gamma_R R_k \rightarrow 1, \quad (3.1.)$$

kur attiecīgi:

materiāliem

$$\gamma_R = \frac{\exp(-1,645V_R)}{\exp(-\alpha_R \beta_d V_R)} \quad (3.2.)$$

pastāvīgajām slodzēm

$$\gamma_G = 1 / (1 + 0,7 \beta_d V_G) \quad (3.3.)$$

mainīgajām slodzēm

$$\gamma_Q = \frac{1 - V_Q(0,45 + 0,78 \cdot \ln(-\ln(\Phi^{-1}(\alpha_E \beta))))}{1 - V_Q(0,45 + 0,78 \ln(-\ln(0,98)))} \quad (3.4.)$$

un

γ - attiecīgie iedarbju un materiālu pretestības parciālie koeficienti;

V – attiecīgo iedarbju un materiālu pretestības variācijas koeficienti;

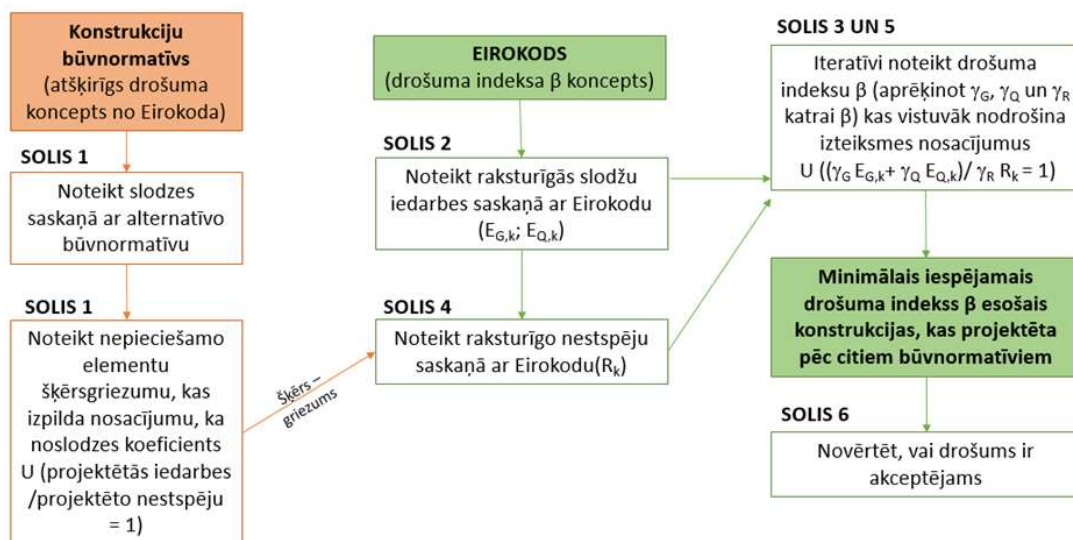
α - attiecīgie iedarbju un materiālu jutības koeficienti;

Φ^{-1} - standartizēta normālā sadalījuma kumulatīvā sadalījuma funkcija;

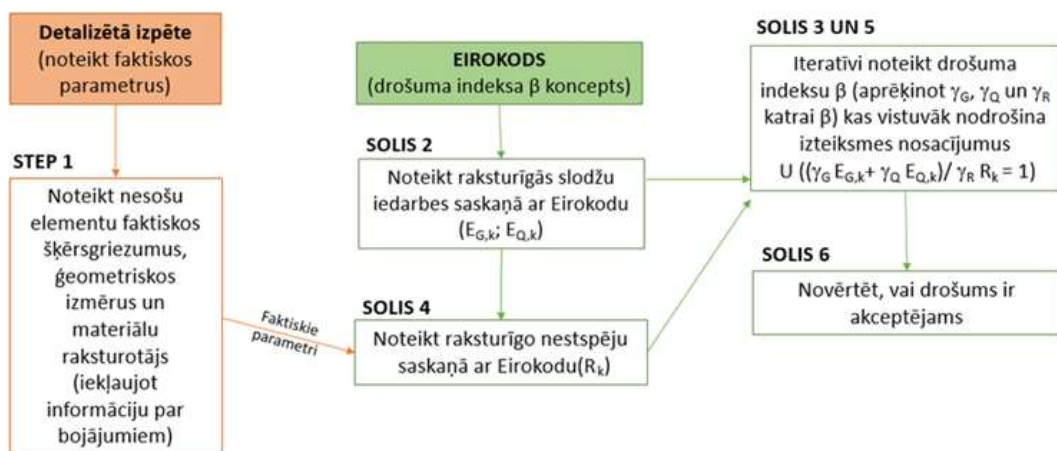
β – drošuma indekss jeb konstrukcijas sabrukšanas varbūtības raksturotājs;

U – konstrukciju noslodzes koeficients.

Drošuma indeksa β noteikšanas principiālā blokshēma redzama 3.9. un 3.10. attēlos. Lai izvēlētos starp 3.9. vai 3.10. attēlos redzamajām blokshēmām, inženierim jāveic objektā apsekošana uz vietas, un jāsalīdzina dokumentācijā pieejamie dati ar objektā konstatēto situāciju. Pieļaujama nestspējas raksturotāju samazināšana, izmantojot vizuālajā apskatē konstatēto faktisko izstrādājumu tehnisko stāvokli.



3.9. att. Drošuma indeksa noteikšanas principiālā blokshēma izstrādājumiem, kuriem ir iespējams noteikt faktiskos raksturotājus no dokumentācijas.



3.10. att. Drošuma indeksa noteikšanas principiālā blokshēma izstrādājumiem, kuriem nav iespējams noteikt faktiskos raksturotājus no dokumentācijas.

Starp drošuma indeksu un konstrukcijas sabrukšanas varbūtību pastāv sekojoša sakarība:

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) \quad (3.5.)$$

kur P_f – sabrukšanas varbūtība;

β – drošuma indekss

Φ^{-1} ir apgriezta standartizēta normālā sadalījuma funkcija.

Eiropas uzdotajam konstrukciju drošības līmenim drošuma indekss atbilst 50 gadu references intervālam. Gadījumā, ja saskaņā ar darba uzdevumu, nepieciešams noteikt konstrukciju drošumu īsākam vai garākam laika intervālam, to iespējams pārrēķināt, izmantojot izteiksmi (3.6.):

$$P_n = 1 - (1 - P_1)^n, \quad (3.6.)$$

kur P_n - sabrukšanas varbūtība (50 gadi)

P_1 - sabrukšanas varbūtība (1 gads).

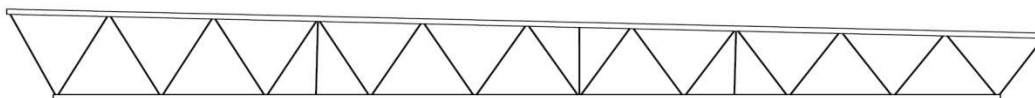
Zinot P_1 , izmantojot šo pašu sakarību (3.6.), iespējams noteikt varbūtību citam laika intervālam, kuru var attiecīgi konvertēt atpakaļ drošuma indeksā, izmantojot (3.5.) izteiksmi.

3.3.2. Drošuma indeksa β noteikšanas praktiskais lietojums (case study).

Tērauda kopne un sija

Iepriekš aprakstītās metodes praktiskā lietojuma izpēte veikta ekspluatācijā esošai ēkai Liepājā, Latvijā, kā arī izpētīts gadījums, ja tā pati ēka atrastos Rīgā, Latvijā. Individuālā drošuma indeksa β noteikšanai izvēlēta tērauda jumta kopne un pārseguma sija. Zināms, ka vērojamas atšķirības dažādu normatīvo sistēmu lietderīgo slodžu vērtībās, sevišķi tas attiecas uz klimatiskajām slodzēm.

Tērauda kopnes laidums ir 32 m, bet pārseguma sijas laidums ir 10,8 m. Kopnes ģeometriskā shēma parādīta 3.11. attēlā.



3.11. att. Tērauda kopnes ģeometriskā shēma.

Jumta kopne slogota ar pastāvīgo slodzi un sniega slodzi, kas vienmērīgi sadalīta pa kopnes garumu. Vēja slodzes ietekme nav ņemta vērā, jo tā rada nenozīmīgus iekšējos spēkus kopņu elementos. Visi šķērsriezuma profili ir kārbveida caurulprofili. Analīzei tiek izvēlēti trīs visvairāk noslogotie kopņu elementi dažādos spriegumstāvokļos:

- augšējās joslas elements spiedē un liecē;
- kopnes režģa diagonāle spiedē;
- apakšējās joslas elements stiepē.

Izpētē izmantoti šādi variācijas koeficienti: sniega slodzei $V_Q = 0,6$; pastāvīgai slodzei $V_G = 0,1$ un materiāla īpašībām $V_R = 0,08$. Jūtības koeficienti izvēlēti saskaņā ar ISO 2394 [24]

un ir vienādi ar $\alpha_Q = 0,7$ sniega slodzei, $\alpha_G = -0,7$ pastāvīgai slodzei un $\alpha_R = 0,8$ materiāla īpašībām. Eirokodeksa kombinācija veidota saskaņā ar (6.10) [76].

Zemāk aprakstīts metodes saskaņā ar attēlu 3.11 pielietošanas piemērs apakšējās joslas elementam stiepē (skat. tab. 3.15.). Visi iegūtie rezultāti apkopoti tabulās 3.13.-3.16.

- Solis 1 (pēc 3.11.att.)

Pirms drošuma indeksa β noteikšanas, jāaprēķina katra elementa izmantojuma koeficients U (aprēķinātais efekts/raksturīgais efekts) pēc projektēšanas normatīviem, kas bija spēkā ēkas celtniecības laikā (šajā gadījumā padomju būvnormatīvu *SNiP* sistēma [78]).

Aprēķinot saskaņā ar *SNiP* projektēšanas normatīvu, šajā gadījumā jāizmanto trīs drošības daļējie koeficienti. Tie ir - drošības koeficients materiāla īpašībām γ_m , kas vienāds ar 1,025, drošības koeficients γ_c , kas ņem vērā ekspluatācijas apstākļus un ir vienāds ar 1 elementiem, kas atrodas spiedē, spiedē un liecē un tikai liecē. Stieptiem elementiem tas ir vienāds ar 0,95. Trešais drošības koeficients γ_f ir slodzēm. Sniega slodzei (uz viegliem jumtiem) γ_f ir 1,6, pastāvīgajām slodzēm – 1,3 (izņemot tērauda pašsvaru, tas ir 1,05).

Pieliktās normatīvās (raksturīgās) iedarbes uz kopni apkopotas tabulā 3.12.

3.12. tabula

Normatīvās (raksturīgās) iedarbes kopnei ēkā Rīgā un Liepājā

Pieliktā slodze	Saskaņā ar <i>SNiP</i> Liepājā, kN/m	Saskaņā ar <i>SNiP</i> Rīgā, kN/m	Saskaņā ar Eirokodeksiem Liepājā un Rīgā, kN/m
G_k	2,4	2,4	2,4
G_d	2,8	2,8	N/A
Q_k	2,7	3,8	5,4
Q_d	4,3	6,1	N/A
G un Q ir pastāvīga un mainīga (sniega) slodze, kuru indeksi norāda, vai tā ir raksturīga vai aprēķina slodze; N/A – nav pielikts (noteikts vēlāk no iegūtā drošuma indeksa β)			

Dotajā piemērā maksimālais aprēķina spēks stieptajā joslā (slogots saskaņā ar *SNiP* Liepājai) ir 401,9 kN un maksimālā aprēķina pretestība profilam SHS 140x140x4 ($R_y = 335$ MPa) (saskaņā ar *SNiP*) [78] ir 679 kN. Tādējādi izmantojuma koeficients $U = 59$ %. Šis izmantojuma koeficients ir tikai informācija, kas nepieciešama, lai novērtētu faktisko noslodzes līmeni elementā.

- Solis 2 (pēc 3.9.att.)

Tam pašam kopnes stieptajam elementam atbilstoši Eirokodeksam iegūtā aprēķina slodze ir 633,2 kN.

- Solis 3 (pēc 3.9.att.)

Attiecīgi aplūkojamajam elementam ir iespējams noteikt drošuma indeksu β , izmantojot 3.1. – 3.4. izteiksmes, ja noslodzes koeficients U ir tuvu 100 %. Konstruktijas slodžu un nestspējas aprēķinu veic saskaņā ar vispārējām Eirokodeksa projektēšanas procedūrām.

Iteratīvi atrastais izmantojuma koeficients šajā gadījumā $U_{100} = 99,2$ %, sasniegts, ja tiek izmantoti daļējie koeficienti, kas atbilst vērtībai $\beta = 4,3$. Veicot drošuma aprēķinus, tiek

izmantoti divi daļējie drošuma faktori - materiāla pretestības γ_R drošuma faktors un slodzes daļējais drošuma faktors γ_m .

- **Solis 4 (pēc 3.9.att.)**

Aprēķinātā elementa nestspēja saskaņā ar Eirokodeksu ir 637,99 kN ($f_y = 345$ MPa).

- **Solis 5 (pēc 3.9.att.)**

Lai iegūtie drošuma līmeņi elementiem, kas projektēti ar dažādiem būvnormatīviem, būtu salīdzināmi, noslodzes līmeņi jāvienādo, t.i. atrod kāds šķērsriezums izpilda nosacījumu, ka noslodzes koeficients $U=100$ %, (apzīmēts ar U_{100}). Šajā gadījumā kopnes stieptā elementa šķērsriezums jāsamazina līdz SHS 90x90x4. Šim šķērsgriezumam atkārtoti 3. solī veiktās darbības. Šajā gadījumā iegūts, ka β ir tikai 2,5, kas atbilst sabrukuma varbūtībai, kas vienāda ar 0,621 %.

- **Solis 6 (pēc 3.9.att.)**

Iepriekš noteiktos drošuma indeksus β iespējams salīdzināt ar mērķa drošuma indeksiem no seku klasēm atbilstoši EN1990 ($\beta = 3,8$ attiecīgajai RC2 klases ēkai 50 gadu references periodam). Liepājā jumta kopņu stieptajam elementam drošības līmeņa starpība ir 34 %, ko varētu uzskatīt par ievērojamu, jo attiecīgā sabrukuma varbūtība palielināsies no 0,0072 % līdz 0,62 %.

Aprēķinātie elementu drošuma indeksi β analizētajiem elementiem ar Eirokodeksa aprēķina iedarbēm un elementu nestspējām pie faktiskās noslodzes svārstās no 4,3 līdz 3,3. Aprēķinātie elementu drošuma indeksi β analizētajiem elementiem ar lietderības koeficientu $U_{100} = 100$ % atbilstoši SNIp aprēķina slodzēm un elementu nestspējām Liepājas pilsētā svārstās no 2,5 līdz 2,8, bet Rīgā no 3,2 līdz 3,5. Visi iegūtie rezultāti apkopoti tabulās 3.16.-3.19.

3.13. tabula

Kopnes augšējās joslas elementu drošuma indekss spiedē un liecē

Pilsēta	Pie faktiskās noslodzes		Pie teorētiskās ~100% noslodzes			
	Liepāja		Liepāja		Rīga	
Standarts	SNIp	Eirokodekss	SNIp	Eirokodekss	SNIp	Eirokodekss
β		3,8		2,6		3,2
γ_Q		1,30		0,90		1,09
γ_G		1,27		1,18		1,22
γ_R		1,12		1,04		1,08
Iekšējie spēki	$N_d = 388$ kN $M_d = 4,89$ kNm	$N_{Ed} = 546,9$ kN $M_{s,Ed} = 6,9$ kNm $M_{h,Ed} = 8,6$ kNm	$N_d = 388$ kN $M_d = 4,89$ kNm	$N_{Ed} = 418,1$ kN $M_{s,Ed} = 5,3$ kNm $M_{h,Ed} = 6,6$ kNm	$N_d = 483$ kN $M_d = 6,08$ kNm	$N_{Ed} = 478,4$ kN $M_{s,Ed} = 6,0$ kNm $M_{h,Ed} = 7,5$ kNm
Noslodzes koeficients U	68%	98%	98%	100%	95%	99%
Šķērsriezums	□160x160x4		□130x130x4		□150x150x4	

3.14. tabula

Kopnes apakšējās joslas elementu drošuma indekss stiepē

Pilsēta	Pie faktiskās noslodzes		Pie teorētiskās ~100% noslodzes			
	Liepāja		Liepāja		Rīga	
Standarts	SNiP	Eirokekss	SNiP	Eirokekss	SNiP	Eirokekss
β		4,3		2,5		3,2
γ_Q		1,50		0,87		1,09
γ_G		1,30		1,18		1,22
γ_R		1,15		1,03		1,08
Iekšējie spēki	$N_d = 401,9 \text{ kN}$	$N_{Ed} = 633,2 \text{ kN}$	$N_d = 401,9 \text{ kN}$	$N_{Ed} = 424,2 \text{ kN}$	$N_d = 500 \text{ kN}$	$N_{Ed} = 496,3 \text{ kN}$
Noslodzes koeficients U	59%	99,2%	95%	98%	96%	97,5%
Šķērsriezums	□140x140x4		□90x90x4		□90x90x5	

3.15. tabula

Kopnes režģa diagonālelementa drošuma indekss spiedē

Pilsēta	Pie faktiskās noslodzes		Pie teorētiskās ~100% noslodzes			
	Liepāja		Liepāja		Rīga	
Standarts	SNiP	Eirokekss	SNiP	Eirokekss	SNiP	Eirokekss
β		3,3		2,8		3,3
γ_Q		1,12		0,96		1,12
γ_G		1,23		1,20		1,23
γ_R		1,08		1,05		1,08
Iekšējie spēki	$N_d = 99,2 \text{ kN}$	$N_{Ed} = 125,2 \text{ kN}$	$N_d = 99,2 \text{ kN}$	$N_{Ed} = 111,9 \text{ kN}$	$N_d = 123,4 \text{ kN}$	$N_{Ed} = 125,2 \text{ kN}$
Noslodzes koeficients U	81%	98%	95%	98%	100%	97,5%
Šķērsriezums	□80x80x3		□80x80x2.5		□80x80x3	

3.16. tabula

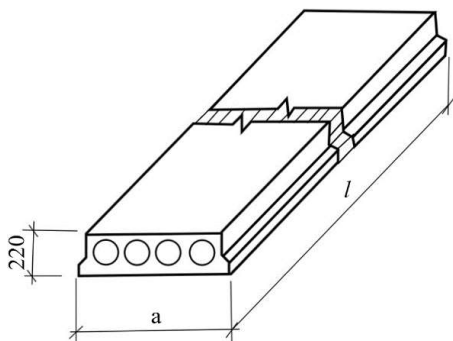
Jumta pārseguma sijas drošuma indekss liecē

Pilsēta	Pie faktiskās noslodzes		Pie teorētiskās ~100% noslodzes			
	Liepāja		Liepāja		Rīga	
Standarts	SNiP	Eiropkodeks s	SNiP	Eiropkodeks s	SNiP	Eiropkodeks s
β		3,5		2,7		3,5
γ_Q		1,19		0,93		1,19
γ_G		1,25		1,19		1,25
γ_R		1,10		1,04		1,10
Iekšējie spēki	$M_d = 589 \text{ kNm}$	$M_{Ed} = 777,5 \text{ kNm}$	$M_d = 589 \text{ kNm}$	$M_{Ed} = 650 \text{ kNm}$	$M_d = 732 \text{ kNm}$	$M_{Ed} = 777 \text{ kNm}$
Noslodzes koeficients U	80%	99%	100%	98%	99%	99%
Šķērsriezums	IPE600		IPE550		IPE600	

3.3.3. Drošuma indeksa β noteikšanas praktiskais pielietojums (case study). Dzelzsbetona paneļi

Tā kā vērojamas atšķirības dažādu normatīvo sistēmu mainīgo slodžu vērtībās uz pārsegumiem, kā arī saliekamajiem dzelzsbetona elementiem pašā nestspēju aprēķinu metodikā, par pētījuma objektu izvēlētas 5 tipveida dobumotas saliekamās dzelzsbetona plātnes atbilstoši produktu katalogam [79]. Plātnēm visi ģeometriskie un materiāla parametri ir vienādi, izņemot garumu l (skat. 3.12. attēlu un 3.17. tabulu).

3.17. tabula



3.12. att. Dobumoto dzelzsbetona paneļu ģeometriskā shēma.

Dobumoto dzelzsbetona paneļu tipi un galvenie parametri

Tips	Garums l , mm	Platums a , mm
PTK-47-12	4660	1190
PTK-51-12	5100	1190
PTK-59-12	5860	1190
PTK-60-12	5960	1190
PTK-63-12	6260	1190

Plātņu pašsvars saskaņā ar tehnisko datu lapām ir $3,00 \text{ kN/m}^2$, un šajā gadījuma pētījumā pieņemts, ka citas pastāvīgās slodzes ir $1,22 \text{ kN/m}^2$ [79].

Aprēķins veikts piecām dažādām esošām ēkām. Pielietotās mainīgās slodzes uz plātnēm ir parādītas tabulā 3.18. Plātņu laidumi pieņemti no 4,66 m līdz 6,26 m, pamatojoties uz tehniskajās specifikācijās ieteiktajiem attālumiem šāda tipa plātnēm ar augstumu 220mm.

3.18. tabula

Ēku lietošanas veidi un lietderīgas normatīvās slodzes

Ēkas tips pēc lietojuma veida		SNiP		EC1	
		Mainīgās iedarbes, Q_k , kN/m ²		Kategorija	Mainīgās iedarbes Q_k , kN/m ²
		Īstermiņa	Ilgtermiņa		
1.	Dzīvojamā ēka	1,5	0,3	A	2,0
2.	Biroju ēka	2,0	0,7	B	3,0
3.	Restorāns	3,0	1,0	D1	4,0
4.	Tirdzniecības ēka	4,0	1,4	D2	5,0
5.	Noliktava	5,0	-	E1	7,5

Saskaņā ar tehnisko datu lapām izvēlētās plātnes izgatavotas no betona B20 (korelē ar betonu C15/C20 saskaņā ar Eirokodeksiem). Stiegrojuma stieņi ir A-IV klase, ar pretestību $R_{s,ser} = f_{pk} = 590$ MPa un elastības moduli $E_s = E_p = 190$ GPa.

Izpētē izmantoti šādi variācijas koeficienti: mainīgai slodzei $V_Q = 0,25$; pastāvīgai slodzei $V_G = 0,1$ un materiāla īpašībām $V_R = 0,08$. Jūtības koeficienti izvēlēti saskaņā ar ISO 2394 [24] un ir vienādi ar $\alpha_Q = 0,7$ sniega slodzei, $\alpha_G = -0,7$ pastāvīgai slodzei un $\alpha_R = 0,8$ materiāla īpašībām. Eirokodeksa kombinācija veidota saskaņā ar (6.10) [77].

Metode individuālā drošuma indeksa atrašanai pielietota analogiski demonstrētajam kopnes piemēram (skat. iepriekšējo sadaļu). Kopā analizētajiem 25 gadījumiem pie 100% noslodzes (5 dažādi paneļi 5 ēku lietojuma veidiem) izpētes rezultāti apkopoti tabulā 3.19.

