



RĪGAS TEHNISKĀ
UNIVERSITĀTE

Ilze Paeglīte

**KUSTĪGĀS SLODZES DINAMISKĀS IEDARBES
UZ AUTOCEĻU TILTIEM EKSPERIMENTĀLA
IZPĒTE UN NOVĒRTĒJUMS**

Promocijas darba kopsavilkums

**EXPERIMENTAL RESEARCH AND ASSESSMENT
OF THE MOVING LOAD DYNAMIC EFFECT
ON THE HIGHWAY BRIDGE PERFORMANCE**

Summary of the Doctoral Thesis



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Būvniecības inženierzinātņu fakultāte
Transportbūvju institūts

RIGA TECHNICAL UNIVERSITY
Faculty of Civil Engineering
Institute of Transportation Engineering

Ilze Paeglīte

Doktora studiju programmas “Būvzinātne” doktorante
Doctoral student of the Study programme “Civil Engineering”

**KUSTĪGAS SLODZES DINAMISKĀS IEDARBES UZ
AUTOCEĻU TILTIEM EKSPERIMENTĀLA IZPĒTE UN
NOVĒRTĒJUMS**
Promocijas darba kopsavilkums

**EXPERIMENTAL RESEARCH AND ASSESSMENT
OF THE MOVING LOAD DYNAMIC EFFECT ON THE
HIGHWAY BRIDGE PERFORMANCE**
Summary of the Doctoral Thesis

Zinātniskais vadītājs
Dr. sc. ing. profesors
JURIS SMIRNOVS

Scientific supervisor
Professor *Dr. sc. ing.*
JURIS SMIRNOVS

RTU Izdevniecība / RTU Press
Rīga 2021 / Riga 2021

Paeglīte I. Kustīgās slodzes dinamiskās iedarbes uz autoceļu tiltiem eksperimentāla izpēte un novērtējums. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2021. 122 lpp.

Paeglite I. Experimental Research and Assessment of the Moving Load Dynamic Effect on the Highway Bridge Performance. Summary of The Doctoral Thesis. Riga: RTU Press, 2021. 122 p.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes "RTU P-06" 2021. gada 10. septembra lēmumu, protolols Nr. L1 (P2).

Published in accordance with the decision of the Promotion Council "RTU P-06" of 10 September 2021, Minutes No. L1 (P2).

Atbalsts promocijas darba izstrādē

- Darbs izstrādāts ar valsts pētījumu programmas "Inovātīvi materiāli un viedās tehnoloģijas vides drošumam (IMATEH)" (3. projekts "Risku ievērtēšana drošām, efektīvām un ilgtspējīgām būvēm") finansējumu.
- RTU doktorantūras pētniecības grants 2015./2016. studiju gadā.

The research was developed with the support of:

- National Research Programme "Innovative Materials and Smart Technologies for Environmental Safety (IMATEH)" project "Risk consideration for safe, effective and sustainable structures";
- RTU PhD student research grant 2015/2016.



<https://doi.org/10.7250/9789934227028>
ISBN 978-9934-22-702-8 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2021. gada 10. decembrī plkst. 14 tiešsaistē Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības inženierzinātņu fakultātē.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Algirdas Juozapaitis,
Viļņas Ģedimina tehniskā universitāte, Lietuva

Profesors *Dr. sc. ing.* Darius Bačinskas,
Viļņas Ģedimina tehniskā universitāte, Lietuva

Profesors *Dr. sc. ing.* Dmitrijs Serdjuks,
Rīgas Tehniskā universitāte

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājusi šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātņu doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Ilze Paeglīte (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, piecas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 81 attēls, 27 tabulas, viens pielikums, kopā 148 lappuses, ieskaitot pielikumu. Literatūras sarakstā ir 105 nosaukumi.

**DOCTORAL THESIS PROPOSED
TO RIGA TECHNICAL UNIVERSITY FOR THE PROMOTION
TO THE SCIENTIFIC DEGREE OF DOCTOR OF SCIENCE**

To be granted the scientific degree of Doctor of Science (Ph. D), the present Doctoral Thesis has been submitted for the defence at the open meeting of RTU Promotion Council on 10th December 2021 at 14:00 online.

OFFICIAL REVIEWERS:

Professor Dr. Sc. Ing. Algirdas Juozapaitis
Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania

Professor Dr. Sc. Ing. Darius Bačinskas
Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania

Professor Dr. Sc. Ing. Dmitrijs Serdjuks
Riga Technical University

DECLARATION OF ACADEMIC INTEGRITY

I hereby declare that the Doctoral Thesis submitted for review to Riga Technical University for the promotion to the scientific degree of Doctor of Science (Ph. D) is my own. I confirm that this Doctoral Thesis had not been submitted to any other university for the promotion to a scientific degree.

Ilze Paeglīte (signature)

Datums:

The Doctoral Thesis has been written in Latvian. It consists of Introduction, 5 Chapters, Conclusion; 81 figures; 27 tables; one appendix; the total number of pages 148. The Bibliography contains 105 titles.

SATURS

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS	7
Tēmas aktualitāte	7
Darba mērķis	9
Pētījuma uzdevumi	9
Darba zinātniskā novitāte	10
Darba praktiskā vērtība	10
Pētījuma ierobežojumi un lietojuma robežas	11
Pētījumā izmantotās iekārtas un metodes	11
Pētījumā izmantotā aparātūra	11
Darba uzbūve	12
Darba aprobācija un publikācijas	13
Publikācijas	13
Konferences	14
1. LITERATŪRAS APSKATS	16
1.1. Dinamiskās iedarbes raksturojošie parametri	17
1.2. Autotransporta slodzes radīto svārstību tilta konstrukcijā eksperimentālas noteikšanas metožu apskats	21
1.3. Iekārtas un instrumenti mērījumu veikšanai	22
1.4. Dinamiskās slodzes ievērtējums slodžu aprēķina modeļi	25
1.5. Standarts tilta pārbaudei ar dinamisku slodzi Latvijā	28
2. METODIKA TILTA PĀRBAUDEI AR DINAMISKU SLODZI	29
3. TILTU DINAMISKĀS VEIKTSPĒJAS NOVĒRTĒŠANAS METODE	34
3.1. Eksperimentāli iegūto dzelzsbetona tiltu dinamisko raksturlielumu analīze	35
3.1.1. Slodzes dinamiskās iedarbes ietekmējošie faktori	39
3.2. Tiltu dinamiskās veiktspējas novērtēšanas metode – dinamiskuma indekss (DI)	44
3.2.1. Dzelzsbetona plātnes tilti	47
3.2.2. Saspriegtas dzelzsbetona plātnes	49
3.2.3. Saspriegtas konstrukcijas ribotu plātņu tilti	50
4. SIJU TILTU PIEĻAUJAMIE DINAMISKIE KOEFICIENTI	53
5. REKOMENDĀCIJAS DINAMISKO RAKSTUROJUMU VĒRTĪBU IEKĻAUŠANAI LVS 190-11 “TILTU INSPEKCIJA UN PĀRBAUDE AR SLODZI”	57
Papildinājumi 7.3. nodaļā	57
Papildinājumi 7.4. nodaļā	58
SECINĀJUMI	59

GENERAL DESCRIPTION OF THE THESIS	61
Importance of the topic	61
Objective of the study	63
Tasks of the Thesis	63
Theses to be defended	64
Scientific novelty	64
Practical application of the Thesis	65
Limitations of the research	65
Equipment and methods used	65
Equipment used in the study	66
Structure and volume of the Doctoral Thesis	66
Approbation of the results and publications	67
1. LITERATURE REVIEW	70
1.1. Characteristic parameters of dynamic performance	71
1.2. Overview of experimental methods for detection of the vehicle induced variations in the bridge	75
1.3. Equipment and measuring devices	76
1.4. Dynamic load in design load model	79
1.5. Standard for dynamic bridge load testing in Latvia	81
2. METHODOLOGY FOR DYNAMIC LOAD TESTING	83
3. METHOD OF DYNAMIC BRIDGE PERFORMANCE ASSESSMENT	89
3.1. Analysis of experimentally obtained dynamic characteristics of concrete bridges	90
3.1.1. Factors affecting the dynamic load	94
3.2. Bridge dynamic performance evaluation method – dynamic index (DI)	98
3.2.1. Reinforced concrete slab bridges	102
3.2.2. Prestressed reinforced concrete slabs	104
3.2.3. Prestressed concrete ribbed slab bridges	105
4. PERMISSIBLE DYNAMIC AMPLIFICATION FACTORS FOR BEAM BRIDGES	108
5. RECOMMENDATIONS FOR SUPPLEMENTING <i>LVS 190-11</i> “BRIDGE INSPECTION AND LOAD TESTING”	112
CONCLUSIONS	114
LITERATŪRAS SARAKSTS/LIST OF REFERENCES	116