3.19. tabula

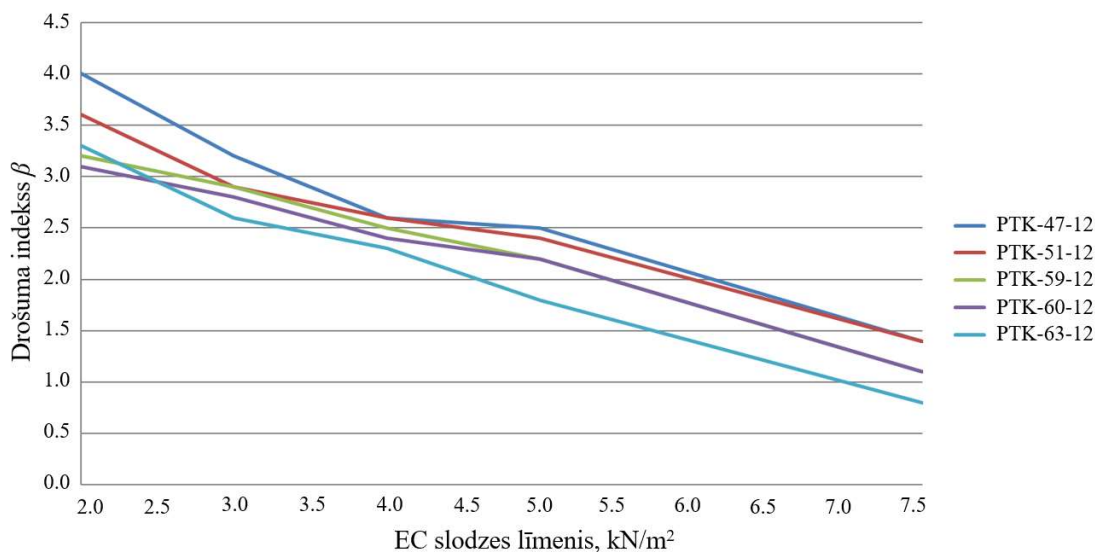
Dobumoto saliekamo pārseguma paneļu drošuma indekss

		(PTK-47-12)		(PTK-51-12)		(PTK-59-12)		(PTK-60-12)		(PTK-63-12)	
		L=4.7 m		L=5.1 m		L=5.9 m		L=6.0 m		L=6.3 m	
		SNiP	EC	SNiP	EC	SNiP	EC	SNiP	EC	SNiP	EC
Dzīvojamās ēkas		4Ø10		4Ø10		2Ø10&2Ø12		2Ø10&2Ø12		6Ø10	
	β		4.0		3.6		3.2		3.1		3.3
	U	71%	100%	84%	100%	94%	99%	97%	99%	88%	100%
Biroju ēkas		4Ø10		4Ø10		6Ø10		6Ø10		2Ø10&3Ø12	
	β		3.2		2.9		2.9		2.8		2.6
	U	82%	98%	97%	100%	89%	100%	92%	100%	97%	99%
Restorānu ēkas		4Ø10		2Ø10&2Ø12		7Ø10		7Ø10		2Ø10&4Ø12	
	β		2.6		2.6		2.5		2.4		2.3
	U	97%	98%	95%	100%	92%	99%	95%	98%	95%	100%
Mazum-tirdzniecības ēkas		2Ø10&2Ø12		6Ø10		2Ø10&4Ø12		8Ø10		9Ø10	
	β		2.5		2.4		2.2		2.2		1.8
	U	94%	100%	92%	99%	98%	100%	98%	100%	98%	99%
Noliktavu ēkas		2Ø10&2Ø12		6Ø10		2Ø10&4Ø12		2Ø10&4Ø12		9Ø10	
	β		1.4		1.4		1.1		1.1		0.8
	U	90%	99%	88%	99%	94%	99%	97%	100%	93%	99%

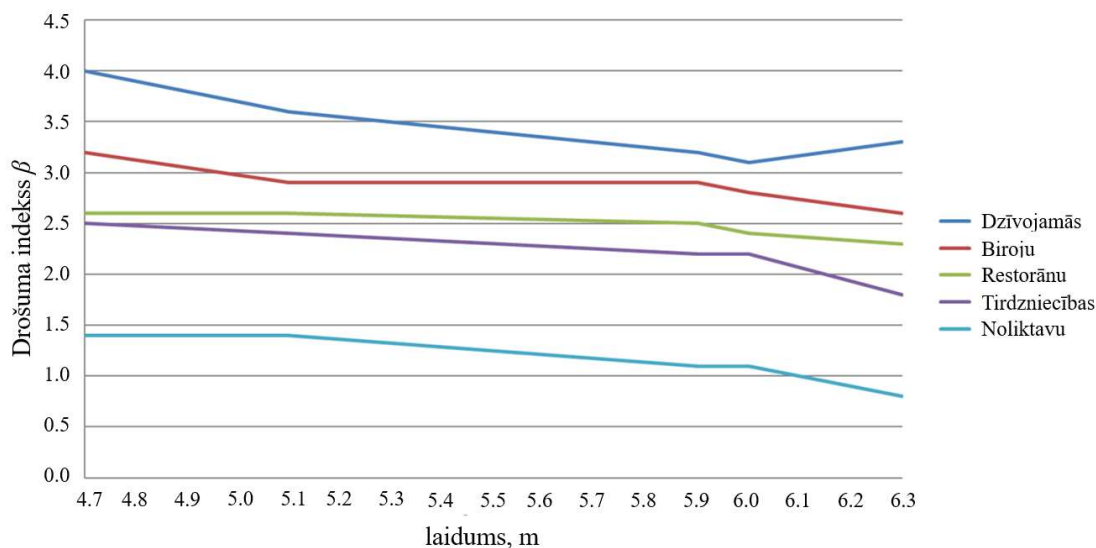
Pārseguma paneļu drošuma indekss β atkarībā no paneļu tipa un lietojuma veida svārstās robežās no 4,0 līdz 3,1 dzīvojamajām ēkām, no 2,5 līdz 0,8 tirdzniecības un noliktavu ēkām.

Drošuma indeksa β mērķa vērtība atbilstoši Eiropkodeksam projektētai ēkai ar kalpošanas laiku 50 gadu un RC2 drošuma klasi ir 3,8. Zemākas mērķa drošuma indeksa β vērtības ir noteiktas ISO 13822 [25]. Ēkām ar vidējo seku klasi un periodu 50 gadi ir 2,5.

Drošuma indeksa β izmaiņas atkarībā no raksturīgajām mainīgajām slodzēm uz pārsegumu un atkarībā no paneļu laiduma apkopotas attiecīgi att. 3.13. un 3.14.



3.13. att. Drošuma indeksa izmaiņas pie 100% noslodzes atkarībā no raksturīgās mainīgās slodzes vērtības.



3.14. att. Drošuma indeksa izmaiņas pie 100% noslodzes atkarībā no paneļu laiduma.

Lūzumi grafikos skaidrojami ar to, ka konstruktīvo apsvērumu dēļ, aprēķinus veicot saskaņā ar *SNiP* sistēmu, ne vienmēr iespējams noslodzes koeficientu U_{100} iegūt tieši 100%. Redzams,

ka apskatītajos intervālos drošuma indeksa samazinājums ir straujāks, palielinoties mainīgai slodzei uz pārsegumu, nekā, palielinoties paneļa laidumam. Tādejādi var secināt, ka atšķirībām aprēķina procedūrās starp apskatītajiem normatīviem ir mazāka ietekme uz elementa drošumu kā definētās dažādās mainīgo slodžu vērtības.

3.4. Nodaļas secinājumi

Šajā nodaļā ir veikti nepieciešamie priekšdarbi, kas nepieciešami tālākās drošuma vērtēšanas metodoloģijas izstrādē.

1) Nodaļas pirmajā daļā piedāvātā metode ļauj masveidā indikatīvi novērtēt ēku stāvokli balstoties uz vizuālo vērtēšanu, kā arī informēt sabiedrību par riskiem saistībā ar ēku drošību. Metode ir laika ziņā efektīva, vienkārša lietošanai, viegli pārskatāma, sabiedrībai un ieinteresētajām personām saprotama. Novērtējums skalā no 0 līdz 3 ir piemērots kopējā ēku tehniskā stāvokļa raksturošanai.

Šī metode tika prezentēta starptautiskā konferencē Viļņā 2016.gadā, par to izdota publikācija [74] un no 2016.gada tiek lietota BVKB darbā publisko ēku drošuma kontrolē.

Iegūtā informācija, pielietojot metodi, par dažādiem ēku lietošanas veidiem attiecībā uz būtisko raksturotāju izpildi, sniedz priekšstatu kontrolējošām institūcijām par problemātiku kopumā tālākā rīcības plāna izstrādei un normatīvā regulējuma pilnveidei.

No iegūtajiem apsekošanas rezultātiem arī izdarāms secinājums, ka publisko ēku jomā būtiski ir pievērst uzmanību ēkas nesošajām konstrukcijām un to vecumam. Tādēļ ēkām, kurām ir sniegts novērtējums 2-3, ir jāveic to konstrukciju detalizēta izpēte. Kā viena no metodēm šāda izpēte ir piemērojama promocijas darba ietvaros izstrādātā metodoloģija, kas ļauj noteikt gan atsevišķo ēku konstruktīvo elementu drošumu, gan kopējo ēkas konstrukciju drošuma līmeni (skat. 4. nodaļu).

2) Iepazīstoties ar 12 Eiropas Savienības dalībvalstu pastāvošo praksi un veicot šajās valstīs pastāvošo normatīvo dokumentu analīzi attiecībā uz būvju konstrukciju drošuma vērtēšanu, galvenie secinājumi ir:

a) drošuma vērtēšana ir obligāta un galvenokārt atbilstoša nacionālajiem (nevis starptautiskajiem) standartiem;

b) vērtēšanā tiek izmantotas gan kvalitatīvās vērtēšanas metodes, gan kvantitatīvās, lielākajā daļā gadījumu izmantojot abu metožu apvienojumu;

c) piecās valstīs konstrukciju drošuma indekss tiek izmantots kā drošuma raksturotājs, tomēr dažādi interpretējot drošuma līmenī lietošanā esošām konstrukcijām salīdzinot ar jaunām, savukārt pārējās astoņās valstīs kā drošuma mērvienība ir noteikti citi raksturotāji (dažādi koeficienti, bojājumu pazīmes u. tml.), un nav korelācija rezultātam ar būves lietošanas resursu;

d) Latvija ir vienīgā valsts salīdzinot ar pārējām 12, kurā netiek mērīts drošums, bet tiek sniegts vērtējums par ēkas nolietojumu.

3) Promocijas darbā izstrādātā metode, elementu drošuma indeksa β atrašanai, piemērota ekspluatācijā esošo elementu drošuma novērtēšanai konkrētiem objektiem, kā arī vispārīgi

dažādu būvnormatīvu sistēmu drošuma līmeņu salīdzināšanai, neizmantojot komplicēto FORM/SORM simulāciju metodi.

Izstrādātā metode pielietota drošuma līmeņu izpētei atsevišķām konstrukcijām, kas projektētas saskaņā ar SNIp sistēmas normatīviem. Pētījuma rezultātā secināts, ka neskatoties uz to, ka kopumā analizēto elementu nestspēja ir augstāka, izmantojot Eirokodeksa projektēšanas sistēmu (piemēram, tāpēc, ka tiek izmantoti šķērsriezumu plastiskās ģeometriskās īpašības tērauda konstrukcijām), elementu drošuma indekss β ir ievērojami zemāks, izmantojot SNIP normatīvu sistēmu. Šis secinājums sakrīt ar citu autora pētījumu rezultātiem. Pamatā tāpēc, ka aprēķina iedarbes Eirokodeksa sistēmā ir ievērojami lielākas, kā definētās SNIp normatīvos dokumentos.

Vienādu ekspluatācijā esošo jumta elementu drošuma indekss un tādejādi sabrukuma varbūtība ir atšķirīga dažādās Latvijas vietās (pētījumā salīdzināta Rīga un Liepāja), izmantojot drošuma indeksa vērtību, kas balstīta uz Eirokodeksos definētajiem drošuma konceptiem. Tas ir skaidrojams ar atšķirībām klimatisko slodžu kartēs, kas attiecīgi domāts SNIP un Eirokodeksa standartu sistēmu pielietošanai.

Pētījuma ietvaros analizēto konstrukcijas elementu drošuma indekss β atkarībā no spriegumstāvokļa svārstās robežās no 2,5 līdz 2,8 Liepājā un no 3,2 līdz 3,5 Rīgā. Tās, piemēram, ir zemākas nekā mērķa drošuma indeksam β , kas noteikts standartā ISO 13822 [25] CC2 ēkām ar minimālo drošuma periodu 50 gadi. Tomēr, saskaņā ar informāciju citos literatūras apskatā minētajos avotos, vērtības var būt akceptējamās ekspluatācijā esošām ēkām. Tā kā darba ietvaros apskatīti tikai atsevišķi konstrukciju elementi dažos spriegumstāvokļos, praktiskā projektēšanā, veicot esošo ēku pārrēķinu vai tehnisko apsekošanu, rekomendēts pievērst pastiprinātu uzmanību elementiem, kuru noslodze saskaņā ar SNIp normatīvu sistēmu tuvojas 100%. Pastāv risks, ka šādu elementu sabrukuma varbūtība ir neatbilstoša mūsdienu drošuma prasībām Eiropā.

Secināts, ka saliekamo dzelzsbetona dobumoto plātņu, kas projektēti saskaņā ar *SNIp* sistēmu, drošuma līmenis noliktavu un tirdzniecības platību vajadzībām ir ievērojami zemāks, kā ieteikts attiecīgajos standartos [65], tādejādi rekomendēts šādām ekspluatācijā esošām ēkām attiecīgi ierobežot ekspluatācijas slodzes vai veikt pastiprināšanas darbus.

Šajā nodaļā veiktie pētījumi prezentēti 2017.gadā starptautiskās konferencēs Rēzeknē un Rīgā (Latvija), kā arī Kaiserlautern (Vācija), un izdotas publikācijas [80; 81].

4. EKSPLOATĀCIJĀ ESOŠU ĒKU KOPĒJĀ DROŠUMA LĪMEŅA NOTEIKŠANAS METODOLOĢIJA

4.1. Vispārīgi

Balstoties uz iepriekšējās nodaļās veikto pētījumu analīzi, veiktajiem apsekojumiem un rezultātiem, šajā nodaļā ir sniegts izklāsts par ekspluatācijā esošu ēku kopējā drošuma līmeņa noteikšanas metodoloģiju, kas balstīta uz ēkas kopēja drošības indeksa ieviešanu, tādējādi globāli raksturojot ēkas mehānisko stiprību un stabilitāti.

Kā minēts iepriekšējās nodaļās, atsevišķo ēkas elementu mehānisko stiprību un stabilitāti raksturo šo atsevišķo elementu drošuma indekss (β), kas tieši korelē ar bojājumu iestāšanās varbūtību (P_f). Zinot atsevišķo elementu bojājumu varbūtību, iespējams noteikt visas ēkas bojājuma varbūtību, izmantojot varbūtības modelēšanas metodes, kā aprakstīts iepriekš 2.nodaļā.

Ēkas kopējā bojājuma varbūtība var kalpot kā galvenais ēkas mehāniskās stiprības un stabilitātes raksturotājs, tomēr kamēr regulējumā nav noteikti bojājumu varbūtības līmeņi, tikmēr nav pamata analizēt attiecīgos drošuma līmeņus, izmantojot bojājumu iestāšanās varbūtības raksturotājus. Tāpat arī ir jāņem vērā esošās ēku vērtēšanas tradīcijas un vērtētāju profesionālā kompetence, kas padara ēku drošuma vērtēšanu ar varbūtības modelēšanas metodēm tikai kā teoriju, nevis praktiski izmantojamu metodi.

Promocijas darbā izstrādāta metodoloģija sevī ietver racionālākos risinājumus no dažādām drošuma teorijas publikācijām un literatūras avotos piedāvātajām koncepcijām, apvienojumā ar Latvijā esošo normatīvo regulējumu, kā arī ēku tehniskās apsekošanas un konstrukciju izpētes tradīcijām. Metodoloģijas koncepts atspoguļots blokshēmā (4.1. att.) un sevī ietver sekojošus soļus:

1. Sākotnējā tehniskā apsekošana uz vietas objektā, ar mērķi noteikt atrašanās vietu, stāvokli, slodzes, ietekmi uz vidi, īpašās iezīmes un nepieciešamību veikt turpmākas pārbaudes.
2. Visu attiecīgo dokumentu iegūšana un pārskatīšana, tostarp slogošanas (lietošanas) vēsture, apkope, remonts un izmaiņas.
3. Ēkas konstruktīvā modeļa izveide, kas reprezentē ēkas modeli un iekļauj visus galvenos konstruktīvos elementus.
4. Noteiktas pārbaudes uz vietas un mērījumi, tostarp, iespējams, pierādījumu iegūšana ar slogošanu attiecībā uz ēkas galvenajiem konstruktīvajiem elementiem.
5. Apkopoto datu analīze un drošuma līmeņa noteikšana ēkas galvenajiem konstruktīvajiem elementiem.
6. Ēkas kopējā drošuma līmeņa noteikšana, izmantojot ietekmes svorošanas modelēšanu.
7. Lēmumu analīze, lai apsvērtu, vai un cik daudz uzlabojumi būtu jāveic, lai sasniegtu normatīvos noteikto drošuma līmeni.

Metodoloģijas izpildi var iedalīt trīs posmos:

1.posms, kur tiek veikta vispārēja ēkas tehniskā apsekošana, vizuāli identificējot bojātās konstrukcijas un sniedzot informāciju par konstrukciju materiālu, lietošanas apstākļiem, konstrukciju bojājuma raksturu, kā arī iespējamā sabrukuma riska līmeni. Šī posma teorētiskais izklāsts 3.1. nodaļā. Šī posma noslēgumā:

- a) ja ir konstatēti bojājumi, kurus ir nepieciešams nekavējoties novērst, jo tie apdraud cilvēku dzīvību vai veselību, tad metodoloģijas izpilde ir jāpārtrauc, neuzsākot 2.posmu;
- b) ja nav konstatētu bojājumu un ēkas konstrukcijas ir labā stāvoklī, var pieņemt lēmumus, ka nav nepieciešams veikt tālāku konstrukciju detalizētu izpēti un uzskatīt, ka ēkas drošuma līmenis ir atbilstošs normatīvo noteiktajam;
- c) turpināt detalizēta konstrukciju tehnisko izpēti, pārejot uz 2.posmu.

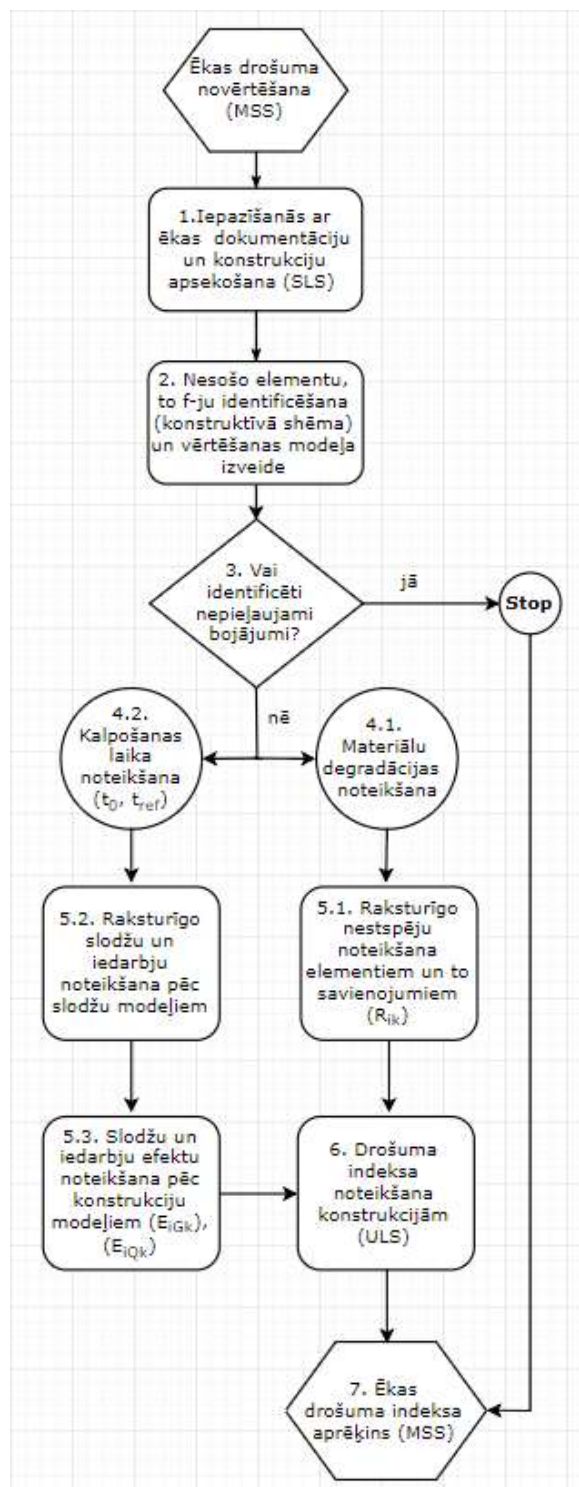
2.posma uzdevums ir veikt detalizētu tehnisko izpēti izvēlētajiem konstrukciju elementiem. Tehniskās izpētes uzdevums ir iegūt objektīvu informāciju, lai tā būtu noderīga turpmākajiem aprēķiniem. Šajā posmā tiek sastādīts ēkas raksturojošais konstruktīvais modelis, izpētīti visi ierobežojumi un pieņēmumi gan materiālu, gan iedarbju pusē, kā arī noteikti atsevišķo ēkas konstrukciju elementu drošuma indeksi β . Šī posma izpildei ieteicams lietot standartizētas metodes, kā piemēram ISO13824 [25] vai EN1998-3 [82]. Šī posma teorētisko izklāstu skatīt 3.3. nodaļā.

3.posmā, apkopojot 1. posma un 2. posma rezultātus, tiek simulēti sabrukšanas scenāriji ēkas drošumu raksturojošam konstruktīvajam modelim un veikti nepieciešamie aprēķini ēkas kopējā drošuma līmeņa noteikšanai. Šī posma teorētisko izklāstu tālāk skatīt šajā nodaļā.

1. posms (1.–3. solis)
Ēkas tehniskā apsekošana

2. posms (4.–6. solis)
Ēkas konstrukciju tehniskā izpēte

3. posms (7. solis)
Ēkas kopējā drošuma līmeņa noteikšana



4.1.att. Ēkas drošuma līmeņa noteikšanas principiālā blokshēma

4.2. Ēkas tehniskā apsekošana

Pirmā posma uzdevums ir iepazīties ar ēkas izbūves un lietošanas dokumentāciju, lai secinātu, kādas ir izvirzītās prasības attiecībā uz ēkas konstrukciju mehānisko stiprību un stabilitāti, kā arī noteiktu visus iespējamus faktorus, kas palīdzēs un/vai traucēs, saskaņā ar šo metodoloģiju nonākt pie atbildes par ēkas drošuma līmeni.

Vērtējot lietošanas dokumentāciju, ir svarīgi iepazīties ar pieņēmumiem un nosacījumiem, pēc kuriem tika projektētas un izbūvētas attiecīgās ēkas konstrukcijas, īpaši attiecībā uz to fizikālajām īpašībām (stiprības robežvērtībām), kā arī attiecībā uz izmaiņām vai apstākļiem, kas varēja radīt šo konstrukciju fizikālo īpašību pasliktināšanos (korozija, nogurums, šļūde u.tml.).

Pēc dokumentācijas izpētes ir jāveic objekta apsekošana, īpaši pievēršot uzmanību tām konstrukcijām un tiem savienojumiem, kur tika fiksēti jautājumi vai potenciālās problēmnzonas par to stāvokli dokumentācijas izpētes laikā. Apsekošanā iespējams izmantot arī Latvijas būvnormatīvā LBN 405 sniegtos norādījumus apsekošanai.

Pirmā posma jeb kvalitatīvās vērtēšanas noslēdzošajā fāzē ir nepieciešams pārbaudīt, vai nav atklāti apstākļi, kas liecina par atsevišķu konstrukciju un to daļu stabilitātes zudumu, transformēšanos mehānismā, sistēmas noturības novērtējumu un konstruktīvo elementu robežstāvokļu maiņas neesamību. Šo novērtējumu uzdevums ir sekojošs:

- *Stabilitātes novērtējums;*

Apsekošanas uzdevums ir pārliecināties, vai nav acīm redzami draudi konstrukcijai apgāzties, t.i., tiek konstatēts tās stabilitātes zudums. Konstatējot šādus draudus, kas pamatojami ar konstrukciju normatīvos noteikto robežvērtību pārsniegšanu, nepieciešams pārtraukt pārbaudi un veikt pasākumus draudu novēršanai.

- *Transformācijas novērtējums;*

Apsekošanas uzdevums ir pārliecināties, vai nav acīm redzami draudi konstrukcijai vai tās daļai transformēties par mehānismu. Pie šādiem draudiem pieskaitāms konstrukciju stāvoklis, kad to bojājums ir tādā pakāpē, ka šo draudu iestāšanās ir iespējama jebkurā brīdī. Konstatējot šādus draudus, nepieciešams pārtraukt pārbaudi un veikt pasākumus draudu novēršanai.

- *Sistēmas noturības novērtējums;*

Apsekošanas uzdevums ir pārliecināties, vai nav acīm redzami draudi konstrukcijai vai tās daļai strauji mainīt savu konstruktīvo shēmu. Pie šādiem draudiem pieskaitāms konstrukciju stāvoklis, kad to bojājums ir tādā pakāpē, ka šo draudu iestāšanās ir iespējama jebkurā brīdī. Konstatējot šādus draudus, nepieciešams pārtraukt pārbaudi un veikt pasākumus draudu novēršanai.

- *Konstruktīvo elementu robežstāvokļu novērtējums.*

Apsekošanas uzdevums ir pārliecināties, vai nav pazīmes, ka konstruktīvie elementi ir sasnieguši galējos stiprības robežstāvokļus (lokālais vai globālais sabrukums). Konstatējot šādas pazīmes, nepieciešams pārtraukt pārbaudi un veikt pasākumus draudu novēršanai.

Apsekošanas 1. posma noslēgumā tiek sastādīta tehniskās apsekošanas atskaite, kurā ietvertas sekojošais:

- a) vispārīgā informācija par ēku un tās raksturotājiem;

- b) apraksts par ēkai iepriekš veiktajām pārbūvēm, izmaiņām konstruktīvajā shēmā, slogojumos, kā arī par pieejamo dokumentāciju ēkai un tajā ietverto datu objektivitāti;
- c) informācija par identificētajiem bojājumiem konstrukcijās un to savienojumos, kas rada ietekmi uz konstrukciju nestspēju;
- d) informācija, vai konstrukciju slogojums nepārsniedz raksturīgo noslogojumu?
- e) ēkas stabilitātes, transformācijas un sistēmas noturības novērtējums;
- f) ieteikumi tālākajām aktivitātēm, t. sk. tehniskajai izpētei.

4.3. Ēkas konstrukciju tehniskā izpēte

Otrā posma sākumā, pamatojoties uz pieejamo informāciju no 1. posma, tiek sastādīta ēkas nesošu elementu konstruktīvā shēma, lai identificētu, kā ēkas nesošās konstrukcijas uzņem un sadala slodzes un iedarbes.

Pamatojoties uz ēkas konstruktīvo modeli un 1. posmā iegūto informāciju tiek pieņemts lēmums – vai un kuriem ēkas nesošajiem elementiem veikt detalizētu tehnisko izpēti un ar kādām metodēm, lai noteiktu individuālo elementu drošuma līmeni.

Detalizētajai izpētei jānodrošina sekojošais:

- a) šādu dokumentu detalizēta izpēte un pārskatīšana:
 - rasējumi, specifikācijas, konstruktīvie aprēķini, būvniecības ieraksti, veikto pārbaužu un tehniskās apkopes uzskaites, informācija par izmaiņām;
 - normatīvie akti un priekšraksti, būvnormatīvi un standarti, tipveida risinājumu priekšraksti, kas izmantoti konstrukciju projektēšanā un izbūvē;
 - ģeotehniskās izpētes dokumentācija;
- b) detalizēta konstrukciju ģeometrijas un materiālu izpēte objektā:

Konstrukciju elementu detaļas un izmērus, kā arī materiālu īpašību raksturīgās vērtības var iegūt no projektēšanas un izbūves dokumentiem, ja dokumenti ir pieejami un nav iemesla šaubām. Tomēr, jebkuru šaubu gadījumā ir nepieciešams veikt mērījumus uz vietas vai ar paraugu testēšanu laboratorijā. Pārbaužu apjomu detalizētajai izpētei un analīzei nosaka attiecīgo elementu detaļas un izmēri, kā arī pieejamās informācijas kvalitāte. Detalizētās izpētes plānošana ir balstīta uz jau pieejamo informāciju. Detalizētās izpētes rezultātiem jānodrošina datu vērtības kopā ar izklaidēm (nenoteiktībām), kas tālāk ietekmēs drošuma aprēķinus individuālajiem elementiem;

- c) slodžu noteikšana:

Slodzes un jo īpaši klimatiskās iedarbes attiecībā uz konstrukcijām nosaka, veicot analīzi saskaņā ar EN 1990 [65]. Slodžu izvietojumu un sastāvu nosaka saskaņā ar EN 1991 [77] dotajām rekomendācijām. Raksturīgo slodžu un iedarbju noteikšanai lieto EN 1991 dotās rekomendācijas, ievērtējot iepriekš izvēlēto kalpošanas laika intervālu;

- d) konstruktīvo elementu slogošana:

Konstrukciju slogošanu izmanto, lai izdarītu pieņēmumus par konstrukciju nestspēju, ja citas pieejas, piemēram, detalizēta konstruktīvā analīze vai pārbaude, nenodrošina skaidru informāciju vai nav pierādījušas pietiekamu konstruktīvo uzticamību (skatīt 2. nodaļu);

- e) konstrukciju būvmehānikas aprēķini un nestspējas pārbaudes:

Konstrukcijas aprēķinus veic saskaņā ar attiecīgajam materiālam atbilstošo Eirokodeksu daļu, lai noteiktu iedarbju ietekmi uz konstrukcijām. Tiek arī noteikta konstrukcijas elementu izturība (nestspēja) pret iedarbību ietekmi, ņemot vērā esošās konstrukcijas nolietojumu, kā aprakstīts piemēram, ISO 2394 [24], un katram elementam jāpiemēro noteikts nolietojuma ietekmes koeficients. Bojātu konstrukciju gadījumā ir būtiski saprast novēroto bojājumu vai darbības traucējumu cēloņus.

f) atsevišķo konstrukciju elementu drošuma līmeņa novērtējums ar individuālo drošuma indeksa noteikšanu (skat 3.3. nodaļu).

Apsekošanas 2. posma noslēgumā tiek sastādīts tehniskās izpētes atzinums, kurā tiek norādīts:

- ēkas nesošu elementu konstruktīvā shēma;
- ēkas nesošo elementu raksturīgās nestspējas raksturotāji;
- ēkas raksturīgās iedarbes – pašsvars, mainīgās slodzes un klimatiskās slodzes;
- ēkas konstruktīvo elementu nolietojuma raksturotāji;
- veikto izpēšu pieņēmumi, izkļedes raksturotāji un pielāides – variācijas koeficienti pretestības un iedarbju pusē, kā arī dauciālie drošības koeficienti;
- ēkas konstruktīvo elementu drošuma aprēķini – drošuma indeksu noteikšana galvenajām ēkas konstrukcijām.

4.4. Kopējais ēkas konstrukcijas drošuma līmeņa izmaiņu novērtējums

Pēc rūpīgas 1. un 2. posma izpildes un attiecīgās informācijas iegūšanas var uzsākt apsekošanas 3. posmu – visas ēkas drošuma līmeņa novērtēšanu.

Šī posma aktivitātes iedalāmās divos apakšposmos:

- kopējais ēkas konstrukcijas drošuma līmeņa novērtējums, izmantojot individuālos drošuma indeksus un konstrukciju elementu ietekmes koeficientus;
- ieteicamo priekšlikumu analīze, lai apsvērtu, vai un cik daudz uzlabojumi būtu jāveic, lai sasniegtu efektīvu kopējo mehāniskās stiprības un stabilitātes līmeni.

Trešā posma praktiskai realizācijai radās nepieciešamība izstrādāt metodi, kas raksturotu ēkas tehnisko stāvokli un ļautu kvantitatīvi salīdzināt dažādu ēku kopējo drošuma līmeni.

4.4.1. Ēkas kopējā drošuma līmeņa noteikšana

Visas konstrukcijas drošums ir atkarīgs no atsevišķu konstrukcijas elementu, kas veido visu sistēmu, drošuma. Tas ir atkarīgs arī no korelācijām starp konstrukcijas elementu nejaušas izvēles galvenajiem mainīgajiem lielumiem. Konstrukciju elementu savstarpējā sasaiste ēkā, kā arī statiskās nenoteicamības pakāpe ir svarīgs aspekts visas konstruktīvās sistēmas drošuma novērtēšanā. Kā jau minēts 2.nodaļā ir pieejamas vairākas metodes, kuras iespējams izmantot, lai novērtētu visas konstrukcijas drošumu, pamatojoties uz sasaisti starp sistēmas komponentēm. Tomēr šīs metodes ir darbietilpīgas un pārāk komplicētas praktiskai pielietošanai ēku inženiertehniskās apskates posmā.

Promocijas darbā izstrādātā metode kopējā drošuma līmeņa izmaiņu kvantitatīvam novērtējumam, kas ir piemērota praktiskai ieviešanai, ņem vērā šādu ēku konstrukciju parametru un to raksturojumu ietekmi uz visas ēkas drošumu:

- ēkas nesošo konstrukciju komponentu (kopņu, saišu, kolonnu, plātņu utt.) sadalījumu pa tipiem un to individuālo nozīmi kopējās ēkas konstrukcijas mehāniskās izturības un stabilitātes nodrošināšanā;
- avārijas gadījumā iespējamo nosacīto ēkas sabrukuma tilpuma daļu;
- iespējamā sabrukuma sekas.

Ņemot vērā to, ka atsevišķo elementu sabrukumu scenāriju varbūtība un sabrukuma sekas korelē arī visas ēkas sabrukšanas varbūtību un sekām, kā arī to, ka parametru vidējie lielumi ir objektīvi un raksturo parādību kopumā, promocijas darbā kopējā drošuma raksturošanai tiek piedāvāts izmantot parametru (indeksu), kas ir datu kopas svērtā ģeometriskā vidējā vērtība:

$$\left(\prod_{i=1}^n X_i^{w_i} \right)^{1/\sum_{i=1}^n w_i}, \quad (4.1.)$$

kur X_i – atsevišķs elements no elementu kopas;

w_i – elementa X ietekmes koeficients.

Aizvietojot elementu X_i izlases paraugā ar konstrukcijas komponentes drošuma indeksu β un elementa svaru w ar nosacīto ietekmes koeficientu W , kas ņem vērā iepriekš aprakstītos efektus, iegūst vienādojumu parametram Λ , kas raksturo visas ēkas kopējo mehānisko izturību un stabilitāti, un turpmāk tiek saukts par globālo ēkas drošuma indeksu.

$$\Lambda = \left(\prod_{i=1}^n \beta_i^{w_i} \right)^{1/\sum_{i=1}^n w_i} = e^{\frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln \beta_i}{\sum_{i=1}^n w_i}}, \quad (4.2.)$$

kur konstruktīvā elementa vai komponentes drošuma indeksa (Eirokodeksa drošuma koncepcijas izpratnē) datu kopa ir $\beta = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n\}$;

$W = \{W_1, W_2, \dots, W_n\}$ ir konstruktīvā elementa nosacītais ietekmes koeficients.

Atkarībā no metodes lietojuma mērķa var pieņemt aprēķinātās individuālo elementu un komponentu vērtības vai arī ierobežot ar maksimālajām vērtībām, kas vienādas ar mērķa drošuma indeksu β atbilstoši ēkas seku klasei (2.2.- 2.6. tab).

Izanalizējot dažādu statistisko vidējo lielumu īpašības, konstatēts, ka svērtais vidējais ģeometriskais lielums ir atbilstošākais parametrs minētās parādības raksturošanai, jo ir maz jūtīgs uz datu kopas izlecošajām vai galējām vērtībām (*outliers*), ir vienmēr mazāks par vidējo aritmētisko vērtību kā arī vislabāk piemērots datu kopai, kas var tikt eksponenciāli sakārtota.

Parametrs, kas raksturo ēkas kopējās mehāniskās izturības un stabilitātes izmaiņu neatkarīgi no ēkas seku klases var tikt aprēķināts kā relatīvais lielums, kas turpmāk tiek saukts par globālo ēkas relatīvo drošuma indeksu Λ_{GRI} :

$$\Lambda_{GRI} = \frac{CC_{\beta} - \Lambda}{CC_{\beta}} 100\%, \quad (4.3.)$$

kur CC_β – mērķa drošuma indekss β atbilstoši ēkas seku klasei;

Λ – globālais ēkas drošuma indekss.

Gadījumā, ja visu individuālo komponentu drošuma indeksi β ir vienādi ar mērķa drošuma indeksu CC_β atbilstoši ēkas seku klasei, globālais ēkas drošuma indekss Λ sakrīt ar mērķa drošuma indeksu CC_β individuālai komponentei t.i., $\Lambda_{GRI} = 0\%$ un ēkas konstrukcijas globālais drošuma līmenis var tikt uzskatīts par vienādu ar atbilstošo sabrukuma varbūtību jaunai konstrukcijai.

Saskaņā ar atsevišķu konstrukciju drošuma ekspertu viedokli [54] cilvēku drošības aspektu dēļ individuālās komponentes drošuma indeksu β nevajadzētu pieļaut zemāku par 1,5. Globālais ēkas drošuma indekss Λ šādu vērtību var sasniegt tikai tad, ja visu individuālo komponentu drošuma indeksi β sasniedz šo vērtību vai arī daļai tā ir zemāka, kas nav pieļaujams. Tādējādi, iespējams nodefinēt globālo ēkas relatīvo drošuma indeksu Λ_{GRI} , kas atbilstu konstrukcijai esošajai avārijas stāvoklī.

Pārējās Λ_{GRI} starpvērtības praktiski var tikt izmantotas šādu efektu novērtēšanai:

- savstarpējo novērtējumu starp vairākiem ēku nesošo konstrukciju tipiem jūtīgumu uz degradācijas riskiem;
- dažādu nesošo konstrukciju pastiprinājuma risinājumu ietekmi uz ēkas kopējās drošības līmeņa izmaiņām;
- salīdzināt ēku savstarpējos drošuma līmeņus.

Katra atsevišķā elementa ietekmi kopējā drošuma novērtēšanā ņem vērā ar aprēķināto komponentes drošuma indeksu β , bet elementa sasaisti un nozīmi sistēmā, kopējās ēkas konstrukcijas mehāniskās izturības un stabilitātes nodrošināšanā, ņem vērā ar nosacīto ietekmes koeficientu W .

4.4.2. Nosacītā tilpuma metode ietekmes koeficienta W noteikšanai

Promocija darbā piedāvāta metode konstruktīvā elementa vai komponentes nosacītā ietekmes koeficienta W noteikšanai, kas ļauj praktiski ņemt vērā komponentes individuālo nozīmi kopējās ēkas konstrukcijas mehāniskās izturības un stabilitātes nodrošināšanā. Katra elementa nosacītā ietekmes koeficienta W vērtību apgabals ir $[0; 1]$ un ir atkarīgs no nosacīta ēkas sabrukuma apjoma avārijas gadījumā.

Kā jau minēts 2.5. nodaļā reālu konstruktīvo sistēmu analīze ir ļoti sarežģīts uzdevums. Sabrukuma apjomi kāda atsevišķa elementa sabrukuma gadījumā ir tieši atkarīgi no visas ēkas konstruktīvās shēmas (statiski noteicama vai nenoteicama konstrukcija, elements saslēgts ar citiem elementiem nosacītā virknē vai paralēlslēgumā, atsevišķie elementi izveido komponenti (piemēram, kopni, rāmi utt.), kas savukārt kopējā konstruktīvajā shēma var tikt iesaistīti dažādi).

Lai metode kopējā ēkas konstrukcijas drošuma līmeņa izmaiņu novērtējumam būtu veiksmīgi realizējama praksē reāliem objektiem, izstrādāta metode vieglākai sabrukuma apjoma novērtēšanai.

Gandrīz visu tipisko ēku tilpumu ir iespējams nosacīti sadalīt kubos vai paralēlskalldņos (*tilpuma vienībās*), kuru izmēri atspoguļo raksturīgo konstrukciju laidumu un/vai soli ēkā. Daudzstāvu karkasa ēkām rekomendēts pieņemt paralēlskalldņa divas malas aptuveni vienādas ar mazāko kolonnu soli plānā, savukārt augstumu vienādu ar stāva augstumu, ja tas nav divas reizes lielāks par abu pārējo malu izmēriem. Industriālajās ēkās ar izteikti mazāku konstrukciju soli vienā virzienā, visus izmērus nosacītajam tilpumam pieņemt aptuveni vienādus ar šo soli. Kuba vai paralēlskalldņu malu izmēra izvēle ir atkarīga no konkrētās ēkas (skat. piemērus attēlos 4.2. un 4.3.).

Tad viss ēkas tilpums raksturojās ar summāro tilpuma vienību skaitu:

$$V = \sum v, \quad (4.4.)$$

kur $v = a \cdot b \cdot c = 1$ – nosacītais kubs vai paralēlskalldnis (*tilpuma vienība*).

Tiek novērtēts arī tilpuma vienību skaits, apskatāmā elementa sabrukuma gadījumā:

$$V_i = \sum v_i, \quad (4.5.)$$

kur $v_i = a \cdot b \cdot c = 1$ – nosacītais kubs vai paralēlskalldnis (*tilpuma vienība*), kas attiecas uz konkrētā elementa sabrukuma sekām.

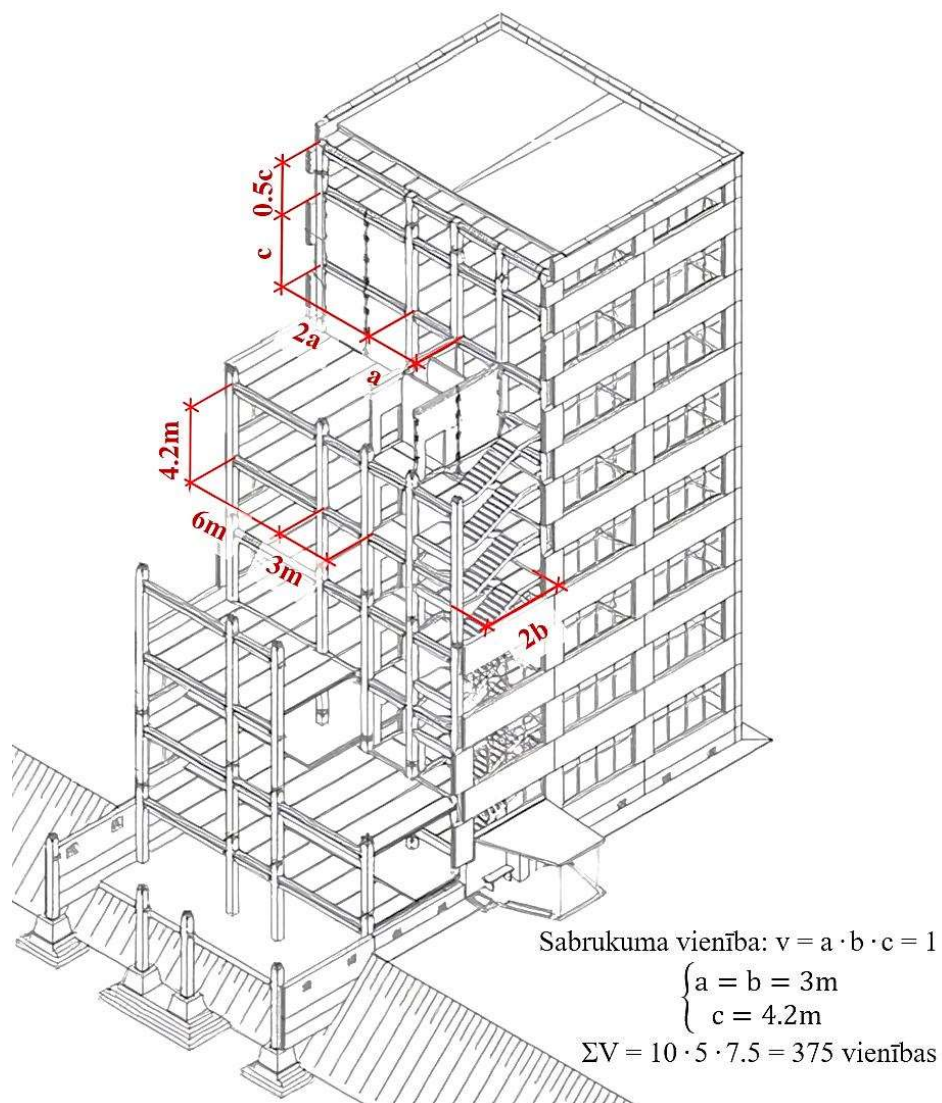
Ēkas nesošā karkasa elementus iedala raksturīgos tipos (piemēram, pārseguma sijas, malējās kolonnas 1. stāvā, vidējās kolonnas 1. stāvā, diafragmas utt.), kur atsevišķa elementa sabrukuma gadījumā provizoriski realizētos vienāds skaits sabrukušo kubu V_n . Ja viena konstruktīvā tipa ietvaros, ir konstatēti būtiski atšķirīgi individuālie drošuma indeksi β , tad tos uztver par atšķirīgiem tipiem.