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Tiltu dinamisko īpašību izpēte un izpētes metožu pilnveidošana ir svarīgs faktors tiltu veiktspējas, stabilitātes un kalpošanas laika analīzei. Pēdējos gados uz Latvijas autoceļiem strauji pieaug kravas transportlīdzekļu skaits. To efektivitātes palielināšanai tiek ražoti arvien garāki un smagāki transportlīdzekļi. Eiropas Savienības 1996. gada direktīva 96/53/EC (ES, 1996) nosaka pieļaujamo auto transportlīdzekļu garumu un kopējo svaru: autovilciena maksimālais garums nedrīkst pārsniegt 18,75 m, platums 2,55 m; autovilciena trīsasus mehāniskā transportlīdzekļa ar trīsasus piekabi svars nedrīkst pārsniegt 40 t, izņemot ISO 40 pēdu konteineravedējs – 44 t. Direktīvas 4. pants ļauj dalībvalstu teritorijā izmantot garākus autovilcienu sastāvus, ja tiek izmantota modulārā pārvadājumu sistēma. Šo punktu izmanto daudzas valstis, lai attīstītu augstas kravnesības transportlīdzekļu izmantošanu kravu pārvadāšanā. Piemēram, Zviedrijā drīkst izmantot līdz 25,25 m garus un līdz 60 t smagus transportlīdzekļus, savukārt Somijā – līdz 76 t smagus 9 asu modulāros transportlīdzekļus. Augstas kravnesības transportlīdzekļu izmantošana Skandināvijas valstīs galvenokārt saistīta ar šo valstu vēlmi samazināt kaitīgo izmešu daudzumu atmosfērā. Taču, palielinoties transportlīdzekļu garumam un masai, tilti ar palielinātu dinamisko raksturojumu vērtībām tiek pakļauti palielinātām dinamiskām slodzēm, tā paātrinot to bojājumu attīstību un radot riskus nestspējas samazinājumam.

Eirokodeksa *LVS EN 1991* 2. daļā “Satiksmes slodzes tiltiem” ir dotas normatīvās aprēķinu slodzes, kurās ir ietverti slodzes dinamiskie efekti. Eurokodeksi ir paredzēti jaunu tiltu konstrukciju projektēšanai. Tajā pašā laikā Latvijā ekspluatēto tiltu struktūra rāda, ka no 971 tilta, kas atrodas VSIA “Latvijas Valsts ceļi” aprūpē, 51 % ir būvēti pirms vairāk nekā 50 gadiem, 70 % – pirms vairāk nekā 40 gadiem un 82 % – pirms vairāk nekā 30 gadiem. Arī lielākā daļa no pilsētās ekspluatētajiem tiltiem ir būvēti pirms vairāk nekā 40 gadiem. VSIA “Latvijas Valsts ceļi” tiltu uzturēšanas sistēmas *Lat-BRUTUS* dati liecina, ka 59 % no visiem tiltiem ir konstatēti dažādas

pakāpes bojājumi, kas radušies agresīvas ārējās vides un pieaugošās satiksmes slodzes ietekmes rezultātā, var samazināt tiltu kalpošanas laiku un palielināt riskus satiksmes drošībai.

Satiksmes slodzes dinamiskais palielinājums ir cieši saistīts ar tilta klāja līdzenumu un transportlīdzekļu pārvietošanās ātrumu un masu. Plaisas un bedres ceļa segā rada papildu vibrācijas un piepūles tilta laiduma konstrukcijā, kas nav ņemtas vērā tiltu projektēšanas laikā. Eirokodeks nenosaka, kā novērtēt ekspluatācijā esošu tiltu dinamiskos raksturojumus, un nedod pieļaujamās vai nepieļaujamās šo raksturojumu vērtības.

Tiltu dinamisko īpašību izpētei un dinamisko slodžu iedarbes novērtēšanai ir veltīti vairāki plaši pētījumi Eiropā un citur pasaulē. Pētījumā "SAMARIS", kas veikts 5. ietvarprogrammā, konstatēts, ka, palielinoties smagsvara transportlīdzekļu īpatsvaram uz Eiropas autoceļiem, ir palielinājusies dinamiskā koeficienta vērtība, salīdzinot ar būvnormatīvos norādīto. Pētījumā analizēti tiltu pārbaužu ar dinamisku slodzi rezultāti, un tie salīdzināti ar teorētiskos modeļos iegūtajiem datiem. Tomēr pētījuma secinājumos nav sniegtas rekomendācijas, kā novērtēt iegūtos rezultātus.

Arī pētījumā "ARCHES", kas veikts, realizējot 6. ietvarprogrammas projektu un kurā apkopota informācija par dažādu valstu pieejām tiltu dinamisko īpašību pētīšanā, kā arī ņemot vērā atziņas, kas iegūtas promocijas darba 1. nodaļā dotajā literatūras apskatā, var konstatēt, ka nav izvērtēti tiltu dinamiskie raksturojumi un nav dots to ietekmes novērtējums vai to rekomendējamās vērtības dažādu konstrukciju tiltiem. Lielākā daļa no pētījumos ietvertajiem tiltiem ir jaunbūves, tādēļ nav plaši pētīti ekspluatācijā esošo vai rekonstruētu tiltu dinamiskie raksturojumi.

Latvijā 93 % no visiem tiltiem ir dzelzsbetona un spriegbetona, 5 % – tērauda, 2 % – mūra un koka. Apskatot tiltus pēc konstrukcijas veida, var secināt, ka 69 % no Latvijā uzbūvētajiem tiltiem ir dzelzsbetona un spriegbetona sijas, 25 % ir dzelzsbetona spriegbetona plātņu tilti ar laidumiem līdz 30 metriem. Tādēļ lielākā uzmanība šajā pētījumā ir veltīta dzelzsbetona tiltu dinamisko īpašību pētīšanai.

Eirokodekss *LVS EN 1991* 2. daļa "Satiksmes slodzes tiltiem" neparedz dinamisko koeficientu vērtības autoceļu tiltiem, ko varētu izmantot ekspluatācijā esošu vai pārbūvētu tiltu nestspējas un

drošuma novērtēšanai, izmantojot faktisko slodžu vai pasūtītāja izvēlēto slodžu modeļus. Nevienā būvnormatīvā nav dotas metodes vai norādījumi, kā novērtēt eksperimentāli iegūtu tiltu dinamiskos raksturojumus un tiltu dinamisko veiktspēju, kas raksturo tilta reakciju dinamiskās slodzes iedarbībā un to, vai tilta reakcija uz dinamisko slodzi var radīt tilta nestspējas samazinājumu. Tādēļ ir nepieciešams izstrādāt metodi tiltu konstrukcijas dinamiskās veiktspējas novērtēšanai, tā palielinot tiltu drošumu un kalpošanas laiku.

Darba mērķis

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt metodi tilta konstrukcijas dinamiskās veiktspējas novērtēšanai, izmantojot autoceļu tiltu pārbaudēs ar kustīgu slodzi eksperimentāli iegūtos dinamisko raksturlielumu datus, izmantojot negraujošas svārstību analīzes un datorizētas datu nolasīšanas un apstrādes metodes un ņemot vērā tilta brauktuves virsmas līdzenumu.

Pētījuma uzdevumi

Lai sasniegtu definēto mērķi, darbā ir jāatrisina vairāki uzdevumi.

1. Izstrādāt metodiku tilta pārbaudei ar kustīgu slodzi, kas ļautu noteikt tilta dinamiskos parametrus, ņemot vērā kustīgās slodzes veidu, tilta laiduma konstrukcijas tipu, statisko shēmu un brauktuves virsmas līdzenuma raksturojumus.
2. Veikt pārbaudēs ar kustīgu slodzi noteikto dinamiskās iedarbes raksturojošo parametru analīzi dažāda tipa dzelzsbetona autoceļu tiltu laiduma konstrukcijām.
3. Pamatojoties uz analīzes rezultātiem, noteikt tilta laiduma konstrukcijas dinamisko raksturlielumu rekomendējamās robežvērtības, ņemot vērā tilta konstrukcijas tipu, to statiskās shēmas un brauktuves virsmas līdzenumu.
4. Izstrādāt tilta dinamiskās veiktspējas novērtēšanas metodi bez nepieciešamības veikt tilta pārbaudi ar kustīgu slodzi.
5. Izstrādāt rekomendācijas Latvijas valsts standarta *LVS 190-11* "Tiltu inspekcija un pārbaude ar slodzi" papildināšanai ar:
 - a) konkrētām prasībām tilta pārbaudei ar dinamisku slodzi;

- b) pārbaudēs ar dinamisku slodzi laikā iegūto dinamisko parametru vērtību novērtēšanas kritērijiem.