Ietekmes koeficientu vērtības piešķir proporcionāli sabrukušo kubu skaitam, apskatot konkrēta tipa reprezentatīvo elementa sabrukuma scenāriju un, pieņemot, ka maksimālajam sabrukuma apjomam ēkā ietekmes koeficients $W = 1$. Tādējādi konstrukcijas mehāniskai izturībai un stabilitātei nozīmīgāko konstruktīvo elementu degradācija vai pastiprināšana veidos lielāku ietekmi uz globālo drošuma novērtējumu nekā maznozīmīgāki elementi, kas konstrukcijā ir vairāk (pēc skaita).

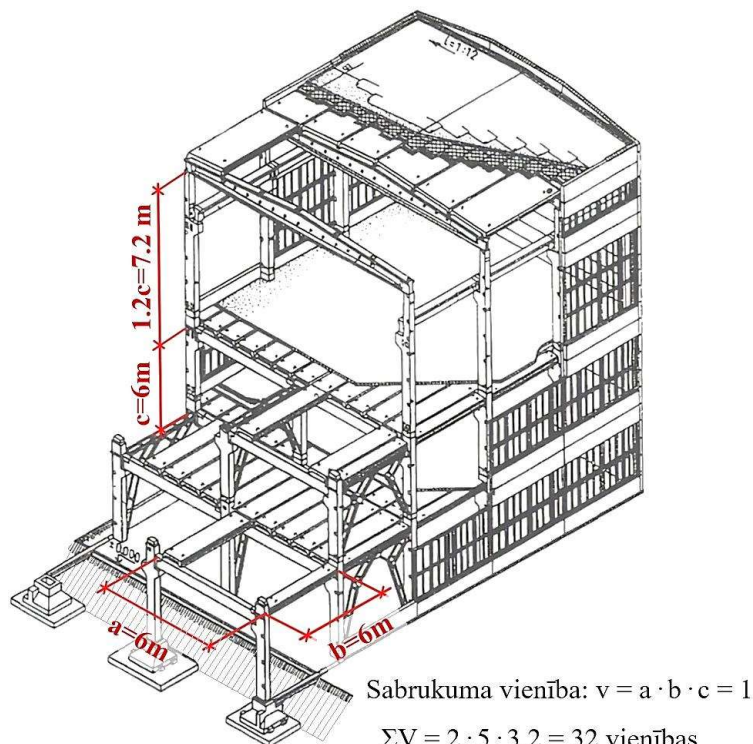
Tad individuālās komponentes svāra koeficientu W_i nosaka pēc sakarības:

$$W_i = \frac{V_i}{V} \leq 1, \quad (4.6.)$$

kur V_i - novērtētais tilpuma vienību skaits, apskatāmā elementa sabrukuma gadījumā;
 V - visas ēkas nosacītais tilpums, *vienību skaits*.



4.2. att. Piemērs nosacītā paralēlskaldņa (tilpuma vienība) izvēlei tipveida rūpnieciskajam karkasam, kas sastopams ekspluatācijā Latvijā.



4.3. att. Piemērs nosacītā paralēlskaldņa (tilpuma vienība) izvēlei Tipveida rūpnieciskajam karkasam, kas sastopams ekspluatācijā Latvijā.

Tilpuma vienību skaita V_i novērtētējumam tiek rekomendēts izvēlēties, neņemot vērā iespējamo piepūļu pārdalīšanos, neproporcionālo sabrukumu, ķēžu līnijas (*catenary effect*) vai membrānas efekta (*membrane effect*) iestāšanos sabrukuma gadījumā, bet gan skatoties kādi elementi ir saistīti virknes saslēgumā ar apskatāmo elementu. Ja elements ar visiem citiem ir paralēlajā slēgumā (piemēram, pārseguma plātnes) rekomendēts plānā pieņemt atbilstošo skaitu laukuma vienību, bet augstumā 1 vai mazāku.

Atsevišķi jāapskata elementi, kas uzņem pamatā vertikālās slodzes un elementi, kas nodrošina ēkas kopējo noturību (saites, diafragmas, kodoli), kuri ir nozīmīgi elementi ēkas kopējā drošuma veidošanā.

Piemēram, 4.2. attēlā dotajam karkasam svāra koeficienta W aprēķins pirmā stāva kolonnai, kas uzņem pamatā vertikālās iedarbes ir šāds:

- pirmā stāva stūra kolonnas sabrukuma gadījumā sabruks viens laidums uz katru pusi un visi stāvi virs attiecīgās kolonnas, jo virknes slēgumā ir augstāk stāvošās kolonnas, pieguļošie rīģeļi, paneļi, kas balstās uz šiem rīģeļiem, kā arī attiecīgie fasādes elementi. Tātad tilpuma vienību skaits, apskatāmā elementa sabrukuma gadījumā:

$$V_i = 2 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 7 + 2 \cdot 2 \cdot 0,5 = 30 \text{ vienības};$$

- summārais tilpuma vienību skaits ēkai:

$$V = 5 \cdot 10 \cdot 7,5 = 375 \text{ vienības};$$

c) nosacītais ietekmes koeficients:

$$W = \frac{30}{375} = 0,08.$$

Elementiem, kas nodrošina visas ēkas vai ēkas daļu stabilitāti šādi iespējams izvēlēties sabrukuma tilpuma skaitu:

- a) vertikālām stinguma saitēm vai diafragmām novērtē horizontālo iedarbju daļu, ko stinguma elements uzņem apskatāmajā virzienā. Piemēram, 4.3. attēlā dotajam karkasam svara koeficienta W aprēķins 6 m platai stinguma diafragmai ēkas garenvirzienā ir puse no kopējās horizontālās slodzes, tātad:

$$V_i = V/2 = 187,5 \text{ vienības};$$

$$W = \frac{187,5}{375} = 0,5.$$

- b) horizontālām stinguma saitēm novērtē horizontālo iedarbju daļu, ko stinguma elements uzņem apskatāmajā virzienā. Piemēram, 4.3. attēlā dotajam karkasam svara koeficienta W aprēķins perimetra saitēm ēkas garenvirzienā (pārseguma diafragmas elements - josla) ir puse no kopējās horizontālās slodzes uz stāvu ēkas šķērsvirzienā, tātad:

$$V_i = 10 \cdot 5/2 = 25 \text{ vienības};$$

$$W = \frac{25}{375} = 0,07.$$

Tātad, šajā gadījumā horizontālā stinguma elementa ieguldījums ēkas kopējā drošuma nodrošināšanā ir mazāks, kā pirmā stāva stūra kolonnai, bet stinguma sienu degradācija vai bojājumi būtiski ietekmē kopējo ēkas drošumu.

Pētījuma ietvaros analizēti nosacītā ietekmes svara koeficientu W diapazoni daudzstāvu karkasa ēkai ar regulāru kolonnu tīklu (skat. 4.3.att.). Tālāk apskatīts konkrēts gadījums daudzstāvu ražošanas ēkai ar neregulāru kolonnu tīklu. Pētījumā pielietotā datu apstrādes metode var tikt pielietota arī cita tipa ēku nosacītā ietekmes svara koeficientu W noteikšanai.

Daudzstāvu karkasa ēkām ar regulāru kolonnu tīklu ir raksturīgi šādi elementi, kuriem nepieciešams aprēķināt nosacīto tilpuma vienību skaitu sabrukuma gadījumā:

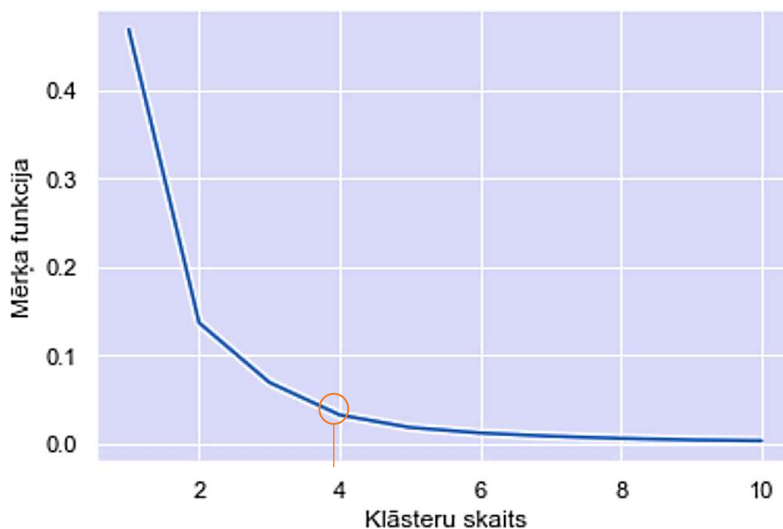
- katra stāva stūra kolonna;
- katra stāva malējā kolonna ēkas šķērsvirzienā un garenvirzienā;
- katra stāva iekšējā kolonna atbilstošam slodžu laukumam;
- rīģeļi starpstāvos;
- perimetra rīģeļi (pārseguma diafragmas joslu elementi);
- pārseguma plātnes;
- kāpņu laidi;
- fasādes elementi;
- vertikālie stinguma elementi (saites, diafragmas, stinguma kodoli).

Ja viena konstruktīvā tipa ietvaros, ir konstatēti būtiski atšķirīgi individuālie drošuma indeksi β , tad tos uztver par atšķirīgiem tipiem.

Ar mērķi noteikt katram ēkas tipam raksturīgos koeficienta W diapazonus veikta tipveida ēkas komponentu nosacīto ietekmes koeficientu W_i apstrāde ar klāsterizācijas metodi (*Clustering*). Izmantots K – vērtības (*K-means*) algoritms, kas klasificē attiecīgo datu kopumu, izmantojot noteiktu skaitu klāsteru un minimizē mērķa funkciju:

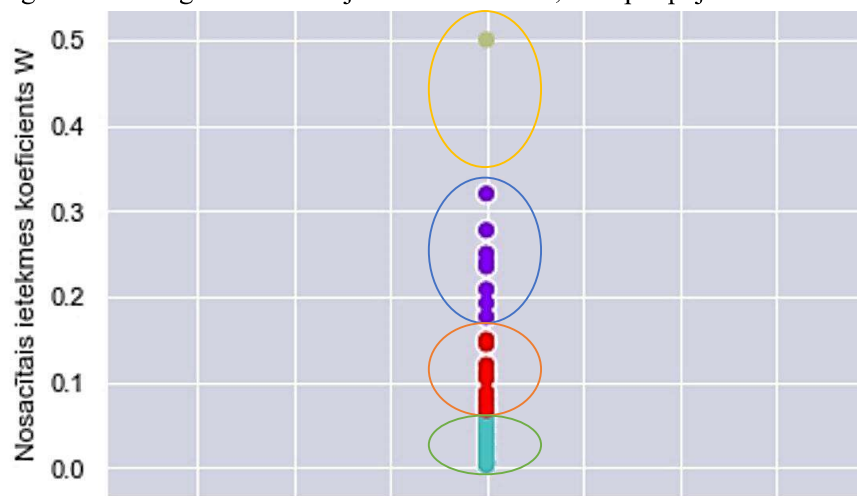
$$\sum_{k=1}^K \sum_{i \in W_k} \sum_{j=1}^p (x_{ij} - \bar{x}_{kj})^2, \quad (3.13.)$$

kur W_k – svara koeficientu kopa k -tajā klāsterī;
 $\bar{x}_{kj}$ – k - tā klāsterā j -tais klāsterā centra mainīgais.



4.4. att. Optimālā klāsteru skaita noteikšana daudzstāvu karkasa ēkām ar regulāru kolonnu tīklu.

Optimālai klāsteru skaita atrašanai izmantota “elkoņa metode” (*“Elbow method”*) jeb atrasts tāds klāsteru skaits pie kura K – vērtības izmaiņa kļūst maznozīmīga. Noskaidrots, ka daudzstāvu karkasa ēkām ir raksturīgi 4 nosacīto ietekmes koeficientu W_i diapazoni (skat. 4.5.att.). Iegūto klāsteru grafisko attēlojumu skat. 4.4.att., bet apkopojumu tabulā 4.1.



4.5. att. Nosacītā ietekmes koeficienta W diapazoni daudzstāvu karkasa ēkām ar regulāru kolonnu tīklu (K -vērtība = 0,032).

4.1. tabula

Koeficienta W diapazoni daudzstāvu karkasa ēkām ar regulāru kolonnu tīklu

Vieta un ietekmes apraksts	Elementa iespējamā funkcija	Piemērs	W_i Diapazons
Elements pārsvarā nosacītā aktīvajā vai pasīvajā paralēlslīgumā (pašsabrūkums vai laiduma vai divu laidumu sabrūkums vienā stāva līmeni)	Elements nodrošina ēkas kopējo noturību, piedalās horizontālo un vertikālo slodžu pārveidā	Perimetrālās saites/rīģeļi ēkas īsākajā virzienā	0 – 0,06
	Elements nodrošina citu elementu noturību (gadījumā, ja elementam nav citu funkciju, piem. saites)	Perimetrālās saites, pašnesošas fasādes elementi	
	Elements uzņem pamatā vertikālās slodzes	Starpstāvu rīģeļi, visas augšējo stāvu kolonnas, kāpņu laidī, pārseguma plātnes	
Elements, kas balsta citus elementus, laiduma vai divu laidumu sabrūkums vairāku stāvu līmenī (bet ne vairāk kā ēkas augstums/2) (daļējs ēkas sabrūkums)	Elements nodrošina ēkas kopējo noturību, piedalās horizontālo un/vai vertikālo slodžu pārveidā	Perimetrālās saites/rīģeļi ēkas garākajā virzienā	0,06 – 0,15
	Elements uzņem pamatā vertikālās slodzes	Visas kolonnas, kas neietilpst pārējos diapazonos	
Elements nosacītā virknes slīgumā: (ēkas vai ēkas daļas vispārējs sabrūkums)	Elements nodrošina ēkas kopējo noturību, piedalās horizontālo un/vai vertikālo slodžu pārveidā	Vertikālās stinguma diafragmas, vertikālās saišu sistēmas, stinguma kodoli, ja horizontālo iedarbju daļa, ko stinguma elements uzņem apskatāmajā virzienā ir mazāk kā puse no kopējām horizontālām iedarbēm)	0,15 – 0,5
	Elements pamatā uzņem vertikālās slodzes (VL)	Visas pirmā stāva kolonnas un visas to stāvu kolonnas, kas atrodas diapazonā ēkas augstums/3;	
Elements nosacītā virknes slīgumā attiecībā uz horizontālo iedarbju uzņemšanu: (ēkas vai ēkas daļas vispārējs sabrūkums)	Elements nodrošina ēkas kopējo noturību, piedalās horizontālo un/vai vertikālo slodžu (horizontālo iedarbju daļa, ko stinguma elements uzņem apskatāmajā virzienā ir vismaz puse no kopējām horizontālām iedarbēm)	Vertikālās stinguma diafragmas, vertikālās saišu sistēmas, stinguma kodoli	0,5 - 1

* - precīzāku vērtību ieteikts aprēķināt saskaņā ar promocijas darbā piedāvāto “nosacītā tilpuma metodi”.

4.4.3. Skaitliskais eksperiments un rezultātu analīze

Ar mērķi novērtēt globālā drošuma indeksa A diapazonu un jutīgumu pie dažādiem atsevišķo elementu bojājuma scenārijiem, kas ņemts vērā mainot drošuma indeksu β , pētījumā veikts skaitliskais eksperiments, izmantojot Monte Carlo simulāciju metodi.

Komponenšu tipi ar lielāku ietekmi ēkas kopējā drošuma nodrošināšanā parasti ir mazāk pēc skaita. Daudzstāvu karkasa ēkām ar regulāru kolonnu tīklu šī attiecība pētījumā ir atrasta aptuveni $0.1 : 0.4 : 0.6 : 1$, kur pirmais skaitlis attiecas uz nozīmīgiem elementiem, bet pēdējais attiecīgi uz maznozīmīgākiem kopējā drošuma kontekstā. Piemēram, ēkas kopējo noturību nodrošina mazāks elementu skaits pa tipiem, nekā elementi, kas uzņem lokālas slodzes (plātnes, fasāžu elementi, rīģeļi, stati. utt.). Šī attiecība iekļauta simulācijas iestādījumos, bet visi izejas dati apkopoti 4.2. tabulā

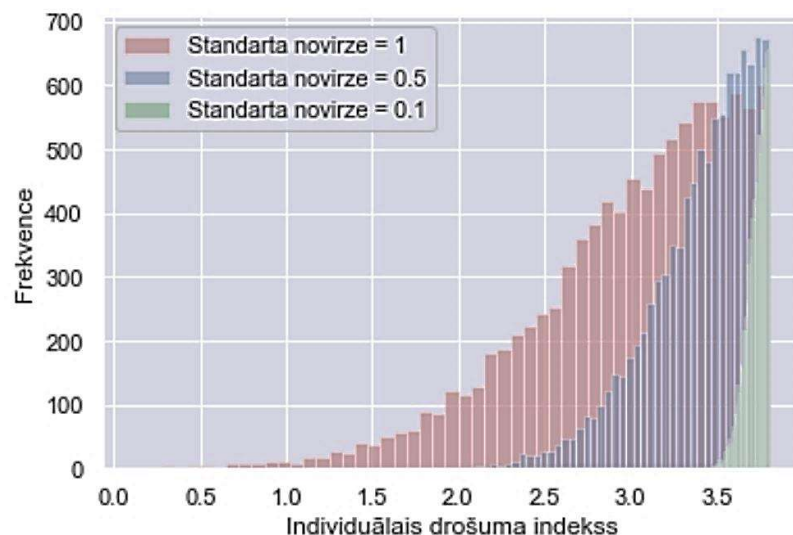
4.2. tabula

Skaitliskā eksperimenta izejas dati un nosacījumi

Mainīgā nosaukums vai nosacījums	Vērtība vai diapazons	Piezīmes
Simulāciju skaits	15 000	Skaits atbilst gadījumam, kad globālā drošuma indeksa A divas zīmes aiz komata palielinot simulāciju skaitu
Nosacītā ietekmes koeficienta W_i izvēle	Nejaušas izvēles mainīgais diapazonā (no vienmērīga sadalījuma)	Diapazoni saskaņā ar 4.1. tabulu
Elementu individuālais drošuma indekss β	Nejaušas izvēles mainīgais diapazonā 0 līdz 3,8 no normālsadalījuma ar vidējo vērtību 3,8 (kas atbilst CC2 klases β mērķa vērtībai) un standartnovirzi diapazonā 0,1 līdz 5,9	Modelē elementa drošuma līmeni t. sk. iespējamo degradāciju
Ēkas komponentu tipu skaits	Attiecība 0.1 : 0.4 : 0.6 : 1, kur 1 – attiecīgi mazāk nozīmīgi elementi drošuma kontekstā	Iespējamie elementu tipi konkrētam diapazonam apkopoti 4.1. tabulā

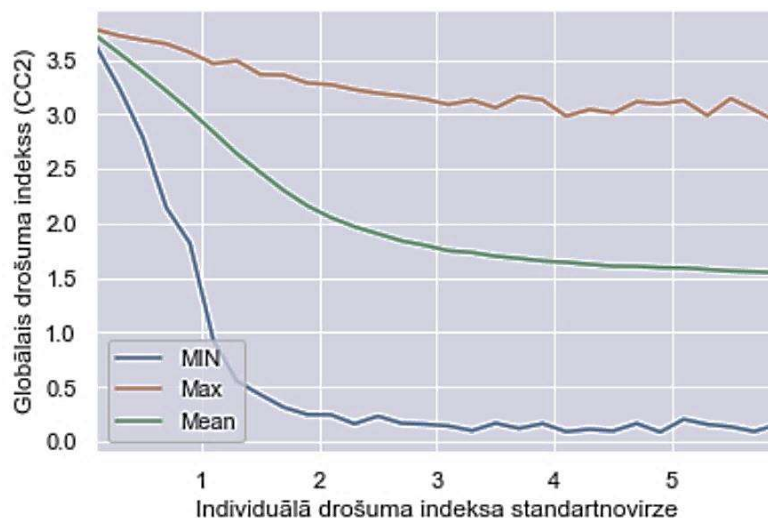
Piezīme. Ēkas komponentes individuālā drošuma indeksa maksimālā vērtība β atbilst sabrukuma varbūtībai $P_f = 10^{-4}$, simulācijas apakšējā vērtība atbilst sabrukuma varbūtībai $P_f = 0,5$.

Skaitliskā eksperimenta rezultātu grafiskais attēlojums redzams 4.8.attēlā. Uz vertikālās ass simulācijās aprēķinātais globālais drošuma indekss A , uz horizontālās ass elementu individuālā drošuma indeksa β normālsadalījuma standarta novirze. Ja standarta novirze tuvojas 0, tad visu ēku komponentu drošuma indekss ir vismaz 3,8, kas atbilst mērķa drošuma indeksam jaunai konstrukcijai. Standarta novirzei palielinoties, palielinās to elementu tipu skaits, kuriem konstatēti mazāki drošuma indeksi konstrukcijas degradācijas vai pārslodzes dēļ. Individuālo drošuma indeksu β sadalījuma piemēri redzami 4.7. attēlā



4.7. att. Individuālo drošuma indeksu β nejaušas izvēles piemēri simulācijai ($n=15000$, ēkas seku klase CC2).

Rezultātu grafiskā attēlojumā (4.8. att.) augšējā un apakšējā līkne ierobežo globālā ēkas drošuma indeksa Λ iespējamo diapazonu daudzstāvu karkasa ēkām ar regulāru kolonnu tīklu, bet vidējā līkne ir globālā drošuma indeksa Λ vidējās vērtības sakarība.



4.8. att. Globālā ēkas drošuma indeksa Λ vērtību diapazons atkarībā no ēkas elementu individuālo drošuma līmeņu sadalījuma (daudzstāvu karkasa ēkām ar regulāru kolonnu tīklu).

Iegūti rezultāti parāda, ka globālā ēkas drošuma indeksa Λ vērtība ir jutīgākā individuālo drošuma indeksu β normālsadalījuma standartnovirzes diapazonā no 0 līdz 2, kas sakrīt ar iespējamajiem bojājumu sadalījumiem reālajās ēkās. Nākamajā nodaļā, kur objektam dabā veikts novērtējums saskaņā ar promocijas darbā izstrādāto metodoloģiju, elementu drošības indeksu standartnovirze iekļaujas šajā diapazonā un ir 0,6.

4.5. Nodaļas secinājumi

Šajā nodaļā ir izstrādāta metodoloģija kā noteikt globālo ēkas drošuma indeksu A , kas raksturo jaunas vai ekspluatācijā esošas ēkas tehnisko stāvokli un ļauj kvantitatīvi salīdzināt dažādu ēku kopējo drošuma līmeni. Izstrādātais indekss ievērtē gan ēkas nesošo konstrukciju komponentu (kopņu, saišu, kolonnu, plātņu utt.) individuālo nozīmi kopējās ēkas konstrukcijas mehāniskās izturības un stabilitātes nodrošināšanā, gan to individuālo drošuma līmeni β , ko iespējams noteikt saskaņā ar iepriekšējā nodaļā piedāvāto metodiku, kā arī avārijas gadījumā iespējamo nosacīto ēkas sabrukuma tilpuma daļu un iespējamā sabrukuma sekas.

Atšķirībā no pieejamām metodēm, kas balstītas uz varbūtību teoriju un sistēmas teoriju, izstrādātā metode ir daudzkārt mazāk darbietilpīga, mazāk komplicēta un piemērota praktiskai pielietošanai ēku inženiertehniskās apskates posmā, ko pierāda praktiskais metodes pielietošanas piemērs darba nākošajā nodaļā.

Analizējot simulāciju rezultātus, noskaidrots, ka globālā ēkas drošuma indeksa A vērtība ir jutīgākā individuālo drošuma indeksu β normālsadalījuma standartnovirzes diapazonā no 0 līdz 2, kas sakrīt ar iespējamiem bojājumu sadalījumiem reālajās ēkās.

Latvijā ekspluatācijā esošām raksturīgajām ēkām, kas projektētas PSRS laikos (ar seku klasi CC2), kuru elementu drošuma līmeņu sadalījums ir līdzīgs normālsadalījumam ar standartnovirzi 0.05, globālajam ēkas drošuma indeksam jābūt robežās no 3,68 līdz 2,79.

5. ĒKAS DROŠUMA VĒRTĒŠANAS METODOLOĢIJAS PRAKTISKAIS LIETOJUMS (CASE STUDY)

5.1. Ekspluatācijā esošās ēkas drošuma līmeņa noteikšana

5.1.1. Objekta raksturojums

Par objektu, kurā izmantota promocijas darbā izstrādātā metodoloģija, izvēlēta publiska ēka Valmierā (skat. 5.1. att.). Pirms plānotās pārbūves veikšanas Pasūtītājam (Valmieras pašvaldība), saskaņā ar spēkā esošajiem normatīvajiem aktiem, radās nepieciešamība iegūt tehniskās apsekošanas atzinumu, kas objektīvi un kvantitatīvi raksturo esošo konstrukciju tehnisko stāvokli. Tādejādi piedāvātā ēkas drošuma vērtēšanas metode pirmo reizi praktiski aprobēta 2018. gada oktobrī, veicot 1986. gadā izbūvētas ēkas tehnisko apsekošanu un izpēti.

Ēkas galvenie raksturotāji apkopoti tab. 5.1.



5.1. att. Ekspluatācijā esoša publiska ēka Valmierā pirms pārbūves.

Tehniskā izpēte veikta pēc II grupas drošuma vērtēšanas principiem (skat. nod. 2.6.1.), kur neskaidros parametrus modelē ar vidējām vērtībām un standarta novirzēm, kā arī korelācijas koeficientiem starp stohastiskajiem mainīgajiem. Netieši pieņem, ka stohastiskie mainīgie parasti tiek normāli sadalīti. Tiek pielietota drošuma indeksa metode. Kā arī izmantota 4. līmeņa novērtēšanas metode (skat. nod. 2.6.2.), kur mērķa drošuma pielāgošana, drošuma un lietojamības noteikšana, tika veikta izmantojot modificētas, konstrukcijai atbilstošas vērtības.

Tehniskā izpēte sastāv no promocijas darbā izstrādātās metodoloģijās trīs posmiem:

1. Posms – ēkas konstrukciju tehniskā apsekošana (skat. nod. 4.2.);
2. Posms – ēkas konstrukciju tehniskā izpēte (skat. nod. 4.3.);
3. Posms – ēkas drošuma līmeņa noteikšana (skat. nod. 4.4.).

Ēkas galvenie raksturotāji

Būves seku klase:	CC2 (EN1990)
Konstrukciju apbūves laukums:	6 431,8 m ²
Konstrukciju apbūves tilpums:	79 013 m ³
Kopējā ēkas platība:	18 446,1 m ²
Stāvu skaits:	
Virszemes	3
Pazemes	1
Būves nodošana ekspluatācijā	1986.gads
Būves dokumentācija	
Būvkonstrukciju projekts	Ir, 1983.gads
Būvkonstrukciju izbūves dokumentācija	Ir, 1985-1986.gads
Lietošanas dokumentācija	Ir, 1999.gads

Ēkas tehniskā apsekošana un konstrukciju detalizētā izpēte tika veikta atbilstoši 4. nodaļā aprakstītajam, par ko tika sastādīta attiecīgs tehniskās apsekošanas atzinums.

5.1.2. Ēkas tehniskā apsekošana

Sākotnēji veikta ēkas vizuālā tehniskā apsekošana saskaņā ar LBN405, lai secinātu vispārējo tehnisko stāvokli un ēkas piemērotību darba uzdevumam. Vispārējam ēkas raksturojumam tālāk dots izvilkums no vizuālās apsekošanas rezultātā konstatētā:

Kopējais konstrukcijas raksturojums

Ēka ir karkasa tipa ēka ar nesošām kolonnām, rīģeļiem un pārseguma plātnēm. 1.stāva ārsienas ir pašnesošas mūra, pārējās sienas ir ar piekārtiem ārsienu paneļiem. Kolonnas ir saliekamas dzelzsbetona ar slēptām konsolēm. Izvirzījuma daļas perimetrālās kolonnas ir tērauda režģotas no leņķa profiliem. Rīģeļi – saliekama dzelzsbetona, pārseguma plātnes – saliekama dzelzsbetona dobtās. Ēkas telpisko noturību nodrošina liftu šahtas un iekšsienas. Vizuālās apsekošanas laikā nebija iespējas noteikt nesošo elementu markas. Ēkas nesošie dzelzsbetona elementi ir apmierinošā stāvoklī, pazīmes (plaisas, deformācijas), kas liecinātu par nepietiekamo nestspēju, netika konstatētas. Mehāniskie vai korozijas rezultātā izraisīti nesošo konstrukciju bojājumi nav konstatēti;

Pamati un pamatne

Galvenās ēkas pamatus veido dzelzsbetona pāļu režģis ar soli 6 x 6 metri. Daļā no ēkas ir izveidots pagrabstāvs, tādējādi uz pāļiem izbūvētas gan pagrabstāva kolonas, gan 1. stāva kolonas daļā, kur nav pagrabstāva. Pagrabstāva grīdu un daļā 1. stāva grīdu veido monolīta dzelzsbetona plātne. Ēkas pamatu elementu deformācijas un sēšanās netika konstatēta. Atsevišķi grunts izpēte, kā arī pamatu atsegumi netika veikti;

Pagraba stāvs

Pagrabstāva konstrukcijas veido saliekamās dzelzsbetona kolonas, sijas un saliekamas dzelzsbetona plātnes pagrabstāva pārsegumā. Nesošo elementu deformācijas un sēšanās nav

konstatēta. Vizuālais stāvoklis gan kolonām, gan plātņu pārsegumiem vērtējams kā apmierinošs;

Ēkas 1. – 4. stāvs

1. – 4. stāvu veido rūpnieciski ražotas saliekamās dzelzsbetona kolonas, kas izvietotas ar soli 6x 6 metri, sijas un dzelzsbetona pārsegumi 3 x 1.5 metri. 1. – 4. stāvā konstrukciju defekti nav konstatēti, novērtēts, ka atsevišķo sienu plaisu veidošanās neietekmē nesošo konstrukciju nestspēju. 2. – 4. stāvā pa perimetru ārpus ēkas pamata ir izbūvētas tērauda kolonnas, kas notur ēkas izvirzīto ārsienas konstrukciju – piekārtos paneļus.



5.2. att. Ēkas pagrabstāvs.



5.3. att. Ēkas 1. – 4. stāvs.

Ārsienas

Ēkas ārsienas pamatā veidotas no ķieģeļu mūra, bet 2. – 4. stāva līmenī no piekārtiem ārsienas paneļiem. Piekārtie paneļi ir apmierinošā stāvoklī, bet ķieģeļu ārsienas vietām sala ietekmē atsevišķās vietās bojātas nepietiekamas salizturības dēļ.

Jumta konstrukcijas

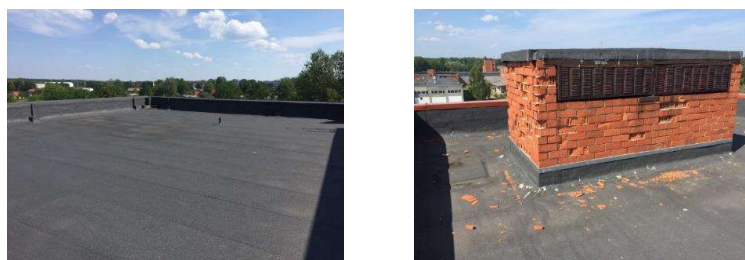
Ēkas hidroizolācijas slānis ieklāts no bitumena ruļļu materiāla, kopumā apmierinošā stāvoklī.

Kāpnes un kāpņu laukumi

Kopumā dzelzsbetona kāpņu laidi ir apmierinošā stāvoklī. Tomēr problēmas konstatētas ar kāpņu telpas norobežojošo sienu. Nesošā mūra sienu konstrukcija ir sliktā stāvoklī. Ir konstatētas ievērojamas deformācijas un plaisas ar atvērumu līdz pat 16 mm.



5.4. att. Ēkas ārsienu vizualizācijas.



5.5. att. Ēkas jumta konstrukciju vizualizācijas.



5.6. att. Ēkas kāpņu telpas vizualizācijas.

Slodžu pieņēmumi

Nemot vērā, ka nav pieejams būvprojekts un izgatavošanas dokumentācija par ēku konstrukcijām, bet konstrukcijas lielā daļā gadījumu marķētas ar izgatavotājrūpnīcas marķējumiem, kas ļauj izsekot to ražotājus, turpmākajos aprēķinos tiek pieņemts, ka visas rūpnieciski ražotās konstrukcijas ir tipveida un izgatavotas pēc attiecīgajā laikā spēkā esošajiem normatīviem. Raksturīgās slodzes apkopotas 5.2. un 5.3. tabulā.

5.2. tabula

Pieņemtās pašsvara slodzes

Nosaukums	Normatīvā slodze	Drošības koeficients (SNiP)
Jumta segums: Ruberoīds 2.kārtas izlīdzinošs slānis ar siltinājumu	200 kg/m ²	1,3
Pārseguma plātne 220 mm 1.2x6 m	220 kg/m ²	1,1
Jumta plātnes 220 mm 1.2x6 m	220 kg/m ²	1,1
Piekārtais aprīkojums	50 kg/m ²	1,3
Starpstāvu pārseguma izlīdzinošā kārtā un segums	200 kg/m ²	1,3
Dz.b. kolonna 400x400	1,2 t	1,1
Tērauda kolonna, apbetonēta	0,3 t	1,1
Sija	3 kN/m	1,1

5.3. tabula

Lietderīgās un klimatiskās slodzes

Nosaukums	Normatīvā slodze	Drošības koeficients	Slodze saskaņā ar EN
Lietderīgā slodze administrācijas telpām, laboratorijām	200 kg/m ²	1,2	250 kg/m ²
Lietderīgā ēdnīcā	300 kg/m ²	1,2	250 kg/m ²
Starpsienas	50 kg/m ²	1,2	50 kg/m ²
Sniega slodze	125 kg/m ²	1,4	140 kg/m ²

5.1.3. Konstrukciju tehniskā izpēte

Vispārējam ēkas raksturojumam tālāk dots izvilks no tehniskās izpētes atzinuma.

Ēkas konstruktīvā shēma

Pēc detalizētas ēkas būvprojekta un izbūves dokumentācijas izpētes, galveno ēkas konstrukciju apsekošanas un datu validācijas, tika pieņemts lēmums, ka vērtējumam par ēkas kopējo mehānisko stiprību un stabilitāti kalpos ēkas viena no sekcijām (3 rāmji), jo tās elementi un konstruktīvā shēma faktiski raksturo visas ēkas drošumu. Izvēlēto sekciju skatīt 5.7. attēlā.



5.7. att. Ēkas 1.stāva plāns ar iezīmēto raksturojošo sekciju, kas izvēlēta drošuma aprēķiniem.

Izvēlētajai ēkas sekcijai sastādīta tās konstruktīvā shēma (skat 5.8. att.), kas kalpo tālākajiem ēkas mehānisko stiprību un stabilitāti raksturojošajiem drošuma aprēķiniem.

Raksturojošie elementi un slodzes

Konstrukciju drošumu aprēķiniem pieņemtās slodzes uz elementiem, kas sastāda raksturīgo ēkas sekciju apkopotas 5.4. un 5.5. tabulā.

5.4. tabula

Pieņemtās pašvara slodzes

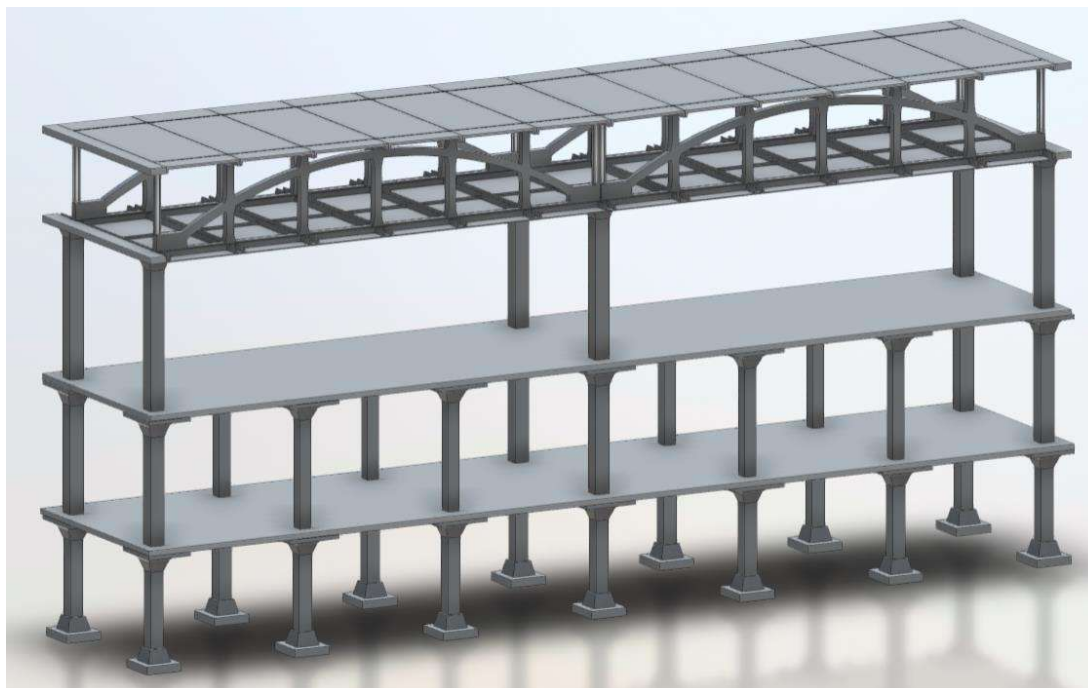
Konstrukcijas elements	Raksturīgās slodzes	Parciālais koeficients (SNiP)
Jumta segums: Ruberoīds 2.kārtas izlīdzinošs slānis ar siltinājumu	200 kg/m ²	1,3
Kopne	11 t	1,1
Jumta plātnes 3x6m	2,68 t (149 kg/m ²)	1,1
Griestu plātnes 3x6m	2,68 t (149 kg/m ²)	1,1
Piekārtais aprīkojums	50 kg/m ²	1,3
Starpstāvu pārseguma plātnes	KII 4,75 t HII 4,6 t III 3,26 t (344 kg/m ²)	1,1
Starpstāvu pārseguma izlīdzinošā kārtā un segums	320 kg/m ²	1,3
Kolonna	4 t	1,1

Lietderīgās un klimatiskās slodzes

Nosaukums	Normatīvā slodze pēc SNIp	Parciālais koeficients (SNIp)	Slodze saskaņā ar EN
Lietderīgā slodze uz pagrabstāva un 1. stāva pārsegumiem	1000 kg/m ²	1,2	750 kg/m ²
Lietderīgā slodze uz 2.stāva pārsegumiem	70 kg/m ²	1,3	
Sniega slodze uz jumta pārsegumiem	125 kg/m ²	1,4	140 kg/m ²

Nenoteiktību pieņēmumi

Apsekošanas laikā netika konstatētas pazīmes (piem. izlieces vai plaisas), kas liecinātu par konstrukciju pārslogošanu, tāpēc tiek pieņemts, ka aprēķinu iedarbes sastāda 90% no aprēķina nestspējas. Atbilstoši ISO 2394 un EN 1991-1-3 ieteikumiem pieņemtais nestspējas parciālais koeficients $\gamma_R = 1,2$, betona konstrukciju nestspējas variācijas koeficients $V_R = 0,15$, lietderīgās un sniega slodzes variācijas koeficients $V_Q = 0,6$, pašsvara slodzes variācijas koeficients $V_G = 0,1$.



5.8. att. Ēkas mehānisko stiprību un stabilitāti raksturojošās sekcijas un rāmju konstruktīvā shēma 3D shēma.

5.8. attēlā redzamās sekcijas konstrukciju elementiem, pamatojoties uz dokumentāciju, kā arī pirmajā un otrajā posmā veiktajiem apsekošanas un izpētes rezultātiem, tiek pieņemti sekojoši slodžu un nestspējas raksturotāji (skat. 5.6. tabulu):

Konstrukcijas slodžu un nestspējas raksturotāji

Konstrukcijas elements	E_{Gk}	E_{Gd}	E_{Qk}	E_{Qd}	E_d	R_d	R_k	Δ
	kN/m ²	kN/m ²	kN/m ²	kN/m ²	kN/m ²	kN/m ²	kN/m ²	%
0. st. plātne	6,64	7,94	10	12	19,94	22,15	26,58	40
0. st. kolona	1044,7		642		2216	2462	2954	30
1.stāva plātne	6,64	7,94	10	12	19,94	22,15	26,58	20
2.stāva plātne	1,99	2,29	0,7	0,91	3,2	3,2	3,84	40
1. un 2. stāva kolona	350		110		552	613	736	15
Jumta plātne	3,49	4,24	1,25	1,75	5,99	6,66	8	25
Jumta kopne	4,99		1,25		7,74	14,1	16,8	10

Piezīme. E_{Gk} – raksturīgā pašsvara slodze; E_{Gd} – aprēķina pašsvara slodze; E_{Qk} – raksturojošā lietderīgā slodze; E_{Qd} – aprēķina lietderīgā slodze; E_d – Kopējā aprēķinu slodze; R_d – Sākotnējā aprēķina nestspēja; R_k – Sākotnējā raksturīgā nestspēja; Δ – konstrukcijas elementu nolietojums, procentos, noteikts detalizētās izpētes rezultātā, kas attiecīgi samazina konstrukciju elementu raksturīgo nestspēju.

5.1.4. Ēkas drošuma līmeņa noteikšana

Konstruktīvo elementu drošuma indeksa β aprēķināšana

Konstruktīvo elementu drošuma indeksa β aprēķināšana veikta saskaņā ar metodi, kas izstrādāta promocijas darba 3.3.nodaļā:

Pārseguma plātnes – drošuma indekss $\beta=3,7$ (aprēķins 5.7. tabulā)

Raksturīgā pašsvara slodze: $E_{Gk} = 3,44 + 3,20 = 6,64 \text{ kN/m}^2$;

Aprēķina pašsvara slodze: $E_{Gd} = 3,44 \times 1,1 + 3,2 \times 1,3 = 7,94 \text{ kN/m}^2$;

Raksturīgā lietderīgā slodze: $E_{Qk} = 10,0 \text{ kN/m}^2$;

Aprēķina lietderīgā slodze: $E_{Qd} = 10,0 \times 1,2 = 12,0 \text{ kN/m}^2$;

Kopējā aprēķina slodze: $E_d = 19,94 \text{ kN/m}^2$.

Pieņemtā sākotnējā aprēķina nestspēja: $R_d = 22,15 \text{ kN/m}^2$;

Pieņemtā sākotnējā raksturīgā nestspēja: $R_k = 1,2 \times 22,15 = 26,58 \text{ kN/m}^2$;

Raksturīgas iedarbes atbilstoši Eurokodeksam: raksturīgās pašsvara iedarbes: $E_{Gk} = 6,64 \text{ kN/m}^2$; raksturīgās lietderīgās iedarbes: $E_{Qk} = 7,5 \text{ kN/m}^2$.

Nestspējas samazinājums, ņemot vērā nolietojumu un bojājumus – 40%. $R_k = 26,58 - 40\% = 16 \text{ kN/m}^2$.

Pagrabstāva pārseguma plātnes – drošuma indeksa β iteratīvā aprēķina rezultāti

Parametrs	Vērtība	Mērvienība	Piezīmes
Pie drošuma indeksa β	2,7	-	Sabrukuma varbūtība: $P_f = 3,5 \cdot 10^{-3}$
Lietderīgai slodzei:			
Variācijas koeficients V_Q	0,6	-	no EN 1991-1-3
Jutības koeficients α_Q	0,7	-	no ISO 2394
$-\alpha_Q\beta$	-1,89	-	
$\phi(-\alpha_Q\beta)$	0,02938	-	
Parciālais drošuma koeficients γ_Q	0,9287	-	
Pašsvara slodzei:			
Jutības koeficients α_G	0,7	-	no ISO 2394
Variācijas koeficients V_G	0,1	-	
Parciālais drošuma koeficients γ_G	1,189	-	
Pretestībai:			
Jutības koeficients α_R	0,8	-	no ISO 2394
Variācijas koeficients V_R	0,15	-	
Parciālais drošuma koeficients γ_R	1,0803	-	
Raksturīgā pastāvīgā iedarbe $E_{k,G}$	6,64	kN/m ²	
Raksturīgā mainīgā iedarbe $E_{k,G}$	7,5	kN/m ²	
Aprēķina iedarbe E_d	14,86	kN/m ²	
Raksturīgā nestspēja R_k	16,00	kN/m ²	
Aprēķina nestspēja R_d	14,80	kN/m ²	
Izmantojums	98,7	%	

Pirmā stāva pārseguma plātne – drošuma indekss 3.6 (aprēķins 5.8. tabulā)

Raksturīgā pašsvara slodze: $E_{Gk} = 3,44 + 3,20 = 6,64$ kN/m²;

Aprēķina pašsvara slodze: $E_{Gd} = 3,44 \times 1,1 + 3,2 \times 1,3 = 7,94$ kN/m²;

Raksturīgā lietderīgā slodze: $E_{Qk} = 10,0$ kN/m²;

Aprēķina lietderīgā slodze: $E_{Qd} = 10,0 \times 1,2 = 12,0$ kN/m²;

Kopējā aprēķina slodze: $E_d = 19,94$ kN/m²;

Pieņemtā sākotnējā aprēķina nestspēja: $R_d = 22,15$ kN/m²;

Pieņemtā sākotnējā raksturīgā nestspēja: $R_k = 1,2 \times 22,15 = 26,58$ kN/m²;

Raksturīgās iedarbes atbilstoši Eirokodeksiem: Raksturīgās pašsvara iedarbes: $E_{Gk} = 6,64$ kN/m²; Raksturīgās lietderīgās iedarbes: $E_{Qk} = 7,5$ kN/m²;

Nestspējas samazinājums, ņemot vērā nolietojumu un bojājumus - 20%; $R_k = 26,58 - 20\% = 21,26$ kN/m².