Aizstāvēšanai izvirzītās tēzes

1. Izstrādātā tiltu pārbaudes ar dinamisku slodzi metodika ļauj noteikt tiltu dinamiskos parametrus konkrētai slodzei dažādiem tilta seguma līdzenuma apstākļiem.
2. Tiltu dinamisko parametru analīzes rezultātā noteiktas tiltu dinamisko parametru vērtības, kas liecina par paaugstinātu konstrukcijas dinamisko veiktspēju.
3. Izstrādātā tilta dinamiskuma indeksa noteikšanas metode ļauj novērtēt jau ekspluatācijā esošu un jaunu tiltu konstrukciju dinamiskās veiktspējas līmeni, ņemot vērā šādus tilta parametrus: laiduma garuma/augstuma attiecība; pašsvārstību frekvence; svārstību rimšanas koeficients; relatīvā vertikālā deformācija; starptautiskais seguma nelīdzenuma indekss *IRI*.

Darba zinātniskā novitāte

Izstrādāta dzelzsbetona un spriegbetona plātņu tiltu dinamisko parametru iegūšanas un novērtēšanas metodika pārbaudei ar dinamisku slodzi, ņemot vērā brauktuves seguma līdzenumu.

Izstrādāta dzelzsbetona un spriegbetona plātņu tiltu dinamiskās veiktspējas novērtēšanas metode – dinamiskuma indekss. Metode ļauj noteikt tilta dinamiskās veiktspējas līmeni, neveicot tilta pārbaudi ar kustīgu slodzi.

Noteiktas maksimāli pieļaujamās dinamiskā koeficienta vērtības tipveida spriegbetona un dzelzsbetona siju tiltiem, ko var izmantot ekspluatācijā esošu vai pārbūvētu dzelzsbetona siju tiltu konstrukciju drošuma novērtēšanai.

Darba praktiskā vērtība

Izstrādāta dzelzsbetona un spriegbetona plātņu tiltu dinamisko parametru iegūšanas un novērtēšanas metodika pārbaudei ar dinamisku slodzi, ņemot vērā dažādus brauktuves seguma apstākļus. Izstrādātās metodes praktiskā nozīme saistās ar

transporta infrastruktūras saglabāšanu un tās tehniskā stāvokļa novērtēšanu.

Dinamiskuma indeksa aprēķina metode ļauj novērtēt tilta dinamiskās veiktspējas līmeni, neveicot tilta pārbaudi ar kustīgu slodzi. Šo metodi var izmantot tiltu īpašnieki un uzturētāji, lai noteiktu, vai tilta nelīdzenais ceļa segums rada paaugstinātu dinamisko veiktspēju un ir nepieciešams pasūtīt tilta pārbaudi ar kustīgu slodzi.

Maksimāli pieļaujamās dinamiskā koeficienta vērtības tipveida spriegbetona un dzelzsbetona siju tiltiem, ko var izmantot ekspluatācijā esošu vai pārbūvētu dzelzsbetona siju tiltu konstrukciju drošuma novērtēšanai.

Latvijas valsts standarta *LVS 190-11* "Tiltu inspekcija un pārbaude ar slodzi" papildināšana ar konkrētām prasībām tiltu dinamiskās pārbaudes veikšanai un pārbaudē iegūto rezultātu novērtējumu ļaus precīzāk veikt tiltu pārbaudi ar dinamisku slodzi un interpretēt pārbaudēs iegūtos rezultātus.

Pētījuma ierobežojumi un lietojuma robežas

Pētījuma ierobežojumi balstīti uz pieejamo datu kopumu, kas izmantoti jaunās metodes izstrādē: dinamiskuma indeksa aprēķina metode paredzēta dzelzsbetona plātņu tiltiem, rāmjuveida spriegbetona plātņu un ribotu plātņu tiltiem ar laiduma garumu no 7 līdz 34 metriem.

Pētījumā izmantotās iekārtas un metodes

Promocijas darba pamatā ir jaunu dzelzsbetona un spriegbetona tiltu dinamisko rādītāju eksperimentāla noteikšana ar digitālajām mērījumu ierakstīšanas iekārtām. Pētījums balstīts uz kustīgās slodzes radīto konstrukcijas pārvietojumu un spriegumu izmaiņām un iegūto vibrogrammu analīzi.

Pētījumā izmantotā aparatūra

- Pārvietojumu mērījumi ar svārstību sensoru *Noptel PSM-200* (mērījumu biežums 50 Hz).

- Spriegumu mērījumi ar tenzometriem, kas saslēgti ar daudzkanālu sistēmu *SPIDER* mērījumu nolasīšanai (mērījumu biežums 50 Hz).
- Paātrinājumu mērījumi ar akselerometriem *X6-1a* (mērījumu biežums 50 Hz).
- Dators, kurā ierakstīti visi iegūtie digitālie mērījumi.

Iegūto datu apstrādei tika izmantota datorprogrammas *Microsoft Excel* (versijas 2003 un 2010), kā arī signālu un modālās analīzes programma *ME'Scope*, kur akselerometru iegūtie dati ar *FFT* algoritmu tiek pārveidoti uz svārstību frekvencēm. No pārvietojumu sensora *Noptel PSM-200* datu ierakstīšanai un pozicionēšanai izmantota datorprogramma *RPSM Win software*. Konstrukciju aprēķini veikti ar GEM datorprogrammām *Lira* un *RFEM*, kas pašsvārstību frekvences noteikšanai izmanto modālo analīzi. Konstrukciju aprēķini veikti, ievērojot Eirokodeksu prasības, kas balstītas uz robežstāvokļu metodi.

Darba uzbūve

Promocijas darbā ir anotācija, ievads, piecas galvenās nodaļas, kas iedalītas apakšnodaļās, secinājumi, literatūras saraksts un pielikums.

Promocijas darba apjoms ir 148 lappuses, tajā iekļauts 81 attēls, 27 tabulas, 105 literatūras avoti un viens pielikums.

1. nodaļā veikts literatūras apskats, kurā aplūkotas dinamiskās iedarbes raksturojošie parametri un to aprēķina metodes, kā arī autotransporta slodzes radīto svārstību tilta konstrukcijā eksperimentālas noteikšanas metodes un iekārtas mērījumu veikšanai. Apskatīts arī dinamiskās slodzes ievērtējums dažādu valstu standartu slodžu aprēķina modeli.

2. nodaļā aprakstīta tiltu dinamisko raksturlielumu iegūšanas un novērtēšanas metodika pārbaudei ar kustīgu slodzi, kā arī metodikas lietojums tiltu pārbaudēs.

3. nodaļā veikts eksperimentāli iegūto dzelzsbetona un spriegbetona tiltu dinamisko parametru izvērtējums, kā arī noteikti dinamiskie parametri un to vērtības, kas ietekmē tilta dinamisko veiktspēju. Izstrādāta tiltu dinamiskuma indeksa aprēķina metode. Tā ļauj

novērtēt tilta dinamisko veiktspēju, neveicot tilta pārbaudi ar dinamisku slodzi.

4. nodaļā veikts dzelzsbetona un spriegbetona tipveida siju tiltu maksimāli pieļaujamās dinamiskā koeficienta vērtības analītiskais aprēķins tiltiem ar laidumiem 8,66–22,16 m.

5. nodaļā izstrādāti ieteikumi standarta *LVS 190-11* "Tiltu inspekcija un pārbaude ar slodzi" 7.3. un 7.4. nodaļā iekļautās informācijas papildināšanai.

Darba aprobācija un publikācijas

Publikācijas

1. I. Paeglite, J. Smirnovs, A. Paeglitis (2021) Reinforced concrete highway bridge dynamic assessment method using data obtained by live scale load testing // Bridge Maintenance, Safety, Management, Resilience and Sustainability: Proceedings of the Tenth International IABMAS Conference (IABMAS 2020), Japāna, Sapporo, 12.–16. aprīlis, (2021). (Pilna publikācija konferences rakstu krājumā).
2. I. Paeglite, J. Smirnovs, A. Paeglitis (2018) Evaluation of the increased dynamic effects on the highway bridge superstructure. // Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 2018, vol. 13, no. 3, pp. 301–312, <https://doi.org/10.7250/bjrbe.2018-13.418> (Pilna publikācija žurnālā un SCOPUS).
3. I. Paeglite, J. Smirnovs, A. Paeglitis (2017) Dynamic behavior of prestressed slab bridges // Proceedings of 12th International conference "Modern Building Materials, Structures and Techniques", (MBMST 2016), 26.–27. maijs, 2016, Viļņa, Lietuva. 8. lpp. (Pilna publikācija SCOPUS).
4. I. Paeglite, J. Smirnovs, A. Paeglitis (2016) Traffic load effects on dynamic bridge performance // Bridge Maintenance, Safety, Management, Resilience and Sustainability: Proceedings of the Eight International IABMAS Conference (IABMAS 2016), Brazil, Foz do Iguacu, 26–30 June, (2016). – pp. 2364–2369. [M. kr.: 02T] (Pilna publikācija SCOPUS).
5. I. Paeglite, J. Smirnovs (2015) Dynamic effects caused by the vehicle-bridge interaction. // 5 th International Scientific Conference

Proceedings, Vol. 4 Jelgava, Latvia University of Agriculture, 2015, 371 pages ISSN 2255-7776 (Pilna publikācija konferences rakstu krājumā).