5.8. tabula

Pirmā stāva pārseguma plātnes – drošuma indeksa β iteratīvā aprēķina rezultāti

Parametrs	Vērtība	Mērvienība	Piezīmes
Pie drošuma indeksa β	3,6	-	Sabrukuma varbūtība: $P_f = 1,6 \cdot 10^{-4}$
Lietderīgai slodzei:			
Variācijas koeficients V_Q	0,6	-	no EN 1991-1-3
Jutības koeficients α_Q	0,7	-	no ISO 2394
$-\alpha_Q\beta$	-2,52	-	
$\phi(-\alpha_Q\beta)$	0,00587	-	
Parciālais drošuma koeficients γ_Q	1,226	-	
Pašsvara slodzei:			
Jutības koeficients α_G	0,7	-	no ISO 2394
Variācijas koeficients V_G	0,1	-	
Parciālais drošuma koeficients γ_G	1,252	-	
Pretestībai:			
Jutības koeficients α_R	0,8	-	no ISO 2394
Variācijas koeficients V_R	0,15	-	
Parciālais drošuma koeficients γ_R	1,2035	-	
Raksturīgā pastāvīgā iedarbe $E_{k,G}$	6,64	kN/m ²	
Raksturīgā mainīgā iedarbe $E_{k,G}$	7,5	kN/m ²	
Aprēķina iedarbe E_d	17,5067	kN/m ²	
Raksturīgā nestspēja R_k	21,26	kN/m ²	
Aprēķina nestspēja R_d	17,7	kN/m ²	
Izmantojums	99,1	%	

Jumta pārseguma plātne – drošuma indekss 2.8 (aprēķins 5.9. tabulā)

Raksturīgā pašsvara slodze: $E_{Gk} = 1,49 + 2,0 = 3,49$ kN/m²;

Aprēķina pašsvara slodze: $E_{Gd} = 1,49 \times 1,1 + 2,0 \times 1,3 = 4,24$ kN/m²;

Raksturīgā sniega slodze: $E_{Qk} = 1,25$ kN/m²;

Aprēķina sniega slodze: $E_{Qd} = 1,25 \times 1,4 = 1,75$ kN/m²;

Kopējā aprēķina slodze: $E_d = 5,99$ kN/m²;

Pieņemtā sākotnējā aprēķina nestspēja: $R_d = 6,66$ kN/m²;

Pieņemtā sākotnējā raksturīgā nestspēja: $R_k = 1,2 \times 6,66 = 8,0$ kN/m²;

Raksturīgās iedarbes atbilstoši Eurokodeksam: Raksturīgās pašsvara iedarbes: $E_{Gk} = 3,49$ kN/m²; Raksturīgās lietderīgās iedarbes: $E_{Qk} = 1,4$ kN/m².

Nestspējas samazinājums, ņemot vērā nolietojumu un bojājumus - 25%, $R_k = 8,0 - 25\% = 6,0$ kN/m².

5.9. tabula

Jumta pārseguma plātnes – drošuma indeksa β iteratīvā aprēķina rezultāti

Parametrs	Vērtība	Mērvienība	Piezīmes
Pie drošuma indeksa β	2,8	-	Sabrukuma varbūtība: $P_f = 2,6 \cdot 10^{-3}$
Lietderīgai slodzei:			
Variācijas koeficients V_Q	0,6	-	no EN 1991-1-3
Jutības koeficients α_Q	0,7	-	no ISO 2394
$-\alpha_Q\beta$	-1,96	-	
$\phi(-\alpha_Q\beta)$	0,025	-	
Parciālais drošuma koeficients γ_Q	0,959	-	
Pašsvara slodzei:			
Jutības koeficients α_G	0,7	-	no ISO 2394
Variācijas koeficients V_G	0,1	-	
Parciālais drošuma koeficients γ_G	1,196	-	
Pretestībai:			
Jutības koeficients α_R	0,8	-	no ISO 2394
Variācijas koeficients V_R	0,15	-	
Parciālais drošuma koeficients γ_R	1,0934	-	
Raksturīgā pastāvīgā iedarbe $E_{k,G}$	3,49	kN/m ²	
Raksturīgā mainīgā iedarbe $E_{k,G}$	1,4	kN/m ²	
Aprēķina iedarbe E_d	5,516	kN/m ²	
Raksturīgā nestspēja R_k	6,00	kN/m ²	
Aprēķina nestspēja R_d	5,5	kN/m ²	
Izmantojums	100,5	%	

Otrā stāva pārseguma plātne – drošuma indekss 1,2 (aprēķins 5.10. tabulā)

Raksturīgā pašsvara slodze: $E_{Gk} = 1,49 + 0,5 = 1,99$ kN/m²;

Aprēķina pašsvara slodze: $E_{Gd} = 1,49 \times 1,1 + 0,5 \times 1,3 = 2,29$ kN/m²;

Raksturīgā lietderīgā slodze: $E_{Qk} = 0,7$ kN/m²;

Aprēķina lietderīgā slodze: $E_{Qd} = 0,7 \times 1,3 = 0,91$ kN/m²;

Kopējā aprēķina slodze: $E_d = 3,2$ kN/m²;

Pieņemtā sākotnējā aprēķina nestspēja: $R_d = 3,2$ kN/m²;

Pieņemtā sākotnējā raksturīgā nestspēja: $R_k = 1,2 \times 2,29 = 3,84$ kN/m²;

Raksturīgās iedarbes atbilstoši Eurokodeksam - Raksturīgās pašsvara iedarbes: $E_{Gk} = 1,99$ kN/m²; Raksturīgās lietderīgās iedarbes: $E_{Qk} = 0,7$ kN/m²;

Nestspējas samazinājums, ņemot vērā nolietojumu un bojājumus - 40%, $R_k = 3,84 - 40\% = 2,3$ kN/m².

Otrā stāva pārseguma plātnes – drošuma indeksa β iteratīvā aprēķina rezultāti

Parametrs	Vērtība	Mērvienība	Piezīmes
Pie drošuma indeksa β	1,2	-	Sabrukuma varbūtība: $P_f = 1,2 \cdot 10^{-1}$
Lietderīgai slodzei:			
Variācijas koeficients V_Q	0,6	-	no EN 1991-1-3
Jutības koeficients α_Q	0,7	-	no ISO 2394
$-\alpha_Q \beta$	-0,84	-	
$\phi(-\alpha_Q \beta)$	0,2005	-	
Parciālais drošuma koeficients γ_Q	0,56	-	
Pašsvara slodzei:			
Jutības koeficients α_G	0,7	-	no ISO 2394
Variācijas koeficients V_G	0,1	-	
Parciālais drošuma koeficients γ_G	1,084	-	
Pretestībai:			
Jutības koeficients α_R	0,8	-	no ISO 2394
Variācijas koeficients V_R	0,15	-	
Parciālais drošuma koeficients γ_R	0,9024	-	
Raksturīgā pastāvīgā iedarbe $E_{k,G}$	1,99	kN/m ²	
Raksturīgā mainīgā iedarbe $E_{k,G}$	0,7	kN/m ²	
Aprēķina iedarbe E_d	2,55	kN/m ²	
Raksturīgā nestspēja R_k	2,30	kN/m ²	
Aprēķina nestspēja R_d	2,50	kN/m ²	
Izmantojums	100,0	%	

Dzelzsbetona kopne – drošuma indekss 5,5 (aprēķins 5.11. tabulā)

Raksturīgā pašsvara slodze $E_{Gk} = 2,0 + 1,49 + 0,5 + 1 = 4,99$ kN/m²;

Raksturīgā lietderīgā slodze: $E_{Qk} = 1,25$ kN/m²;

Kopējā aprēķina slodze: $E_d = 5,99 + 1,75$ kN/m² = 7,74 kN/m²;

Pieņemtā sākotnējā aprēķina nestspēja: $R_d = 14,1$ kN/m²;

Pieņemtā sākotnējā raksturīgā nestspēja: $R_k = 1,2 \times 14,1 = 16,8$ kN/m²;

Raksturīgās iedarbes atbilstoši Eirokodeksam - Raksturīgās pašsvara iedarbes: $E_{Gk} = 4,99$ kN/m²; Raksturīgās lietderīgās iedarbes: $E_{Qk} = 1,4$ kN/m²;

Nestspējas samazinājums, ņemot vērā nolietojumu un bojājumus - 10%, $R_k = 16,8 - 10\% = 15,1$ kN/m².

5.11. tabula

Dzelzsbetona kopnes drošuma indeksa β iteratīvā aprēķina rezultāti

Parametrs	Vērtība	Mērvienība	Piezīmes
Pie drošuma indeksa β	5,5	-	Sabrukuma varbūtība: $P_f = 1,9 \cdot 10^{-8}$
Lietderīgai slodzei:			
Variācijas koeficients V_Q	0,6	-	no EN 1991-1-3
Juības koeficients α_Q	0,7	-	no ISO 2394
$-\alpha_Q \beta$	-3,85	-	
$\phi(-\alpha_Q \beta)$	$5,906 \cdot 10^{-5}$	-	
Parciālais drošuma koeficients γ_Q	2,0683	-	
Pašsvara slodzei:			
Juības koeficients α_G	0,7	-	no ISO 2394
Variācijas koeficients V_G	0,1	-	
Parciālais drošuma koeficients γ_G	1,385	-	
Pretestībai:			
Juības koeficients α_R	0,8	-	no ISO 2394
Variācijas koeficients V_R	0,15	-	
Parciālais drošuma koeficients γ_R	1,5117	-	
Raksturīgā pastāvīgā iedarbe $E_{k,G}$	4,99	kN/m	
Raksturīgā mainīgā iedarbe $E_{k,G}$	1,4	kN/m	
Aprēķina iedarbe E_d	9,807	kN/m	
Raksturīgā nestspēja R_k	15,10	kN/m	
Aprēķina nestspēja R_d	10,0	kN/m	
Izmantojums	98,18	%	

Otrā stāva kolonna – drošuma indekss 3,2 (aprēķins 5.12. tabulā)

Kopējā aprēķina slodze: $E_d = 552$ kN;

Pieņemtā sākotnējā aprēķina nestspēja: $R_d = 613$ kN;

Pieņemtā sākotnējā raksturīgā nestspēja: $R_k = 1,2 \times 613 = 736$ kN;

Raksturīgās iedarbes atbilstoši Eurokodeksam - raksturīgās pašsvara iedarbes: $E_{Gk} = 350$ kN; Raksturīgās lietderīgās iedarbes: $E_{Qk} = 110$ kN;

Nestspējas samazinājums, ņemot vērā nolietojumu un bojājumus - 15%, $R_k = 736 - 15\% = 626$ kN.

Otrā stāva kolonnas drošuma indeksa β iteratīvā aprēķina rezultāti

Parametrs	Vērtība	Mērvienība	Piezīmes
Pie drošuma indeksa β	3,2	-	Sabrukuma varbūtība: $P_f = 6,9 \cdot 10^{-4}$
Lietderīgai slodzei:			
Variācijas koeficients V_Q	0,6	-	no EN 1991-1-3
Jutības koeficients α_Q	0,7	-	no ISO 2394
$-\alpha_Q \beta$	-2,24	-	
$\phi(-\alpha_Q \beta)$	0,0125	-	
Parciālais drošuma koeficients γ_Q	1,086	-	
Pašsvara slodzei:			
Jutības koeficients α_G	0,7	-	no ISO 2394
Variācijas koeficients V_G	0,1	-	
Parciālais drošuma koeficients γ_G	1,224	-	
Pretestībai:			
Jutības koeficients α_R	0,8	-	no ISO 2394
Variācijas koeficients V_R	0,15	-	
Parciālais drošuma koeficients γ_R	1,147	-	
Raksturīgā pastāvīgā iedarbe $E_{k,G}$	350	kN	
Raksturīgā mainīgā iedarbe $E_{k,G}$	110	kN	
Aprēķina iedarbe E_d	547,9	kN	
Raksturīgā nestspēja R_k	626	kN	
Aprēķina nestspēja R_d	545,7	kN	
Izmantojums	100,39	%	

Pagraba stāva kolonna – drošuma indekss 2,8 (aprēķins 5.13. tabulā)

Kopējā aprēķina slodze: $E_d = 2216$ kN;

Pieņemtā sākotnējā aprēķina nestspēja: $R_d = 2462$ kN;

Pieņemtā sākotnējā raksturīgā nestspēja: $R_k = 1,2 \times 2462 = 2954$ kN;

Raksturīgas iedarbes atbilstoši Eurokodeksam - raksturīgās pašsvara iedarbes: $E_{Gk} = 1044,7$ kN; Raksturīgās lietderīgās iedarbes: $E_{Qk} = 642$ kN;

Nestspējas samazinājums, ņemot vērā nolietojumu un bojājumus - 30%, $R_k = 2954 - 30\% = 2068$ kN.

Pagraba stāva kolonnas drošuma indeksa β iteratīvā aprēķina rezultāti

Parametrs	Vērtība	Mērvienība	Piezīmes
Pie drošuma indeksa β	2,8	-	Sabrukuma varbūtība: $P_f = 2,6 \cdot 10^{-3}$
Lietderīgai slodzei:			
Variācijas koeficients V_Q	0,6	-	no EN 1991-1-3
Jutības koeficients α_Q	0,7	-	no ISO 2394
$-\alpha_Q\beta$	-1,96	-	
$\phi(-\alpha_Q\beta)$	0,025	-	
Parciālais drošuma koeficients γ_Q	0,959	-	
Pašsvara slodzei:			
Jutības koeficients α_G	0,7	-	no ISO 2394
Variācijas koeficients V_G	0,1	-	
Parciālais drošuma koeficients γ_G	1,196	-	
Pretestībai:			
Jutības koeficients α_R	0,8	-	no ISO 2394
Variācijas koeficients V_R	0,15	-	
Parciālais drošuma koeficients γ_R	1,0934	-	
Raksturīgā pastāvīgā iedarbe $E_{k,G}$	1044,7	kN	
Raksturīgā mainīgā iedarbe $E_{k,G}$	642	kN	
Aprēķina iedarbe E_d	1864,942	kN	
Raksturīgā nestspēja R_k	2068	kN	
Aprēķina nestspēja R_d	1891,4	kN	
Izmantojums	98,6	%	

Konstruktīvo elementu drošuma novērtējuma kopsavilkums

Saskaņā ar izpētēm, kas veiktas metodoloģijas pirmajā un otrajā posmā, noskaidrots, ka vērtējumam par ēkas kopējo mehānisko stiprību un stabilitāti var kalpot ēkas viena no sekcijām (skat. 5.8. att.) kuras vidējais rāmis uzskatāms par reprezentējošo konstrukciju konstruktīvo elementu nosacīto ietekmes koeficientu W noteikšanai.

Par nosacīto tilpuma vienību tiek pieņemts paralēlskaltnis ar šādām dimensijām:

- Sānu mala a = rāmju solis = 6 m;
- Sānu mala b = kolonnu solis rāmja šķērsvirzienā = 6 m;
- Augstums c = pirmā stāva augstums = 4,8 m.

Visa rāmja nosacītais sabrukuma tilpums ir:

$$V = 2a \cdot 6b \cdot (0,75a + 2c + 1,6c) = 52,2 \text{ vienības.}$$

Pēc attiecīgiem aprēķiniem iegūti atsevišķie elementu drošuma raksturotāji un svara koeficienti apkopoti tabulā 5.14. Tabulā dots elementu skaits un nosacītais sabrukuma tilpums attiecas uz apjomu, sabrūkot vidējam šķērsrāmim.

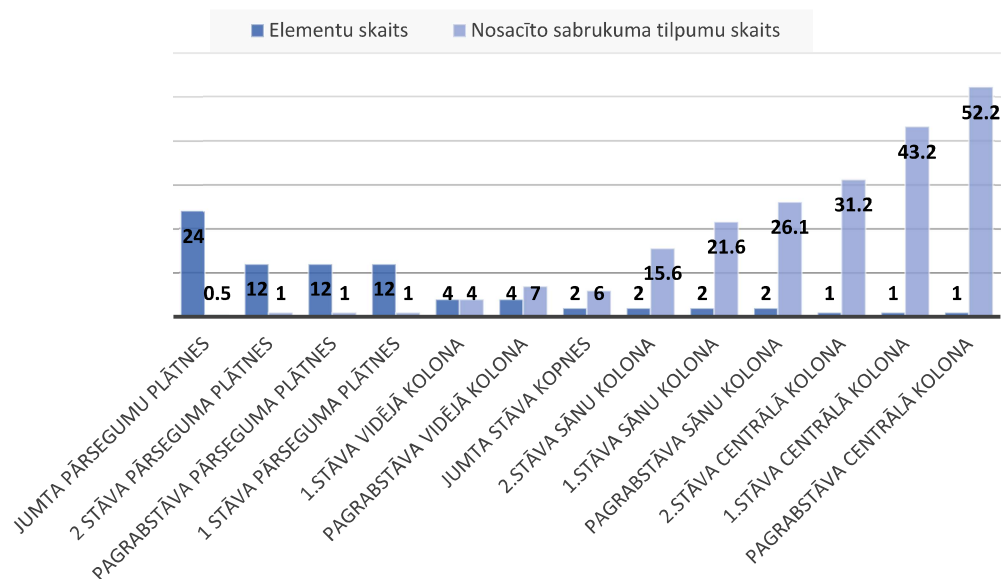
5.14. tabula

Ēkas konstruktīvo elementu drošuma raksturotāji un nosacītā svara koeficienti

Konstruktīvais elements	Elementu skaits	Nosacītais sabrukuma tilpums	Ietekmes koeficients, W	Drošuma indekss, β	Sabrukuma varbūtība, P_f
Pagrabstāva pārseguma plātnes	12	1	0,02	2,8	$2,6 \times 10^{-3}$
Pagrabstāva sānu kolona	2	26,1	0,5	2,8	$2,6 \times 10^{-3}$
Pagrabstāva vidējā kolona	4	7	0,13	2,8	$2,6 \times 10^{-3}$
Pagrabstāva centrālā kolona	1	52,2	1,00	2,8	$2,6 \times 10^{-3}$
1 stāva pārseguma plātnes	12	1	0,02	3,6	$1,6 \times 10^{-4}$
1.stāva sānu kolona	2	21,6	0,41	3,2	$6,9 \times 10^{-4}$
1.stāva vidējā kolona	4	4	0,08	3,2	$6,9 \times 10^{-4}$
1.stāva centrālā kolona	1	43,2	0,83	3,2	$6,9 \times 10^{-4}$
2 stāva pārseguma plātnes	12	1	0,02	1,2	$1,2 \times 10^{-1}$
2.stāva sānu kolona	2	15,6	0,3	3,2	$6,9 \times 10^{-4}$
2.stāva centrālā kolona	1	31,2	0,6	3,2	$6,9 \times 10^{-4}$
Jumta pārsegumu plātnes	24	0,5	0,01	2,8	$2,6 \times 10^{-3}$
Jumta stāva kopnes	2	6	0,11	3,8*	$1,9 \times 10^{-8}$

* - ieprojektētās jumta kopnes paredzētas 12 m šķērsrāmju solim, tāpēc saskaņā ar aprēķinu drošuma indekss $\beta=5,5$. Taču viens elementa tips ar augstāku drošuma līmeni, kam nosacītais sabrukuma tilpums ir neliels, nepaceļ visas ēkas drošuma līmeni, tāpēc tālākos aprēķinos pieņemts ka $\beta = 3,8$ kā jaunam elementam.

5.9. attēla grafikā redzams, ka ēkās parasti nozīmīgākie elementi drošuma kontekstā ir mazāk (pēc skaita). Piedāvātā metode svarojuma koeficientu noteikšanai to ņem vērā.



5.9. att. Pieņemto reprezentējošo elementu un sabukušo tilpumu skaits ēkā (attiecas uz vienu sabukušu šķērsrāmi).

4.2 izteiksmē ievietojot attiecīgos drošuma indeksus un nosacītos ietekmes koeficientus, noteikts ēkas globālais drošuma indekss jeb ēkas mehāniskās stiprības un stabilitātes raksturotājs:

$$A = 3,03.$$

Parametrs, kas raksturo ēkas kopējās mehāniskās izturības un stabilitātes izmaiņu, - ēkas relatīvais drošuma indekss saskaņā ar 4.3. izteiksmi:

$$A_{GRI} = \frac{CC_{\beta} - A}{CC_{\beta}} 100 \% = \frac{3,8 - 3,03}{3,8} 100 \% = 20,2 \%,$$

kur CC_{β} - mērķa drošuma indekss β atbilstoši ēkas seku klasei CC2;

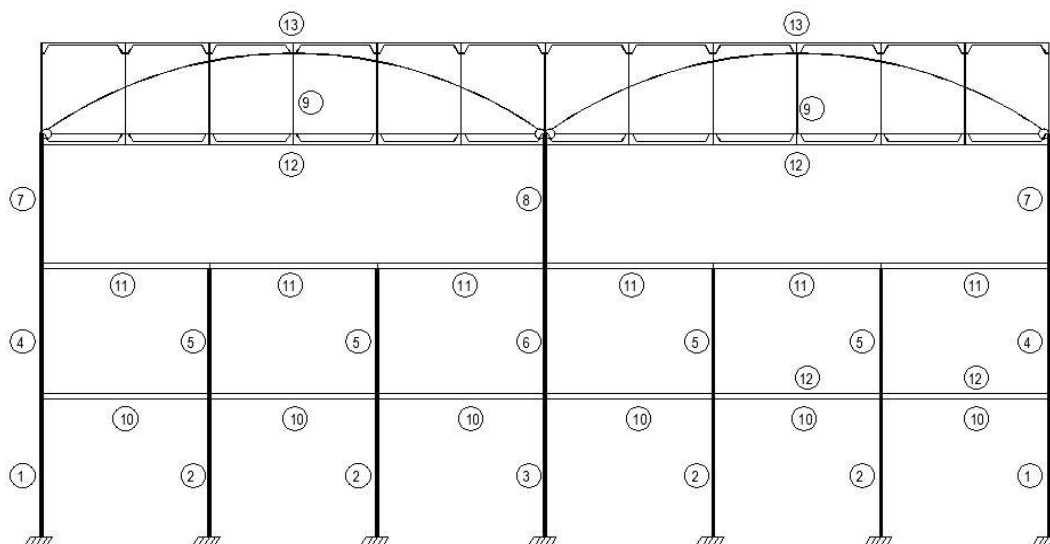
A - globālais ēkas drošuma indekss.

5.2. Ēkas drošuma rezultātu kalibrēšana ar matemātisko simulāciju

Kā minēts 2.nodaļas literatūras apskatā, ekspluatācijā esošu konstrukciju sistēmu drošuma (sabrukuma varbūtību) noteikšanas augstākais jeb 5.līmeņa novērtējums tiek izmantotas matemātiskās modelēšanas metodes, simulējot konstrukcijas sabrukšanas varbūtību ar Monte Karlo metodi. Lai salīdzinātu iepriekšējā nodaļā iegūtos rezultātus ar matemātiskas modelēšanas varbūtības rezultātiem, šajā nodaļā veikta tās pašas Valmieras ēkas drošuma modelēšana ar Monte Karlo metodi, izmantojot atvērtā koda programmu *Python 3*.

5.2.1. Konstrukcijas sistēmas definēšana un robežstāvokļi

Valmieras ēkas gadījumā tiek prognozēta sabrukšanas varbūtība konstrukciju sistēmai, kas redzama 5.10. attēlā.