6. I. Paeglite, J. Smirnovs, A. Paeglitis (2015) The Dynamic Amplification Factor for bridges with span length from 10 to 35 meters. // Journal Engineering Structures and Technologies, 2015, pp. 1–8 10.3846/2029882X.2014.996254 (Pilna publikācija žurnālā).
7. I. Paeglite, A. Paeglitis (2014) Dynamic Amplification Factors of Some City Bridges. // World Academy of Science, Engineering and Technology, International Science Index 96, International Journal of Civil, Structural, Construction and Architectural Engineering, 8 (12), 1183–1187. <http://waset.org/publications/9999937> (Pilna publikācija žurnālā).
8. I. Paeglite, A. Paeglitis (2013) The Dynamic Amplification Factor of the Bridges in Latvia. // Journal Procedia Engineering, 2013, pp. 851–858., 10.1016/j.proeng.2013.04.108 (Pilna publikācija SCOPUS).
9. I. Paeglite, A. Paeglitis (2013) Dynamic Load Testing of the Latvian Bridges. International IABSE Conference “Assessment, Upgrading and Refurbishment of Infrastructure”, Rotterdam, Netherland 6–8 May 2013. (Pilna publikācija SCOPUS).

Konferences

1. 10th International Bridge Maintenance, Safety, Management, Resilience and Sustainability Conference (IABMAS 2020), “Reinforced concrete highway bridge dynamic assessment method using data obtained by live scale load testing”, 2021. gada 12.–16. aprīlis, Sapiro, Japāna. Konference rīkota tiešsaistē. (Prezentācija un pilna publikācija konferences rakstu krājumā).
2. 3rd International Conference “Innovative Materials, Structures and Technologies” (IMST 2017) “Evaluation method of the moving vehicle caused dynamic effects on the highway bridge superstructure” 27–29 September 2017. Rīga, Latvia. (Stenda referāts).
3. RTU 57. starptautiskās zinātniskās konferences sekcija valsts pētījumu programma “Inovatīvi materiāli un viedās tehnoloģijas vides drošumam, IMATEH”, “Transportlīdzekļu svāra un kustības

- ātruma ietekmes novērtēšana uz konstrukcijas dinamiskajām īpašībām” 2016. gada 17. oktobrī, Rīga, Latvija. (Prezentācija).
4. 8th International IABMAS Conference (IABMAS 2016), “Traffic load effects on dynamic bridge performance”, 2016. gada 26.–30. jūnijs, Foz do Iguacu , Brazīlija. (Prezentācija un pilna publikācija konferences rakstu krājumā).
 5. 12th International conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques”, (MBMST 2016), “Dynamic behavior of prestressed slab bridges” 2016. gada 26.–27. maijs, Viļņa, Lietuva. (Prezentācija un pilna publikācija SCOPUS).
 6. 2nd International Conference “Innovative Materials, Structures and Technologies” (IMST 2015) 30th September to 2nd October 2015. Riga, Latvia. (Prezentācija).
 7. International Conference “Civil Engineering 15”, Dynamic effects caused by the vehicle-bridge interaction”, 14–15 May 2015, Jelgava, Latvia. (Prezentācija un pilna publikācija konferences rakstu krājumā).
 8. ICSC 2014: International Conference on Structural and Construction Engineering, “Dynamic effects of selected bridges in Latvia”, 22–23 December 2014, London, United Kingdom. (Prezentācija un pilna publikācija žurnālā).
 9. 11th International Conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques”, „The Dynamic Amplification Factor of the Bridges in Latvia”, 16–17 May 2013, Vilnius, Lithuania. (Prezentācija un pilna publikācija SCOPUS).

1. LITERATŪRAS APSKATS

Autotransporta slodžu dinamiskās ietekmes novērtējumam vienmēr ir bijusi svarīga loma autoceļu tiltu drošuma un veiktspējas nodrošināšanai. Satiksmes slodzes iekļaušana tiltu aprēķinos sākās jau 19. gadsimtā, kad iesākās dzelzceļu un dzelzceļa tiltu būvniecība [1], [2].

Pēdējos 20 gados, attīstoties mērierīcēm [19] un to iespējām, daudzi pētījumi ir veikti, lai salīdzinātu braucošas automašīnas radīto dinamisko ietekmi uz tiltu. To ir pētījuši vairāki zinātnieki, piemēram, *Fryba* [9], *Young* un *Lin* [12], *Akin* un *Mofid* [20], [1]. Savukārt laboratorijas un eksperimentālo datu rezultātus analītiski pētījis zinātnieks *Nowak* [10], [21], [22], kura pētījumos analizēti ASV lietotie *AASHTO* slodzes modeļi un kravas automašīnas iedarbes uz tilta konstrukciju. Zinātnieks *O'Brien* [26], [27] pētījis automašīnas parametru noteikšanu kustībā jeb *Weight-in-motion (WIM)* un tiltu modālo analīzi. Zinātnieks *Rattigan* [23], [28] pētījis dinamiskā koeficienta vērtības un tā ietekmi uz dinamisko slodzi un tiltu konstrukciju. Tajā pašā laikā šajos pētījumos nav sniegtas rekomendācijas vai apsvērumi par tiltu dinamisko raksturojumu – dinamiskā koeficienta vai pašsvārstību frekvenču – rekomendējamiem vai nerekomendējamiem intervāliem.

Pieaugot datoru iespējām un signālu analīzes veidiem, notika pāreja uz sensoru rezultātos balstītām tiltu konstrukcijas analīzes metodēm un modālo analīzi, kurā tika noteiktas konstrukcijas pašsvārstību frekvences un svārstību formas [29]. Fiziskās tiltu īpašību izmaiņas (stingums, masa un enerģijas izkliede) rada izmaiņas tilta spektrālajās īpašībās (frekvences, svārstību rimšana un svārstību formas). Piemēram, izmaiņas tilta stingumā, kas liecina par tilta bojājumiem, var tikt noteiktas, fiksējot izmaiņas tilta pašsvārstību frekvencē [24]. Tomēr nav izstrādātas metodes pašsvārstību frekvences izmaiņu kvantitatīvam novērtējumam, piemēram, frekvenču skaitliskās vērtības, kas liecinātu par tilta konstrukcijas bojājumiem.

Attiecībā uz autoceļu tiltiem Eirokodekss 1990 nosaka, ka pasūtītājam ir jānorāda prasības un kritēriji attiecībā uz svārstībām, kuras ir svarīgi. Tiek rekomendēts izmantot komforta kritērijus, kuru vērtības būvnormatīvā nav norādītas. Tajā pašā laikā attiecībā uz ekspluatācijā esošu tiltu dinamisko īpašību izvērtēšanu būvnormatīvi rekomendācijas nesniedz [36].

1.1. Dinamiskās iedarbes raksturojošie parametri

Atšķirībā no statiskās slodzes, dinamiskās slodzes konstrukcijā izraisa masas paātrinājumus, līdz ar to radot inerces spēkus [48]. Ir svarīgi pārbaudīt tilta reakciju uz dinamisku slodzi, jo katra konstrukcija tiek projektēta, ņemot vērā aprēķina slodzes, taču ir dažādi ārēji faktori, kas var palielināt aprēķina slodzes lielumu.

Automašīnu radītā slodze ir laikā mainīga stohastiska slodze, ko apraksta ar varbūtības teorijas principiem, izmantojot satiksmes datus, kas iegūti, izmantojot automašīnas parametru mērīšanu kustībā (biežāk tiek lietots apzīmējums angļu valodā *Weight in motion (WIM)* [49]).

Konstrukcijai masa ir izkliedēta pa visu darinājumu, tāpēc kustības brīvību skaits ir bezgalīgs. Taču daudzos gadījumos reālo sistēmu iespējams reducēt uz sistēmu ar galīgu kustības brīvību skaitu. Šādas konstrukcijas aprēķinam izmanto galīgo elementu metodi (GEM) [48].

Tilta konstrukcijām svarīgākie dinamiskie raksturlielumi ir: pašsvārstību frekvence, svārstību rimšanas koeficients un dinamiskais koeficients.

Pašsvārstību frekvence

Brīvās svārstības jeb pašsvārstības rodas, kad konstrukcija tiek izkustināta no tās līdzsvara stāvokļa un brīvi svārstās. Pašsvārstības ir rimstošas, jo konstrukcijā bez iekšējiem spēkiem darbojas arī pretēji vērsti ārējie spēki. Svārstību rimšanu konstrukcijā var idealizēt kā viskozo rimšanu. Viskozi rimstošai sistēmai brīvās svārstības apzīmē ar vispārīgo kustības vienādojumu:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0; \quad (1.)$$

kur:

\ddot{u} – paātrinājums;

\dot{u} – ātrums;

u – pārvietojums;

m – masa;

c – viskozās rimšanas koeficients;

k – konstrukcijas stingums;

$p(t) = 0$, jo nav pielikts ārējais spēks.

Vienādojums rāda, ka konstrukcijas dinamiskās īpašības ir atkarīgas no konstrukcijas masas sadalījuma, konstrukcijas ģeometriskiem parametriem un konstrukcijas stinguma [13].

Katra raksturīgā konstrukcijas deformācijas forma tiek saukta par brīvo svārstību formu. T_n apzīmē kā brīvo svārstību periodu – tas ir laiks, kas nepieciešams vienam svārstību ciklam. Attiecīgā brīvo svārstību leņķiskā frekvence ω_n un pašsvārstību frekvence f_n tiek aprēķināta pēc 2. un 3. formulas:

$$f_n = \frac{1}{T_n}; \quad (2.)$$

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n}. \quad (3.)$$

Dinamiskajā analīzei izmanto modālās analīzes principu jeb pašsvārstību frekvenču analīzi, kopā ar frekvencēm apskata arī svārstību formas. To var noteikt, ja svārstību pamatvienādojumā (1. vienādojums) kā nulle tiek pieņemta svārstību rimšana un ārējo spēku iedarbība. Kopējais pašsvārstību frekvenču skaits ir vienāds ar konstrukcijas kustības brīvību skaitu. Katrai frekvences skaitliskajai vērtībai ir atbilstošs vektors jeb svārstību forma (moda).

Uzspiestās svārstības

Uzspiestās svārstības rodas konstrukcijā no laikā periodiski mainīgiem ārējiem spēkiem, kas iedarbojas uz konstrukcijas masu. Šāds ārējs spēks ir arī pār tiltu braucoša automašīna. Uzspiestās svārstības kustību vienādojumā apzīmē ar periodiski mainīgu ārējo spēku funkciju $p(t)$:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t). \quad (4.)$$

Dinamiska slodze ir laikā mainīga, tāpēc iedarbes funkcija nav aprakstāma ar vienu harmonisku funkciju. Ārējā spēka iedarbes funkciju apraksta automašīnas kustīgās slodzes modelis, un šāda veida iedarbi pēta tilta un automašīnas mijiedarbība.

Svārstību rimšanas koeficients

Ja svārstības nav uzspiestas, tās ar laiku norimst. Svārstību rimšanu rada: tērauda savienojumu berze; mikroplaisu atvēršanās un aizvēršanās dzelzsbetona konstrukcijās; berze starp konstrukciju un elementiem, kas nav konstrukcijas sastāvdaļa.

Konstrukcijas rimšanas koeficientu atšķirībā no konstrukcijas stinguma nevar aprēķināt, zinot tikai konstrukcijas dimensijas un konstrukcijas elementu izmērus. Tāpēc reālas konstrukciju pārbaudes ar dinamisku slodzi ir vienīgais veids, kas ļauj iegūt datus, ar kuriem var noteikt konstrukcijas svārstību rimšanas koeficientu. Šādus datus var iegūt gan no brīvajām, gan uzspiestajām svārstībām [51].

Svārstību kustības samazinājumu raksturo arī logaritmiskais dekrementa, un to aprēķina kā logaritmu no secīgām pārvietojuma samazinājuma virsotnēm svārstību līknē.

$$\delta = \ln \frac{u_i}{u_{i+1}} = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}, \quad (5)$$

kur:

ξ – rimšanas koeficients, kas ir bezdimensiju svārstību rimšanu raksturojošs lielums. Tas ir atkarīgs arī no konstrukcijas masas un stinguma.

Ja rimšanas koeficientam ξ ir maza skaitliskā vērtība $\sqrt{1-\xi^2} < 1$, tad tas dod aptuvenu vienādojumu $\delta = 2\pi\xi$, kas ir pieņemams pie $\xi < 0,2$ un kas attiecas uz lielāko daļu konstrukciju. Tātad rimšanas koeficientu var aprēķināt kā: $\xi = \delta/2\pi$.

Analītiski rimšanas koeficientu noteikt nav iespējams. Konstrukcijām ar nelielu rimšanas koeficientu var izmantot izteiksmi [51]:

$$\xi = \frac{1}{2\pi j} \ln \frac{\ddot{u}_i}{\ddot{u}_{i+j}}. \quad (6)$$

Neliels rimšanas koeficienta pieaugums var ievērojami samazināt dinamiskā koeficienta skaitlisko vērtību rezonansē. Precīzs svārstību rimšanas modelis konstrukcijām vēl nav izstrādāts, taču ir pierādīts, ka lineāri viskozas rimšanas pieņēmums ir pareizs un tas attiecas uz lielāko daļu konstrukciju. Izņēmums ir grunts un

konstrukcijas mijiedarbība, kur tiek ņemti vērā speciāli svārstību rimšanas modeļi [52].

Ņemot vērā visus faktoros, kas ietekmē svārstību rimšanas koeficientu un tā izmaiņas, to izmanto arī, lai noteiktu, vai konstrukcijai ir bojājumi.

Dinamiskais koeficients (DK)

Dinamisko koeficientu aprēķina kā attiecību starp maksimālo slodzes efektu, kad tilts ir slogots dinamiski, un maksimālo slodzes efektu, kad tā pati slodze ir pielikta statiski (7. vienādojums). Tas rāda, cik lielā mērā automašīnas un tilta mijiedarbības rezultātā palielinās statiskās slodzes radītās vertikālās deformācijas. Projektēšanas nolūkos statiskā slodze tiek sareizināta ar pieļaujamo dinamisko koeficientu. Alternatīva šai metodei ir veikt kompleksu GEM konstrukcijas dinamisko analīzi, ņemot vērā tilta un automašīnas mijiedarbību [55].

Visbiežāk dinamiskā koeficienta aprēķinam no iegūtajiem datiem izmanto 7. formulu, lai arī ir vēl citas metodes.

$$DK = \frac{R_{dyn}}{R_{stat}} \quad (7.)$$

R_{dyn} iegūst tieši no mērījumu datiem, nolasot mēriekārtu uzrādītos rezultātus. R_{stat} var iegūt jebkurā no mērījumu punktiem (ne tikai no vienas un tās pašas mērierīces), kas samazina iespēju pārvērtēt DK .

DK vērtība 1,3 atbilst 30 % dinamiskajam palielinājumam. Eirokodekss *LVS EN 1991-2* nosaka, ka aprēķiniem var tikt izmantota vispārināta dinamiskā koeficienta vērtība, kas tiek pievienota maksimālajai aprēķina slodzei.

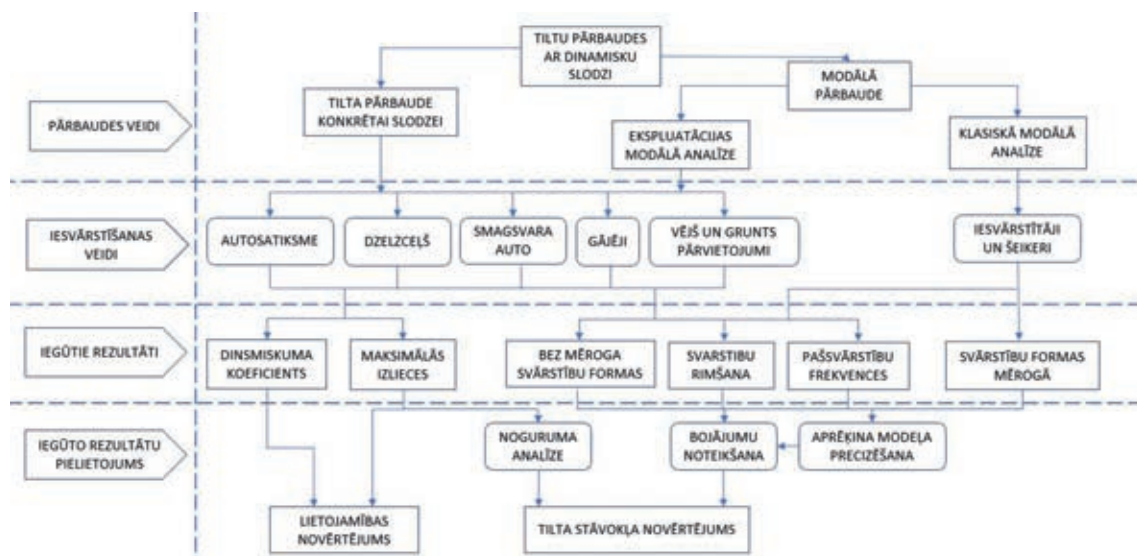
Tomēr Eirokodeksā *LVS EN 1991-2* ietvertā metode ir konservatīva, jo dinamiskais koeficients tiek aprēķināts, ņemot vērā tikai dažus parametrus. Eirokodeksa normālas satiksmes slodzes modelis tiltiem tiek aprēķināts, pievienojot dinamisko koeficientu neizdevīgākajam statiskās slodzes modelim, kas iegūts, ekstrapolējot slodzes efektus, izmantojot brīvās satiksmes simulācijas un *WIM* datus. Eirokodeksā teorētiskā dinamiskā koeficienta vērtība attiecīgajam

tiltam ir atkarīga no ietekmes līnijas formas un viena mainīgā – tilta garuma [62].