5.10. att. Ēkas mehānisko stiprību un stabilitāti raksturojošās sekcijas un rāmju konstruktīvā shēma (cipari norāda elementa kārtas Nr.).

Lai modelētu daudzkomponentu sistēmas bojājumus, ir jāzina atsevišķu komponentu bojājumu varbūtības. Kā jau minēts literatūras apskatā, pastāv divu veidu konstrukciju sistēmas – virknes konstrukciju sistēma un paralēlā konstrukciju sistēma (2.4.4.). Nav precīzi nosakāms, kāda konstrukciju sistēma ir Valmieras ēkai, tādēļ tiek pieņemti abi iespējamie varianti. Šo gadījumu iespējamie bojājumu sistēmu scenāriji atkarībā no konstrukciju sistēmas ir apkopoti 5.15. un 5.16. tabulās. Tabulu kreisajā pusē ir attēlots elements, kas sabrūk, savukārt labajā pusē norādīti elementi, kas sabrūk, sabrūkot kreisās puses elementam. Piemēram, sabrūkot 2. stāva malējai kolonai (7. poz.) paralēlajā sistēmā, tā izraisīs vienas jumta kopnes sabrukumu, sešu 2. stāva griestu plātņu sabrukumu un sešu griestu plātņu sabrukumu (5.15. tab.).

5.15. tabula

Elementu sabrukums un skaits paralēlās sistēmas scenārijā

Nr.	Sabrūkošais elements	β	Atkarīgais elements un to skaits												
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0.st. malējā kolonna	2.8	S			1			1		1	1	1	6	6
2	0.st. vidējā kolonna	2.8		S			1					2	2		
3	0.st. centrālā kolonna	2.8			S			1		1	2	2	2	12	12
4	1.st. malējā kolonna	3.2				S			1		1		1	6	6
5	1.st. vidējā kolonna	3.2					S						2		
6	1.st. centrālā kolonna	3.2						S		1	2		2	12	12
7	2.st. malējā kolonna	3.2							S		1			6	6
8	2.st. centrālā kolonna	3.2								S	2			12	12
9	Jumta kopne	5.5									S			6	6
10	0.st. plātne	2.8										S			
11	1.st. plātne	3.6											S		
12	2.st. griestu plātnes	1.2												S	
13	Jumta plātnes	2.8													S

Savukārt sabrūkot tai pašai 2. stāva malējai kolonai (7. poz.) virknes sistēmā, tā izraisīs gan vienas jumta kopnes sabrukumu, sešu 2. stāva griestu plātņu sabrukumu un sešu griestu plātņu sabrukumu, kā arī pagrabstāva vienu malējo kolonu un divas vidējās kolonas, 1. stāva malējo kolonu un divas vidējās kolonas, kā arī trīs pagrabstāva pārseguma un trīs 1. stāva pārseguma paneļu sabrukumu. (5.16. tab.).

5.16. tabula

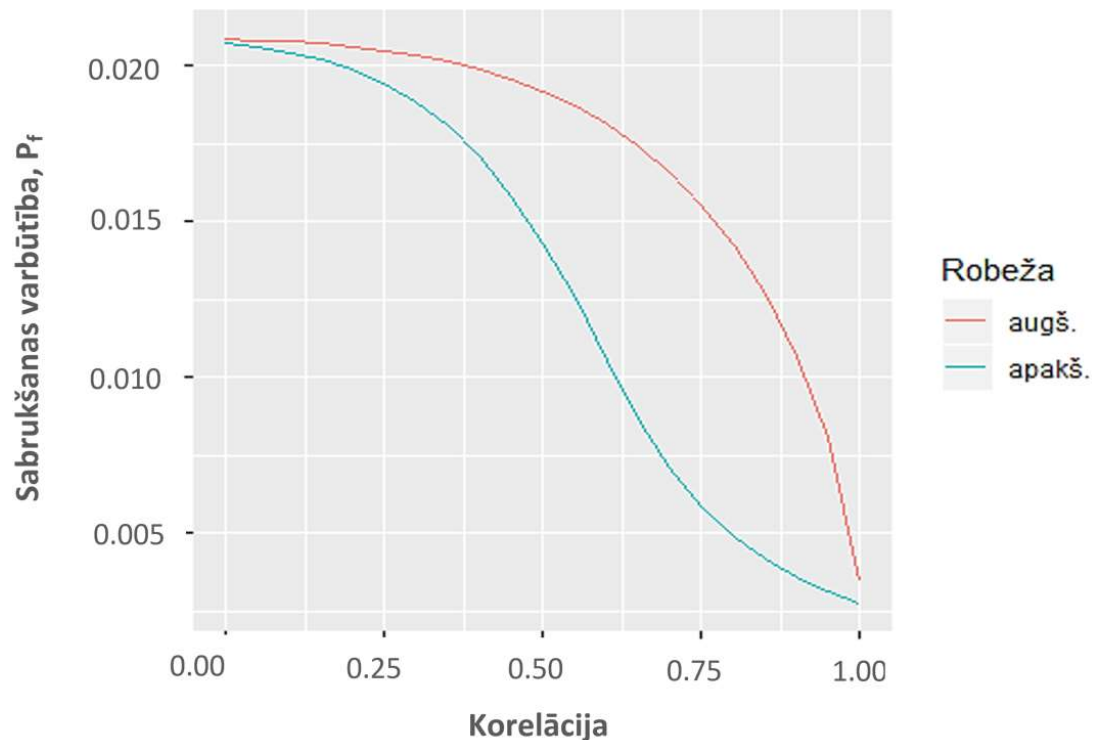
Elementu sabrukums un skaits virknes sistēmas scenārijā

Nr.	Sabrūkošais elements	β	Atkarīgais elements un to skaits												
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0.st. malējā kolonna	2.8	S	2		1	2		1		1	3	3	6	6
2	0.st. vidējā kolonna	2.8		S			1					2	2		
3	0.st. centrālā kolonna	2.8	2	4	S	2	4	1	2	1	2	6	6	12	12
4	1.st. malējā kolonna	3.2	1	2		S	2		1		1	3	3	6	6
5	1.st. vidējā kolonna	3.2		1			S					2	2		
6	1.st. centrālā kolonna	3.2	2	4	1	2	4	S	2	1	2	6	6	12	12
7	2.st. malējā kolonna	3.2	1	2		1	2		S		1	3	3	6	6
8	2.st. centrālā kolonna	3.2	2	4	1	2	4	1	2	S	2	6	6	12	12
9	Jumta kopne	5.5	1	2		1	2		1		S	3	3	6	6
10	0.st. plātne	2.8										S			
11	1.st. plātne	3.6										1	S		
12	2.st. griestu plātnes	1.2										1	1	S	
13	Jumta plātnes	2.8										1	1	1	S

5.2.2. Pirmās kārtas tuvinājums

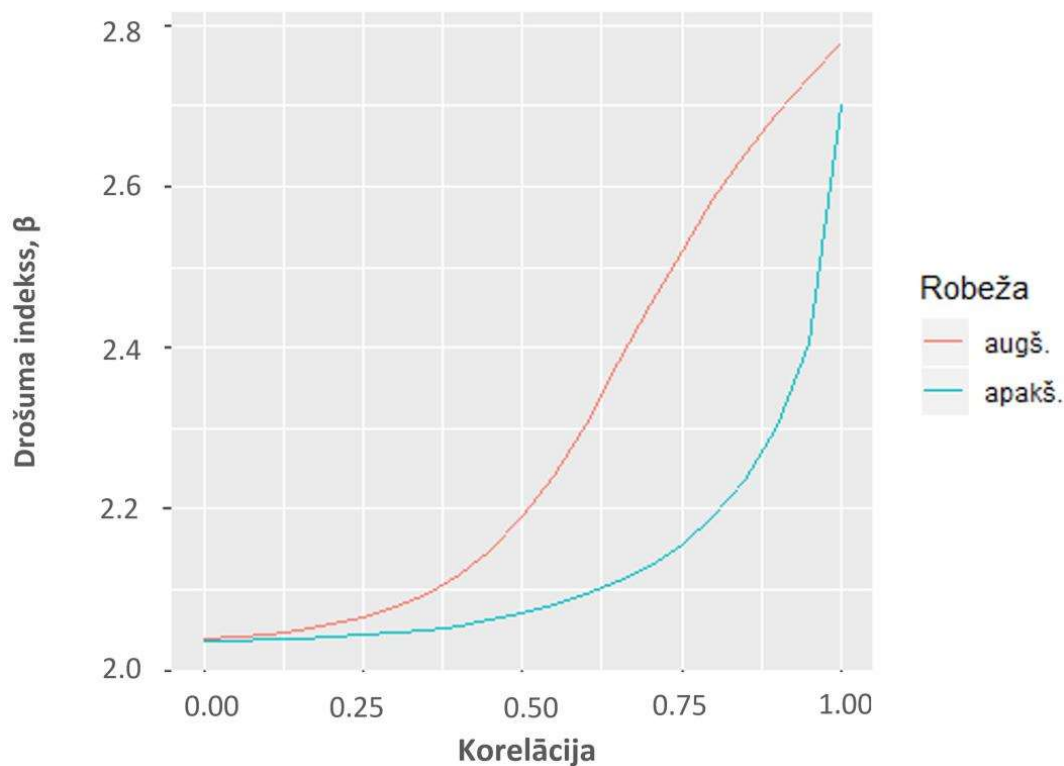
Šobrīd pieejamajās publikācijās interesējoša sistēma nav aprakstīta nejaušu mainīgo lielumu un robežstāvokļu funkciju izteiksmē. Rezultātā nav iespējams skaidri noteikt korelācijas struktūru starp robežstāvokļiem. Tādējādi pirmās kārtas simulācijām šobrīd tiek izvēlēts nelabvēlīgākais scenārijs, jeb virknes sabrukuma sistēma. Šajā gadījumā tiek prognozēts plašāks bojājumu apjoms un to varbūtības robežas, kurās tiek ņemta vērā jebkura iespējamā korelācijas struktūra starp noteiktiem robežlielumiem. Sistēma sastāv no individuāliem elementiem, kur katram ir sava sabrukšanas varbūtība. Tiek definēti galējie robežstāvokļi - sistēmas nosacījumi, kas atbilst konkrētam bojājumam. Virknes sistēmā robežstāvokļi tiek uzdoti ar funkciju $\mathbf{g} = \{g_1, g_2, \dots, g_m\}, g_i \in R^p$, kas definēti pamata nejaušiem mainīgiem lielumiem $\mathbf{X} = \{X_1, X_2, \dots, X_p\}$. Šie nejauši mainīgie atbilst spēkiem, pretestībām, slodzēm utt. Robežstāvokļi ir definēti kā X vērtības, pie kurām $g_i(\mathbf{X}) < 0$.

Piemērojot 2.42. izteiksmi konkrētajam gadījumam, iegūstam sabrukšanas varbūtības intervālu $\leq P(\mathbf{F}): \# \text{ [FORM] } 0,020717-0,003467$.



5.11. att. Sabrukšanas varbūtības robežas FORM simulācijā.

Sabrukšanas varbūtību var izteikt arī drošuma indeksa β intervālā: ## [1] **2,039158–2,7**.



5.12. att. Drošuma indeksa β robežas FORM simulācijā.

5.2.3. Otrās kārtas tuvinājums

Pieņemot, ka Valmieras ēkas konstrukcija atbilst paralēlās konstrukcijas sistēmai, tika izmantota verifikācija ar otrās kārtas tuvinājumu, lai noteiktu robežstāvokļu robežas. Šajā gadījumā mums nepieciešams aprēķināt varbūtības $P(F_i \cap F_j)$, ko atrod, izmantojot 2.39. izteiksmi.

Iegūstam 2-dimensiju normālā sadalījuma funkciju, ar kuru aprēķinām varbūtību, ka iestāsies vienlaicīgi abi scenāriji. Papildus ņemam vērā “otrās kārtas notikumus”, t. i. scenāriju šķēlumus $P(F_i \cap F_j)$. To var izdarīt, ja zināmas korelācijas starp šiem scenārijiem (stāvokļiem). Tā kā mums šāda informācija nav zināma, vienkāršošanas nolūkā pieņemam korelācijas koeficientu ρ_{ij} robežās no 0 – 1, veicot simulācijas aprēķinus ar soli 0,05.

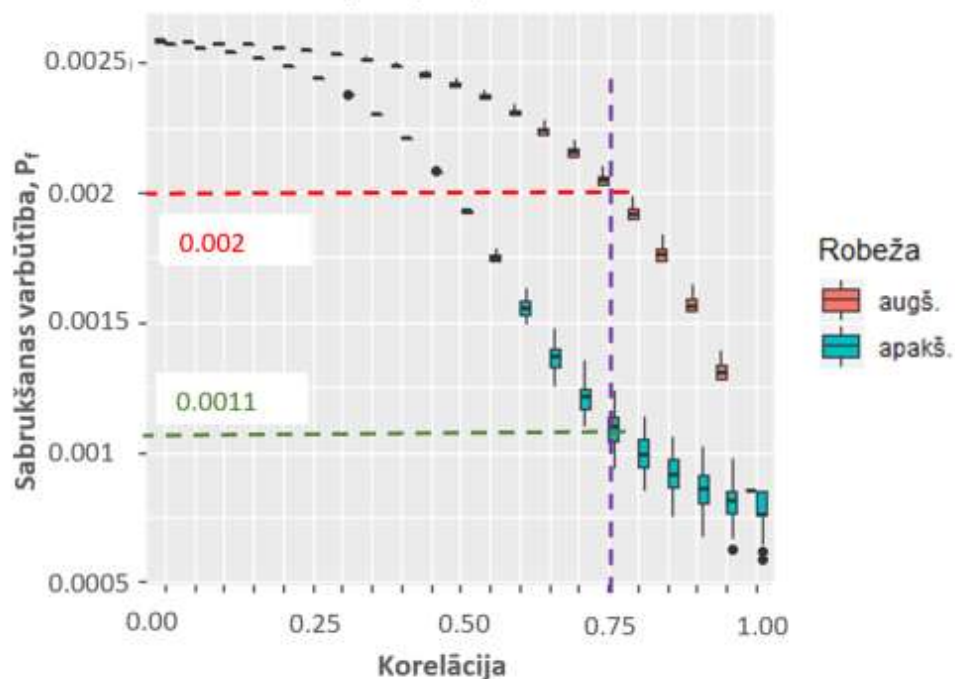
Piemērojot otrās kārtas tuvinājuma izteiksmi (SORM) (2.39), otrajā tuvinājumā iegūstam sabrukšanas varbūtības intervālu $\leq P(F)$

[SORM] **0,002674 - 0,000748**

kas ir izsakāms arī drošuma indeksa β intervālā:

[SORM] **2,7853 – 3,1756**

Sabrukšanas varbūtība ar 2.kārtas tuvinājumu Ar katru korelāciju aprēķini veikti N=100 reizes



5.13. att. Sabrukšanas varbūtības robežas FORM simulācijā.

Aplūkojot korelācijas grafikus otrajā tuvinājumā (5.13. att.), redzams, ka vislielākā izkliede starp robežstāvokļiem veidojas pie korelācijas 0,75. Pieņemot, ka korelācija starp elementiem ir zināma (0,75), iegūt sabrukšanas varbūtības intervālu $\leq P(F)$

[SORM $\rho_{ij} = 0.75$] **0,002674 - 0,000748**

kas ir izsakāms arī drošuma indeksa β intervālā:

[SORM $\rho_{ij} = 0.75$] **2,8782 – 3,0617**

5.2.4. Rezultātu verifikācija

Salīdzinot pirmās un otrās kārtas tuvinājumos iegūtos rezultātus ar 5.1 apakšnodaļā iegūtajiem rezultātiem, var secināt, ka:

- virtnes sabrukuma rezultātā lietojot pirmās kārtas tuvinājumu drošuma līmeņa samazinājums ir robežās no 28,95-46,34 %;
- paralēla sabrukumu rezultātā lietojot otrās kārtas tuvinājumu drošuma līmeņa samazinājums ir robežās no 16,43-26,7 %;
- paralēla sabrukumu rezultātā zinot korelāciju starp konstrukciju elementiem drošuma līmeņa samazinājums ir robežās 19,43-24,26 %.

5.3. Nodaļas secinājumi

Šajā nodaļā sniegts praktisks piemērs, kā pielietot izstrādāto metodoloģiju, raksturojot ekspluatācijā esošās ēkas drošumu ar globālo drošuma indeksu A un A_{GRI} .

Tāpat šajā nodaļā arī sniegts praktisks piemērs, kā iegūtos rezultātus verificēt ar literatūrā ieteiktajām FORM un SORM simulāciju metodēm.

Ēkas novērtētais drošuma līmeņa samazinājums ir novērtēts kā 20,2% salīdzinot ar analogas jaunas ēkas drošuma līmeni atbilstoši Eirokodos noteiktajam drošuma līmenim.

Veicot rezultātu verifikāciju ar pirmās kārtas tuvinājumu, rezultāti uzrāda drošuma līmeņa samazinājumu robežās no 28,95% - 46.34%. Šāds drošuma līmeņa samazinājums skaidrojama ar faktu, ka pieņēmām nelabvēlīgāgo sabrukumu scenāriju.

Savukārt veicot simulāciju ar otrās kārtas tuvinājumu, rezultāti uzrāda drošuma līmeņa samazinājumu robežās no 16,43% - 26,7%, bet pieņemot noteiktu korelāciju starp konstrukciju elementiem, pat pie vislielākās robežstāvokļu izkliedes drošuma līmeņa samazinājums ir robežās no 19,43% - 24,26%.

Tādējādi iegūstam 2 būtiskus secinājumus:

- a) veicot ēkas drošuma līmeņa samazinājuma noteikšanu ar promocijas darbā izstrādāto metodi, mēs bez īpašas matemātiskās modelēšanas varam iegūt ticamu rezultātu par ēkas drošuma līmeni. To arī apliecina verifikācijas rezultāti, veicot drošuma līmeņa noteikšanu ar matemātisko simulāciju
- b) veicot matemātisko simulāciju, ir svarīgi zināt faktisko konstruktīvo shēmu un korelāciju starp elementiem, tādējādi iegūstot precizākus simulācijas rezultātus.

Par šajā nodaļā veikto ēkas drošuma novērtējumu sniegta prezentācija 2019.gadā starptautiskā konferencē Viļņā (Lietuva) un izdota publikācija [83].

6. IETEIKUMI METODOLOĢIJAS PRAKTISKAI IEVIEŠANAI

6.1. Publisko ēku tehniskā apsekošana

2019. gadā stājās Latvijā spēkā normatīvo aktu prasības publiskajām ēkām, kas sasniegušas 10 gadu kopš nodošanas ekspluatācijā, par to, ka ir veicamas tehniskās apsekošanas ar mērķi pārliecināties par ēkas atbilstību mehāniskās stiprības un stabilitātes prasībām.

Saskaņā ar normatīvo regulējumu mehāniskā stiprība un stabilitāte ir Būvniecības likumā uzskatīto būtisko prasību pirmā prasība, un atbilstoši ES pamatnostādņēm [5], šī prasība nozīmē, ka būves jāprojektē un jābūvē tā, lai slodze, kas var iedarboties uz tām būvēšanas un izmantošanas laikā, neizraisītu šādas sekas:

- a) visas būves vai tās atsevišķu daļu sabrukumu;
- b) ievērojamas deformācijas, kas pārsniedz pieļaujamās robežas;
- c) citu būves daļu vai savienojumu vai uzstādīto iekārtu bojājumus nesošas konstrukcijas deformācijas dēļ;
- d) bojājumu, kas ir neproporcionāls cēlonim, kas to izraisījis.

Vienlaikus Latvijas būvnormatīvā LBN 405 ir noteikts, ka periodiski būves ekspluatācijas laikā, bet ne retāk kā reizi 10 gados otrās un trešās grupas publiskai un daudzstāvu daudzdzīvokļu dzīvojamajai ēkai veicama tehniskā apsekošana (galvenā inspekcija). Tās ietvaros tiek veikta attiecīgās ēkas faktiskā tehniskā stāvokļa novērtējums ēkas nesošajām būvkonstrukcijām visā ēkas apjomā attiecībā uz mehānisko stiprību, stabilitāti un lietošanas drošību (krišana, sadursme, apdegums, nāvējošs elektrošoks, eksplozijas radīts ievainojums). Tāpat tiek veikts attiecīgās ēkas būvkonstrukciju un to elementu faktiskā tehniskā stāvokļa ugunsizturības novērtējums, kā arī ugunsdrošībai nozīmīgu inženiertehnisko sistēmu faktiskā tehniskā stāvokļa un darbības novērtējums.

Minētais normatīvs attiecas arī uz tiltu, pārvadu, tuneļu un atbalstsienu apsekošanu, sniedzot norādījumus, ka apsekošana jāveic saskaņā ar standartu LVS 190-11:2009.

Lai nodrošinātu, ka arī ēku apsekošana tiek veikta pēc vienotiem principiem un satura, promocijas darba autors uzskata, ka arī ēku apsekošanai ir jāizstrādā nacionālais standarts, kurā tiek iestrādāta šajā promocijas darbā piedāvātā metode kā novērtēt ēku konstrukciju mehānisko stiprību un stabilitāti, lietojot vienoto drošuma raksturotāju - ēkas kopējo drošuma indeksu. Tas ļaus turpmāk gan ēku lietotājiem, gan īpašniekiem, gan kontrolējošām iestādēm, gan nozares speciālistiem salīdzināt dažādu ēku drošuma līmeni, kā arī redzēt izmaiņas ēkas drošumā atbilstoši veiktajiem vai neveiktajiem uzlabojumiem.

6.2. Vienotā platforma par tehniskās apsekošanas datiem

Būvniecības valsts kontroles birojs (BVKB) saskaņā ar normatīvo aktu prasībām no 2020. gada sācis visu publisko ēku tehnisko apsekojumu apkopošanu Būvniecības informācijas sistēmā. Tādējādi ir izveidota vienota vide, kurā paralēli likumdevēja vēlmēm par veikto pārbaužu kontroli var attīstīt nepieciešamo nacionālo informācijas bibliotēku par konstrukcijām un to tehniskajiem raksturotājiem, tostarp drošumu.

Šādas informācijas strukturēta apkopšana ļaus izmantot šos datus gan akadēmiskās vides pētījumiem, gan nozarei, gan likumdevējam un citām ieinteresētām pusēm.

Turklāt ir svarīgi jau šodien domāt par iespējām, kā izmantot tehnoloģijas, lai tās sniedz informāciju par sagaidāmo drošuma līmeni un riskiem šajā sakarā, proti, mākslīgo intelektu. Lai būtu iespējama mākslīgā intelekta ieviešana, tam nepieciešami dati noteiktā kopsakarībā, lai izdarītu secinājumus un pats sevi attīstītu (trenētu). Tāpēc ir ieteicams noteikt, ka par katru drošuma vērtējumu dati ir jāievada vienotajā Būves informācijas sistēmā, ko uztur BVKB, un, izstrādājot mākslīgā intelekta piemērotu algoritmu, būs iespējams prognozēt gan pārbaudīto ēku turpmāko drošumu, gan vēl nepārbaudīto, bet pēc līdzīgām pazīmēm izbūvētu un/vai līdzīgos apstākļus uzturētu drošuma līmeni.