GEM aprēķinā neņem vērā tilta, automašīnas un ceļa profila mijiedarbību, tāpēc dinamiskā koeficienta vērtības ir konservatīvas un tās rada maksimālu dinamisko efektu. Šāda konservatīva metode ir pieņemama jaunām konstrukcijām, jo dinamiskā slodze tiek iekļauta jau konstrukcijas projektēšanas procesā, tomēr daudz precīzāks novērtējums ir nepieciešams jau ekspluatācijā esošām konstrukcijām, kurām Eirokodeksā iekļautās aprēķina vērtības var liecināt par nepietiekamu nestspēju un sadārdzināt rekonstrukciju.

1.2. Autotransporta slodzes radīto svārstību tilta konstrukcijā eksperimentālas noteikšanas metožu apskats

Tilta pārbaude ar dinamisku slodzi dod iespēju iegūt patiesos tilta dinamiskos raksturlielumus un vajadzības gadījumā koriģēt tilta aprēķina modeli. Pilna tilta pārbaude ar kustīgu slodzi ietver laiduma konstrukcijas pārvietojumu un paātrinājumu mērījumus dažādās tilta vietās. Ņemot vērā tilta pārvietojumu mērījumus ir iespējams noteikt dinamisko koeficientu un svārstību rimšanas



1.1. att. Metodes pārbaudei ar dinamisku slodzi; shēma (tulkots no angļu valodas) [75].

koeficientu, savukārt paātrinājumu mērījumus izmanto tilta modāla-
jai analīzei.

Metodes pārbaudei ar dinamisku slodzi var iedalīt divās grupās: tilta pārbaude konkrētai slodzei (angļu val. *operational tests*), kurā nosaka konstrukcijas svārstību parametrus, izmantojot konkrētu slodzi, un modālās pārbaudes (angļu val. *modal tests*), kurās nosaka svārstību parametrus pašai konstrukcijai neatkarīgi no iesvārstīšanas slodzes un veida [75]. Shēmā, kas redzama 1.1. attēlā, redzamas metodes pārbaudei ar dinamisku slodzi. Attēlā var redzēt arī iesvārstīšanas metodes, iegūstamos rezultātus jeb parametrus un to lietojumu.

Tilta pārbaudē ar dinamisku slodzi tiek izmantotas ikdienas satiksmes slodzes (automašīnas, vilcieni vai gājēji) vai apkārtējās vides slodzes (vējš, grunts svārstības). Mērījumi sniedz informāciju par svārstību parametriem visai konstrukcijas – automašīnas sistēmai. Šāda veida autoceļu un gājēju tiltu pārbaužu rezultāti ir piemēroti tieši konkrētai slodzei, jo tie ir atkarīgi no automašīnas piekares sistēmas, automašīnas ass svara, ātruma, pārbraukšanas vietas un citiem faktoriem.

Šajā pētījumā dati ir iegūti tieši ar šo metodi. Tilta konstrukcija tiek pakļauta iesvārstīšanai ar noteiktas masas automašīnu, un šādi iesvārstītai konstrukcijai tiek noteikti konstrukcijas dinamiskie raksturlielumi.

1.3. Iekārtas un instrumenti mērījumu veikšanai

Pārbaužu laikā konstrukcijas dinamiskos raksturlielumus var mērīt ar akselerometriem, tenzometriem un pārvietojumu mērītājiem. Pārvietojumu dati tiek izmantoti, lai noteiktu dinamisko koeficientu, pašsvārstību frekvences un svārstību rimšanas koeficientu. Savukārt paātrinājuma datus izmanto, lai varētu iegūt pašsvārstību frekvences un svārstību formas. Instrumentus izvieto uz galvenā laiduma vietās, kur tie uzrādīs vislielākās vērtības vai parādīs visprecīzākās svārstību formas.

Akselerometri

Konstrukciju paātrinājumu mērījumiem izmanto akselerometrus. Visbiežāk mērījumiem lieto pjezoelektriskos, pjezorezistīvos un mikroelektromehāniskās sistēmas (MEMS) akselerometrus. Pēc akselerometru iegūstamo datu veida tos iedala analogajos un digitālajos akselerometros.

Katram akselerometram tiek iestatīts paraugu ņemšanas biežums (angļu val. *sampling frequency*) jeb frekvence. Instrumenti ir novietoti noteiktos punktos, kas atbilst iegūstamo datu pozīcijām. Akselerometru izvietojums ir noteikts, lai varētu fiksēt pēc iespējas vairāk svārstību formu. GEM modeli izmanto, lai noteiktu punktus uz tilta, kuros jānovieto instrumenti.

Šajā pētījumā tika izmantoti trīsasu digitālie akselerometri *X6-1a*. Akselerometra diapazons +/- 16 g ar 15 bitu izšķirtspēju. Akselerometru paraugu ņemšanai pieejamās frekvences 12 Hz, 25 Hz, 50 Hz, 100 Hz un 200 Hz. Mērījumos tika izmantota 50 Hz frekvence.

Akselerometru iegūtos datus ar *FFT* algoritmu pārveido uz svārstību frekvencēm, ko pēc tam analizē ar signālu teorijas paņēmieniem, piemēram, izmantojot līkni, kas pielāgota, izmantojot daudzkārtēju ortogonālu polinomu algoritmu, lai noteiktu svārstību formas modālajai analīzei [61].

Pārvietojumu mērītāji

Lai arī pārvietojumu mērīšanai var izmantot akselerometru datus un, izmantojot dubulto integrēšanas metodi, pārveidot par pārvietojumiem, tomēr šāda metode ne vienmēr dod pietiekami precīzus rezultātus. Tāpēc pārvietojumu noteikšanai izmanto lokālas analogās un digitālās pārvietojumu noteikšanas metodes.

Lielu konstrukciju svārstību mērīšanai var izmantot *Noptel PSM-200* lāzeriekārtu. Tās darbības princips balstīts uz lāzera staru un uztvērēju, kas novietots uz konstrukcijas. Mērījumu attālums var būt līdz pat 350 metriem. *Noptel PSM-200* redzams 1.2. attēlā. Mērījumi var tikt veikti pat 500 reizes sekundē.



1.2. att. Svārstību sensors *Noptel PSM-200* tiek uzstādīts uz tilta pirms pārbaudes ar dinamisku slodzi veikšanas.

Atkarībā no tilta veida un iegūstamajiem datiem Latvijā pārbaudītajiem tiltiem svārstību diagrammas tika iegūtas, izmantojot svārstību sensoru *Noptel PSM-200*, tenzometrus un attēlu apstrādes metodi. Iegūtās diagrammas piemērs redzams 1.3. attēlā.

Pašsvārstību frekvences diapazons autoceļu tiltiem visbiežāk ir no 0 Hz līdz 10 Hz, retos gadījumos – pat līdz 20 Hz [61]. Šis diapazons ir pietiekams, lai novērotu pirmās piecas svārstību formas. Paraugu ņemšanas frekvencei jābūt vismaz divreiz lielākai nekā interesējošajai maksimālajai vērtībai, parasti 30–100 Hz.



1.3. att. Svārstību diagramma *Noptel PSM-200*.

Tenzometri

Tenzometri ir viens no visplašāk lietotajiem sensoriem, kad jānosaka virsmas deformācijas konkrētā šķēlumā. Tenzometrs ir ierīce, kuras elektriskā pretestība ir proporcionāla ierīces deformācijas lielumam, tāpēc, pārveidojot tenzometru iegūtos datus, var iegūt pārvietojumus daudz precīzāk nekā ar akselerometriem. Tomēr, lai arī šie dati būs precīzāki nekā akselerometriem dati, tos ietekmē mērījumu troksnis, īpaši – augstā mērījumu diapazonā. Visbiežāk lieto metāliskus tenzometrus.

Datu iegūšanas un apstrādes sistēmas

Lai vienlaikus pieslēgtu vairākas ierīces (tenzometrus un akselerometrus), tiek izmantotas daudzkanālu sistēmas, piemēram, *SPIDER*. Minētā sistēma ļauj vienlaikus saslēgt ierīces, lai uzreiz varētu redzēt un ierakstīt datorā svārstības dažādos konstrukcijas punktos.

Pārbaudēs izmantotās automašīnas

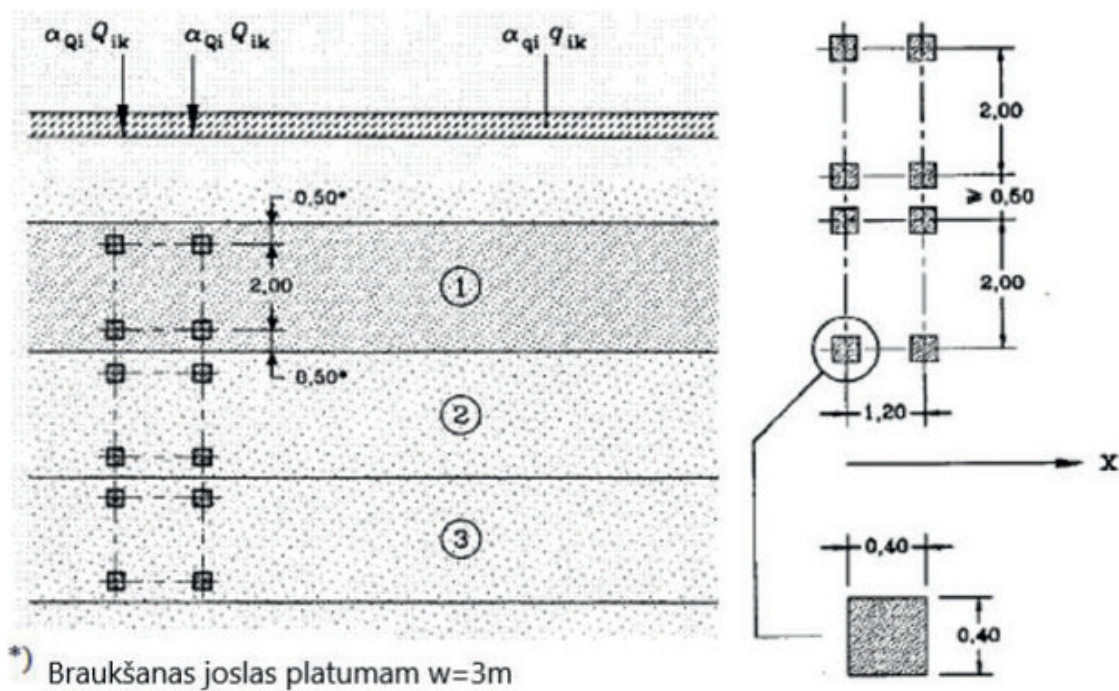
Slodzes radīšanai uz tilta konstrukcijas tiek izmantotas automašīnas ar izmērītiem masas raksturojumiem. Pārbaudēm parasti izmanto automašīnu ar trīs līdz piecām asīm un masu ap 20–40 t.

Pārbaudēs tiek izmantotas automašīnas, kas atbilst normālā satiksmē izmantotām automašīnām, lai modelētu pēc iespējas reālākus konstrukcijas iesvārstīšanas apstākļus.

1.4. Dinamiskās slodzes ievērtējums slodžu aprēķina modeli

Eirokodeksā tiek lietota robežstāvokļu metode, ņemot vērā gan slodzes, gan materiāla drošības koeficientus. Robežstāvokļu metode apskata visus iespējamus robežstāvokļus un ir balstīta varbūtības teorijas principos. Ja slodzes radītais efekts pārsniedz konstrukcijas elementa stiprību, iestājas sabrukums.

Tiltu projektēšanas standarti 21. gadsimtā izmanto divus robežstāvokļus – lietojamības un stiprības, kur stiprības robežstāvoklis



1.4. att. Tandēma un izkliedētas slodzes izvietojums [94].

tiek aprēķināts, ņemot vērā konstrukcijas sabrukumu, savukārt lietojamības robežstāvoklis nosaka, vai konstrukcija atbilst noteiktiem lietošanas kritērijiem.

Eirokodeksā *LVS EN 1991-2:2003* "Satiksmes slodzes tiltiem" [94] doti četri vertikālās slodzes modeļi *LM1*, *LM2*, *LM3* un *LM4* un horizontālās slodzes modelis, kas rodas, transportlīdzeklim bremzējot un paātrinoties, kā arī centrālās un šķērsvirziena slodze. Autotransporta tiltu aprēķiniem izmanto slodzes modeļus *LM1*, *LM3* un *LM4*.

Slodzes modelis *LM1* sastāv no tandēma un izkliedētas slodzes (galvenais modelis – vispārējām un lokālām pārbaudēm). Tandēma sistēmai ir divu asu slodzes un izkliedēta slodze: $Q_{ik}\alpha = \alpha_{Qi}Q_{ik}$, kur α koeficientu skaitliskās vērtības ir dotas katras ES dalībvalsts standarta nacionālajā pielikumā. *LM1* dinamiskā slodze tiek izvērtēta raksturīgajās slodzēs Q_{ik} un q_{ik} , tāpēc nav vēl papildus jāpalielina aprēķina slodzes.

Satiksmes slodzes Eurokodeksā tika noskaidrotas no statiskās satiksmes slodzes simulācijas, slodzes izvietojums redzams 1.4. attēlā.

Slodzes modelī *LM3* dinamiskā slodze papildus jāievērtē, ja automašīnām paredzēts pārvietoties ātrāk par 70 km/h. Tādā gadījumā jāņem vērā dinamiskais palielinājums, ko aprēķina ar 8. formulu:

$$\varphi = 1.40 - \frac{L}{500} \geq 1.0, \quad (8.)$$

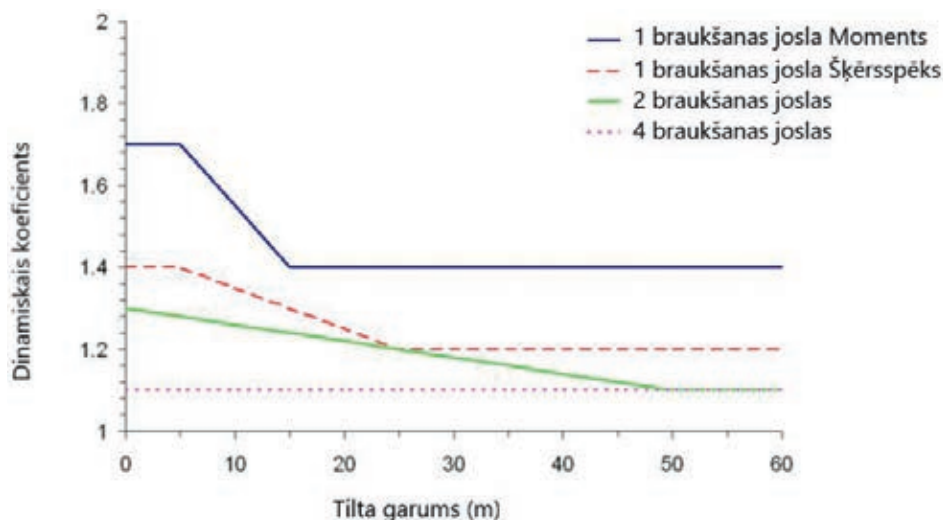
kur L – ietekmes līnijas garums metros [95].

Slodzes modelī *LM4*, kas apraksta pūļa slodzi 5 kN/m², dinamiskais koeficients jau ir ietverts.

Saskaņā ar Latvijā spēkā esošo standartu *LVS EN 1991-2* “Satiksmes slodzes tiltiem” slodzes modeļos tiek iekļautas konstantas dinamiskā koeficienta vērtības, kas ir atkarīgas no tilta garuma un slodzes ietekmes līnijas, kā arī no braukšanas joslu skaita uz tilta, kas paredzētas 100 gadu cikla statiskās slodzes efektam [27].

Dinamiskā koeficienta vērtības, ko izmanto *LVS EN 1991-2:2003* “Satiksmes slodzes tiltiem”, divu joslu brauktuves tiltam redzamas 1.5. attēlā.

Eirokodeksā *LVS EN 1991* 2. daļa “Satiksmes slodzes tiltiem” nav ietvertas dinamiskā koeficienta vērtības ekspluatācijā esošajiem tiltiem.



1.5. att. Dinamiskais koeficienta vērtības, kas tiek izmantotas Eurokodeksa aprēķina modelī [63].

1.5. Standarts tilta pārbaudei ar dinamisku slodzi Latvijā

Tiltu pārbaudes ar slodzi Latvijā tiek veiktas atbilstoši prasībām, ko nosaka standarts *LVS 190-11* "Tiltu inspekcijas un pārbaudes" [96]. Latvijas standarts nenosaka konkrētu dinamiskās pārbaudes secību un informāciju, kas jāievāc pirms tās veikšanas, kā arī nesniedz kritērijus, kā novērtēt iegūtos rezultātus.