7. SECINĀJUMI

Promocijas darba gaitā izstrādāta noslēgta metodoloģija ekspluatācijā esošu ēku konstrukciju drošuma līmeņa kvantitatīvai novērtēšanai. Metodoloģija balstīta ēkas globālā konstrukcijas drošuma indeksa (*Global reliability index*) ieviešanā, kas ņem vērā ēkas nesošo elementu un to savienojumu tehnisko stāvokli, to individuālo nozīmi kopējās ēkas konstrukcijas mehāniskās izturības un stabilitātes nodrošināšanā, kā arī tā iespējamā sabrukuma sekas.

Metodoloģijas izstrādes ietvaros izstrādātas vairākas jaunas metodes:

- ēku kvalitatīvā riska klasificēšanas metode ekspluatācijā esošo ēku sākotnējā stāvokļa novērtēšanai;
- metode ekspluatācijā esošu konstrukciju drošuma līmeņa noteikšanai, kas projektētas balstoties uz dažādām normatīvajām bāzēm;
- metode, kas raksturo ēkas drošuma līmeni salīdzinājumā ar Eirokodos noteikto drošuma līmeni un ļauj kvantitatīvi monitorēt dažādu ēku kopējo drošuma līmeni.

Promocijas darba gaitā veikti pētījumi arī par publisko ēku stāvokli Latvijā un esošo būvju vērtēšanas praksi Eiropā.

Secinājumi:

1. Izstrādātā kvalitatīvā riska klasificēšanas metode padara iespējamu masveidā indikatīvi novērtēt ēku tehnisko stāvokli, balstoties vizuālajā novērtēšanā, kā arī operatīvi informēt sabiedrību un kontrolējošās institūcijas par riskiem saistībā ar ēku drošību.
2. Pētījumā par publisko ēku stāvokli Latvijā 2016. gadā nav atrasta korelācija starp apsekojamo ēku skaitu konkrētā kategorijā un vērtējuma rezultātu skaitu diapazonā 2-3 (konstatētas būtiskas atkāpes no drošuma prasībām), tādējādi secināts, ka ēkas tehnisko stāvokļu sadalījumu ietekmē konkrētās konstrukcijas veids un lietojuma nozīme, nevis apstrādājamo datu kopas apjoms.
3. Pētījumā par esošo būvju vērtēšanas praksi Eiropā secināts, ka nepastāv vienota metodoloģija attiecībā uz ekspluatācijā esošu būvju drošumu un tā vērtēšanu, tomēr vienlaikus visās valstīs drošums kā kritērijs tiek normatīvi regulēts būvju ekspluatācijā, tomēr ar atšķirīgu vērtēšanu un rezultātu interpretāciju.
4. Izstrādātā jaunā metode, elementu drošuma indeksa β atrašanai, piemērota ekspluatācijā esošo elementu drošuma novērtēšanai konkrētiem objektiem, kā arī vispārēji dažādu būvnormatīvu sistēmu drošuma līmeņu salīdzināšanai, neizmantojot darbietilpīgo un sarežģīto FORM simulāciju metodi. Izmantojot izstrādāto metodi, atrasts, ka pētījuma gaitā analizēto konstrukcijas elementu drošuma indekss β ekspluatācijā esošajām jumta pārseguma konstrukcijām atkarībā no spriegumstāvokļa svārstās robežās no 2,5 līdz 2,8 Liepājā un no 3,2 līdz 3,5 Rīgā. Tāpēc tiek rekomendēts pievērst pastiprinātu uzmanību elementiem, kuru noslodze saskaņā ar SNIp normatīvu sistēmu tuvojas 100%. Pastāv risks, ka šādu elementu sabrukuma varbūtība ir neatbilstoša mūsdienu drošuma prasībām Eiropā.
5. Izstrādātajā metodē kopējā drošuma līmeņa izmaiņu kvantitatīvam novērtējumam, jaunievestie parametri - globālais ēkas drošuma indekss A un relatīvais globālais ēkas

drošuma indekss A_{GRI} , raksturo jaunu vai ekspluatācijā esošu ēku konstrukciju vispārējo drošuma līmeni, un ļauj kvantitatīvi salīdzināt dažādu ēku kopējo tehnisko stāvokli. Atšķirībā no pieejamām metodēm, kas balstītas varbūtību teorijā un sistēmās, kopējā drošuma līmeņa raksturošanai, izstrādātā metode ir mazāk darbietilpīga un nav nepieciešamas speciāla kvalifikācija matemātiskajā modelēšanā, tādējādi piemērota praktiskai lietošanai ēku inženiertehniskās apsekošanas posmā. Noskaidrots, ka globālā drošuma indeksa Λ vērtība ir jutīgāka individuālo drošuma indeksu β normālsadalījuma standartnovirzes diapazonā no 0 līdz 2, kas sakrīt ar iespējamiem bojājumu sadalījumiem reālajās ēkās. Latvijā raksturīgajām ekspluatācijā esošām rūpnieciskām ēkām, kas projektētas PSRS laikos (seku klase CC2), kuru elementu drošuma līmeņu sadalījums ir līdzīgs normālsadalījumam ar standartnovirzi 0,5, iegūtais globālais drošuma indekss var būt robežās no 2,79 līdz 3,68.

6. Izstrādāta jauna metode nosacīto svara koeficientu noteikšanai. Šie koeficienti ievērtē katra atsevišķā konstruktīvā elementa sasaisti un nozīmi kopējā konstruktīvajā sistēmā mehāniskās izturības un stabilitātes nodrošināšanā. Saskaņā ar izstrādāto metodi piedāvāti nosacīto svara koeficientu diapazoni daudzstāva karkasa ēku elementiem ēkās ar regulāru kolonu tīklu. Izmantojot statisko klasterizācijas metodi secināts, ka šādu ēku konstruktīvos elementus var iedalīt četrās klasēs.
7. Promocijas darbā izstrādātās metodoloģijas praktiskā lietojuma rezultāti uzrāda, ka ekspluatācijā esošās ēkas relatīvais drošuma samazinājums ir $A_{GRI} = 20,2 \%$. Salīdzinot šo rezultātu arī šīs pašas ēkas drošuma līmeni, izmantojot FORM un SORM simulāciju metodes, ir verificēts, ka piedāvātā jaunā metode nodrošina ekvivalentu drošuma novērtējuma līmeni. Verifikācijas rezultāti pirmajā tuvinājumā (FORM) uzrāda drošuma līmeņa samazinājumu robežās 28,95-46,34%, bet otrajā tuvinājumā (SORM) drošuma līmeņa samazinājums ir robežās no 16,43-26,7%. Savukārt pieņemot noteiktu korelāciju starp konstrukciju elementiem, pat pie vislielākās robežstāvokļu izkliedes drošuma līmeņa samazinājums otrajā tuvinājumā (SORM) ir robežās no 19,43-24,26%.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA

1. Commission staff working document impact assessment, Proposal for a directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings. European Commission, Brussels (2016).
2. Luechinger, P., Fischer, J.: New European Technical Rules for the assessment and retrofitting of existing structures. European Commission, Joint Research Centre, Institute for the Protection and Security of the Citizen, Luxembourg (2015).
3. Saheb, Y.: Energy Transition of the EU Building Stock. OpenExp. (2016).
4. Ministru kabineta 2014. gada 2. septembra noteikumi Nr. 529 "Ēku būvnoteikumi". Latvijas Vēstnesis, 194 (2014).
5. Regulation (EU) No 305/2011 of the European Parliament and of the Council of 9 March 2011 laying down harmonised conditions for the marketing of construction products and repealing Council Directive 89/106/EEC. Official Journal of the European Union. 88, 5–43 (2011).
6. Ministru kabineta 2021. gada 19. oktobra noteikumi Nr. 693 "Būvju vispārīgo prasību būvnormatīvs LBN 200-21". Latvijas Vēstnesis, 204 (2021).
7. CEN/TC/250/WG2 Assessment and retrofitting of existing structures, FprCEN/TS17440 (2020).
8. Haldar, A., Mahadevan, S.: Probability, Reliability, and Statistical Methods in Engineering Design. Jhon Wiley & Sons, USA (1999).
9. Перельмутер, А.: Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций. Издательство Ассоциации строительных вузов, Москва (2007). A.V.Perelmuter, Izbrannyje problemy nadezhnasti i bezopasnosti stroitelnykh konstrukcii, Moskva, Russia, gads, 2007).
10. Перельмутер, А.В., Пичугин, С.Ф.: Об оценке уязвимости строительных конструкций. Инженерно-строительный журнал. 49, 5–14 (2014). <https://doi.org/10.5862/MCE.49.1>.
11. Wang, C., Structural Reliability and Time-Dependent Reliability, USA (2021).
12. Dan M.Frangopol, Mitsu Kawatani, Chul-woo Kim., Reliability and Optimization of Structural Systems, USA, Japan, (2006).
13. Sørensen, J.D.: Notes in Structural Reliability Theory And Risk Analysis. Aalborg University, Aalborg (2004).
14. Schneider, J.: Introduction to Safety and Reliability of Structures, International Association for Bridge and Structural Engineering, Second Edition. IABSE, Zurich (2006).
15. Holicky, M., Návarová, M., Gottfried, R., Kronika, M., Marková, J., Sýkora, M., Jung, K.: Basics for assessment of existing structures. Klokner Institute, Czech Technical University in Prague, České Budějovice and Prague, (2013)
16. Melchers, R.E., Beck, A.T.: Structural Reliability Analysis and prediction, 3rd edition. John Wiley & Sons, Hoboken (2018).
17. Yan Gang Zhao, Zha Hui Lu: Structural Reliability. Approaches from Perspectives of Statistical Moments, China (2020)

18. Lemaire, M., Chateauneuf, A., Mitteau, J.-C.: Structural reliability. John Wiley & Sons, Hoboken (2009).
19. R. Ranganathan: Structural Reliability Analysis and Design, Indija, (1999)
20. S. Chandrasekaranm: Offshore Structural Engineering. Reliability and risk assessment, Indija, (2016)
21. Srinivasan Gopalakrishnan, Massimo Ruzzene, Sathyanarayana Hanagud,: Computational Techniques for Structural Health Monitoring, Springer Series in Reliability Engineering, Springer-Verlag London Limited 2011, DOI 10.1007/978-0-85729-284-1
22. Thoft-Christensen, P., Murotsu, Y.: Application of Structural Systems Reliability Theory. (1986). <https://doi.org/10.1007/978-3-642-82764-8>.
23. Райзер В.Д. Теория надежности сооружений. Научное издание. - М.: Издательство АСВ, 2010
24. ISO 2394 General principles on reliability for structures. (2015).
25. ISO 13822 Basis for design of structures – Assessment of existing structures. (2010).
26. Arquier, M., Cespedes, X.: Limit analysis for civil engineering structures. In: IABSE Conference, Geneva 2015: Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges - Report (2015). <https://doi.org/10.2749/222137815818358376>.
27. Diamantidis, D., Holicky M., Innovative methods for the assessment of existing structures., Czech Technical University in Prague, Klokner Institute, Czech Republic, ISBN: 978-80-01-05115-3, 2012
28. Radhika, B., Manohar, C.S.: Reliability models for existing structures based on dynamic state estimation and data based asymptotic extreme value analysis. Probabilistic Eng. Mech. **25**, 393–405 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.pro bengmech.2010.05.001>.
29. Nadolski, V., Sykora, M.: Model uncertainties in resistances of steel members. In: Safety and Reliability of Complex Engineered Systems. 4189–4195 (2015). <https://doi.org/10.1201/b19094-548>.
30. Sykora M., Holicky, M., Assessment of Uncertainties in Mechanical Models, Applied Mechanics and Materials Vol 378 (2013) pp 13-18, 2013, www.ttp.net. (ID: 130.216.129.208, University of Auckland, Auckland, New Zealand-11/06/15,05:46:35)
31. Barone, G., Frangopol, D.M.: Reliability, risk and lifetime distributions as performance indicators for life-cycle maintenance of deteriorating structures. Reliab. Eng. Syst. Saf. **123**, 21–37 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.res.2013.09.013>.
32. Nadolski, V., Tur, V.: A first attempt to determine the partial factors according to Eurocodes for the verification of ULS of steel elements for conditions of the Republic of Belarus. J. Sustain. Archit. Civ. Eng. **14** (2016). <https://doi.org/10.5755/j01.sace.14.1.15066>
33. Li, Q., Ellingwood, B.R.: Damage inspection and vulnerability analysis of existing buildings with steel moment-resisting frames. Eng. Struct. **30**, 338–351 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.03.018>
34. Zhang, H., Dai, H., Beer, M., Wang, W.: Structural reliability analysis on the basis of small samples: An interval quasi-Monte Carlo method. Mech. Syst. Signal Process. **37**, 137–151 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2012.03.001>.

35. Kudzys, A., Lukoševičienė, O.: Conventional stochastic sequences in reliability assessments and predictions of structural members. In: *Procedia Engineering*, **57**, 642 – 650 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.081>.
36. He, J., Gao, S., Gong, J.: A sparse grid stochastic collocation method for structural reliability analysis. *Struct. Saf.* **51**, 29–34 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2014.06.003>.
37. Tanner, P., Hingorani, R.: Risk-based models and requirements for building structures with high failure consequences. In: *IABSE Conference, Geneva 2015: Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges - Report* (2015). <https://doi.org/10.2749/222137815818358051>
38. Sakka, Z., Assakkaf, I., Al-Yaqoub T., Parol, J.: Structural Reliability of Existing Structures: A Case Study. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering* Vol:8, No:11, 2014
39. Holický, M., Diamantidis, D., Sykora, M.: Determination of target safety for structures. In: *12th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, ICASP 2015* (2015).
40. Gulvanessian, H., Holický, M.: Designer's handbook to Eurocode 1. Part 1: Basis of design. Great Britain: Bookcraft (Bath) Ltd, (1996).
41. Scholten, N. P. M., Vrouwenvelder, A. C. W. M.: Eurocodes and the structural safety of existing buildings - Considering the publication of the Dutch NEN 8700. in *COBRA 2009 - Construction and Building Research Conference of the Royal Institution of Chartered Surveyors*. 1136–1146 (2009)
42. Madsen, H.O.: Managing structural safety and reliability in adaptation to climate change. In: *Safety, Reliability, Risk and Life-Cycle Performance of Structures and Infrastructures - Proceedings of the 11th International Conference on Structural Safety and Reliability, ICOSSAR 2013* (2013). <https://doi.org/10.1201/b16387-8>.
43. Steenbergen Raphaël D. J. M., Sykora, M., Diamantidis, D., Holický, M., Vrouwenvelder, T., Target reliability levels for assessment of existing structures based on economic optimization and human safety criteria, *Structural Concrete* 2015: Nr. 022, DOI: 10.1002/suco.201500022
44. Sykora, M., Holický, M., Jung, K., Diamantidis, D.: Target reliability levels for assessment of existing structures considering economic and societal aspects. In: *Life-Cycle of Structural Systems: Design, Assessment, Maintenance and Management - Proceedings of the 4th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, IALCCE 2014* (2015). <https://doi.org/10.1201/b17618-121>
45. Hellebrandt, L., Steenbergen, R., Vrouwenvelder, T., Blom, K.: Structural reliability of existing city bridges. In: *IABSE Conference, Geneva 2015: Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges – Report*. 1064–1071 (2015). <https://doi.org/10.2749/222137815818358277>
46. Wahab, S.N.A., Hamid, M.Y.: A review factors affecting building defects of structural steel construction. Case study: Student accommodation in UiTM Perak. In: *Procedia Engineering*, **20**, 174–179 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.153>.

47. El Hajj Chehade, F., Younes R.: Structural reliability software and calculation tools: a review - Innovative Infrastructure Solutions (2020), <https://doi.org/10.1007/s41062-020-0282-4>; (par softiem)
48. Micic, T.: Risk perception vs. Risk reality. In: Safety, Reliability, Risk and Life-Cycle Performance of Structures and Infrastructures - Proceedings of the 11th International Conference on Structural Safety and Reliability, ICOSSAR 2013 (2013). <https://doi.org/10.1201/b16387-12>.
49. Stewart M. G.; Melchers R .E.: Probabilistic Risk Assessment of Engineering Systems, Chapman & Hall, London, 1996
50. Diamantidis, D., Holický, M., Sýkora, M.: Reliability and Risk Acceptance Criteria for Civil Engineering Structures. Trans. VŠB – Tech. Univ. Ostrava, Civ. Eng. Ser. **16**, 1–10 (2016). <https://doi.org/10.1515/tvsb-2016-0008>
51. Starr, C.: Social benefit versus technological risk. Science. **165**, 1232–1238 (1969). <https://doi.org/10.1126/science.165.3899.1232>.
52. Sýkora, M., Holický, M., Marková, J.: Advanced assessment of industrial heritage buildings for sustainable cities' development. In: Proceedings: CESB 2010 Prague - Central Europe towards Sustainable Building "From Theory to Practice" 1–8 (2010).
53. Elsorady, D.A.: Assessment of the compatibility of new uses for heritage buildings: The example of Alexandria National Museum, Alexandria, Egypt. J. Cult. Herit. **15**, 511–521 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.culher.2013.10.011>
54. Sykor, M., Holicky, M., Jung, K., Diamantidis, D., Human Safety Criteria for Risk-based Structural Design, M. Sykora, et al., Int. J. of Safety and Security Eng., Vol. 8, No. 2 (2018) 287–298, DOI: 10.2495/SAFE-V8-N2-287-298
55. Del Grosso, A.E.: SHM of civil structures: Expectations and perspectives. In: Safety, Reliability, Risk and Life-Cycle Performance of Structures and Infrastructures - Proceedings of the 11th International Conference on Structural Safety and Reliability, ICOSSAR 2013 (2013).
56. Ministru kabineta 2021. gada 15. jūnija noteikumi Nr. 384 "Būvju tehniskās apsekošanas būvnormatīvs LBN 405-21". Latvijas Vēstnesis, 122 (2021).
57. Rücker, W., Hille, F., Rohrmann, R.: F08a Guideline for the Assessment of Existing Structures. Federal Institute of Materials Research and Testing (BAM). Samco, Berlin (2006).
58. Partial factor methods for existing concrete structures. Recommendations. The International Federation for Structural Concrete (fib) Bulletin. No. 80, 2016
59. Jalayer F., Elefante L., Iervolino I. and Manfredi G: Simple Methods for Calculating the Structural Reliability for Different Knowledge Levels, Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università di Napoli, 2009
60. Rehman, S.K., Ibrahim,Z.. Memon, S.A.,Jameel, M., Nondestructive test methods for concrete bridges: A review;, Construction and Building Materials 107 (2016) 58–86, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.011>
61. Castellazzi, G., D’Altri A.M., Miranda, S., Ubertini, F., An innovative numerical modeling strategy for the structural analysis of historical monumental buildings, Engineering Structures 132 (2017) 229–248, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.11.032>

62. Kühn, B., Assessment of existing steel structures - Recommendations for estimation of the remaining fatigue life, *Procedia Engineering* 66 (2013) 3 – 11, doi: 10.1016/j.proeng.2013.12.057
63. Feio, A., Machado, J.S.: In-situ assessment of timber structural members: Combining information from visual strength grading and NDT/SDT methods - A review. *Constr. Build. Mater.* **101**, 1157–1165 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.123>.
64. Kilic, G., Using advanced NDT for historic buildings: Towards an integrated multidisciplinary health assessment strategy, *Journal of Cultural Heritage* 16 (2015) 526–535, <http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2014.09.010>
65. LVS EN 1990:2003 Eurocodekss - Konstrukciju projektēšanas pamatprincipi
66. Zhang, H., Mullen, R.L., Muhanna, R.L.: Interval Monte Carlo methods for structural reliability. *Struct. Saf.* **32**, 183–190 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2010.01.001>.
67. Koteš, P., Vičan, J.: Reliability levels for existing bridges evaluation according to Eurocodes. In: *Procedia Engineering*. **40**, 211–216 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.082>.
68. Sykora, M., Holicky, M., Lenner, R., Mañas, P.: Target reliability levels for existing bridges considering emergency and crisis situations. *Adv. Mil. Technol.* **9**, 45–57 (2014).
69. Ma, Y.S., Wang, Y.F.: Creep influence on structural dynamic reliability. *Eng. Struct.* **99**, 1–8 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.04.018>.
70. Bujnak, J., Gocal, J., Hlinka, R.: Assessment of railway steel bridge structures, 9th International conference. *Procedia Engineering*. **156**, 75–82 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.270>.
71. Martin, A.: Bridges, sustainability and the structural engineer. In: IABSE Conference, Geneva 2015: Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges - Report (2015). <https://doi.org/10.2749/222137815818356873>.
72. Nilimaa, J., Häggström, J., Blanksvärd, T., Täljsten, B., Elfgren, L., Tu, Y., Carolin, A., Paulsson, B.: Extend the life of existing railway bridges - Results from EU FP7 project MAINLINE. In: IABSE Conference, Geneva 2015: Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges - Report (2015). <https://doi.org/10.2749/222137815818358493>.
73. Quality specifications for roadway bridges, standardization at a European level (Bridgespec) – Performance Indicators (Conference: fib Symposium 2016, At: Cape Town, South Africa
74. Druķis, P., Gaile, L., Pakrašiņš, L.: **Inspection of Public Buildings Based on Risk Assessment.** In: *Procedia Engineering*. **172**, 247–255 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.106>.
75. Nadolskiy, V.V., Sykora, M., Holicky, M.: Comparison of reliability levels provided by the eurocodes and standards of the Republic of Belarus. *Vestn. MGSU*. 7–21 (2013).
76. Rózsás, Á., Sýkora, M.: Effect of statistical uncertainties in ground snow load on structural reliability. In: IABSE Conference, Geneva 2015: Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges - Report (2015). <https://doi.org/10.2749/222137815818357142>.

77. LVS EN 1991-1:2003 1.Eirokodekss - Iedarbes uz konstrukcijām. 1-1.daļa: Vispārīgās iedarbes. Blīvums, pašsvars, ēku ekspluatācijas slodzes
78. SNIP 2.01.07-85 Building regulations. Loads and actions. USSR State Building. 1987
79. Catalog of building constructions of Latvia SSR, LSSR State Building, 1968
80. Druķis, P., Gaile, L., Goremikins, V.: **Case study of structural reliability of existing building.** In: Vide. Tehnologija. Resursi - Environment, Technology, Resources. **3**, 47–52 (2017). <https://doi.org/10.17770/etr2017vol3.2615>.
81. Druķis, P., Gaile, L., Valtere, K., Pakrastiņš, L., Goremikins, V.: **Study of structural reliability of existing concrete structures.** In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. **251**, (2017). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/251/1/012087>.
82. LVS EN 1998-3:2005 8. Eirokodekss - Seismiski izturīgu konstrukciju projektēšana - 3.daļa: Ēku novērtēšana un rekonstrukcija
83. Druķis, P., Gaile, L., Goremikins, V.: **Structural reliability assessment of existing precast concrete building. Case study.** In: The proceedings of the 13th international conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques” (MBMST 2019) (2019). <https://doi.org/10.3846/mbmst.2019.015>;