Standarts pārbaudes veicējam dod ļoti daudz iespējas veikt pārbaudi pēc saviem ieskatiem, nekonkretizējot iegūto rezultātu ietekmi uz būves mehānisko stiprību un stabilitāti. Lai arī ir iekļauts teikums "pārbaudes laikā veikto mērījumu rezultāti un to salīdzinājums ar aprēķinātajām vērtībām", tomēr tas vairāk attiecas uz statiskās slodzes rezultātiem, kur precīzi var aprēķināt vertikālās deformācijas, ko paredzēts iegūt no konkrētās slodzes.

LVS 190-11 "Tiltu inspekcijas un pārbaudes" nekonkretizē, kāda pārbaudes metode tiltiem būtu jāizmanto, lai noteiktu konstrukcijas svārstības, tomēr visbiežāk tiek lietota tieši pārbaude, izmantojot konkrētu dinamisku slodzi.

2. METODIKA TILTA PĀRBAUDEI AR DINAMISKU SLODZI

Pasaulē eksistē vispārpieņemta prakse pārbaudes ar dinamisku slodzi veikšanai, tomēr katrs uzņēmums, kas veic tiltu pārbaudi ar dinamisku slodzi, to dara citādi, jo nav standarta, kas reglamentētu pārbaudes ar dinamisku slodzi veikšanu tiltu konstrukcijām. Šī iemesla dēļ katrs pārbaudes veicējs pēc saviem ieskatiem izvēlas konkrētai tilta konstrukcijai piemērotāko pārbaudes veikšanas secību un veidu, ņemot vērā pieejamās datu ierakstīšanas metodes un tiltu iesvārstīšanas slodzi.

Promocijas darbā izstrādātā metodika parāda Latvijā lietotās pārbaudes ar dinamisku slodzi veikšanas secību, lietoto instrumentu veidus un iegūstamos datus un to novērtējumu. Tilta iesvārstīšanai tiek izmantoti 4 cm augsti dēļi, kas novietoti uz brauktuves seguma. Tas ļauj modelēt dažādus brauktuves seguma stāvokļus, kas īpaši svarīgi tiltiem, kas jau kādu laiku atrodas ekspluatācijā. Attālums starp dēļiem atkarīgs no attāluma starp automašīnas riteņu asīm. Dēļu augstums (4 cm) ir pieņemts, balstoties uz vidējo ledus un sniega sanesumu augstumu ziemas apstākļos, situācijā, kad netiek veikta atbilstoša ceļa seguma uzturēšana. Šāda augstuma un izvietojuma dēļi raksturo nelīdzenu brauktuves segumu ar seguma nelīdzenuma indeksa *IRI* vērtību 6 mm/m.

Metodiku tilta pārbaudei ar dinamisku slodzi var iedalīt piecās daļās, kas grafiski parādītas 2.1. attēlā.



2.1. att. Metodika dinamisko raksturlielumu iegūšanas un novērtēšanai pārbaudei ar dinamisku slodzi.

Pārbaudes plānošana

N1 – tilta tehniskā stāvokļa novērtējums. Veic tilta vispārējo inspekciju, kas ietver: dokumentācijas izpēti; informāciju par iepriekšējām pārbaudēm un inspekcijām; izpēta būvniecības rasējumus. Veic vizuālo tilta apskati un nosaka, vai konstrukcijai ir bojājumi, kas samazina nestspēju. Visbiežāk sastopamie bojājumi ir plaisas betonā, stiegrojuma korozija, bojātas balstīklas vai balstu sēšanās. Pēc iegūtās informācijas sniedz atzinumu, vai konstrukcijai drīkst veikt pārbaudi ar slodzi.

Svarīgi! Ja radušies bojājumi, kas ietekmē konstrukcijas nestspēju, pārbaudi neveic.

N2 – konstrukcijas GEM aprēķins un nestspējas novērtējums. Izmantojot iegūtos konstrukcijas rasējumus un materiālu stiprības norādījumus, veic GEM aprēķinu un nosaka tilta nestspēju. Svarīgi noskaidrot materiāla stiprības klasi. Ja tas nav zināms, jāveic negraujošie vai graujošie testi, lai noskaidrotu materiāla īpašības.

Aprēķinā tiek izmantotas slodzes, kas norādītas standartā *LVS EN 1991-2* "Iedarbes uz konstrukcijām 2. daļa. Satiksmes slodzes tiltiem". Konstrukcijas aprēķins tiek veikts stiprības un lietojamības robežstāvoklim.

N3 – tilta dinamiskās analīzes veikšana un instrumentu izvietojuma noteikšana. Izmantojot GEM programmas dinamisko sadaļu, veic konstrukcijas aprēķinu, nosakot pašsvārstību frekvences un formas, kā arī konkrētas vietas uz tilta, kur jāizvieto mērierīces. Ņemot vērā konstrukcijas rasējumus vai apsekojot tiltu, nosaka nepieciešamo mēriekārtu daudzumu un vadu garumu mērierīcēm, kā arī piekļūšanas iespēju vietām, kur jānovieto mērierīces. Pirms pārbaudes jāveic mērinstrumentu pārbaude un kalibrēšana.

N4 – pārbaudes programmas ar dinamisku slodzi izstrāde. Sastādīt pārbaudes ar dinamisku slodzi veikšanas programmu, norādot konkrētas vietas, kur jāizvieto mērierīces, un to daudzumu.

Programmā jāiekļauj šāda informācija:

- laiks, kurā būs jāslēdz satiksme uz tilta;
- mērinstrumentu izvietojums;
- pārbaudē iesaistīto darbinieku skaits un pienākumi;
- pārbaudes vadītājs;
- nepieciešamo automašīnu skaits un svars.

Jānosaka konkrēts automašīnu pārbraucienu skaits un braukšanas ātrums. Ja tilts jau ir atvērts satiksmei, jādod norādījumi par satiksmes slēgšanu uz tilta pārbaudes laikā.

Mērinstrumentu uzstādīšanas un slodzes sagatavošana

Lai iegūtu uzticamus un precīzus rezultātus, ļoti svarīgi ir pareizi izvietot un piestiprināt mērierīces. Svarīgi pierakstīt konkrētās dienas laikapstākļus un katras mērierīces atrašanās vietu, jo tas var ietekmēt mērījumu precizitāti un to interpretāciju.

M1 – mērinstrumentu atrašanās vietu atlikšana uz tilta konstrukcijas. Balstoties uz iepriekš veiktajiem GEM aprēķiniem, uz tilta konstrukcijas atzīmē vietas, kur jānovieto mērinstrumenti.

M2 – mērinstrumentu izvietošana uz konstrukcijas. Mērinstrumenti jāpiestiprina pie konstrukcijas pēc mērinstrumenta specifikācijā noteiktās metodes. Ja mērinstruments jāsaslēdz ar datoru un vadiem, tad vadi jānovieto tā, lai tie netraucētu satiksmei.

M3 – automašīnu svēršana. Kravas automašīnas tiek svērtas, izmantojot speciālus auto svarus. Automašīnas šoferi, kuri veiks pārbraucienus, tiek instruēti, cik braucieni un kādā ātrumā būs jāveic.

M4 – tilta klātnes sagatavošana pārbaudei. Jāpārlicinās, ka tilta brauktuve pārbaudes laikā ir tukša. Jāpārlicinās, ka automašīnai ir pietiekami daudz vietas, lai uzņemtu ātrumu, pirms tā uzbrauc uz tilta. Jāpārlicinās, ka pārbaudei nepieciešamie 4 cm augstie dēļi un 20 cm augstais tramplīns ir novietoti netālu, lai pārbaude varētu notikt raiti.

Pārbaudes veikšana

Pārbaudes procedūras laikā jāpārlicinās, ka satiksme ir slēgta un nav kāda cita ārēja slodze, kas varētu ietekmēt pārbaudi. Pārbaude notiek, modelējot dažādus ceļa seguma stāvokļus: bez dēļiem – gluds segums; ar dēļiem – nolietojies segums ar bedrēm vai ziemā ar ledus sanesumiem.

S1 – šķērso tiltu pa līdzenu brauktuvi. Pirms pārbaudes sākuma tiek veikts “nulles” nolasījums bez automašīnas uz tilta. Datus sāk ierakstīt, automašīnai vēl neatrodoties uz tilta, un beidz ierakstu, kad konstrukcijā norimušas radītās svārstības. Transportlīdzeklis

šķērso tiltu ar ātrumu 20 km/h, 40 km/h, 60 km/h un, ja nepieciešams, ar ātrumu līdz atļautajam braukšanas ātrumam tilta atrašanās vietā pa līdzenu brauktuvi.

S2 – šķērso tiltu pa nelīdzenu brauktuvi. Pirms automašīna iesāk kustību uz tilta, automašīnas ceļā tiek novietoti 4 cm augsti dēļi. Attālums starp dēļiem 3–3,5 m atkarībā no automašīnas asu attāluma. Transportlīdzeklis šķērso tiltu ar ātrumu 20 km/h, 40 km/h, 60 km/h pa nelīdzenu segumu. Nepieciešamības gadījumā ar ātrumu 70 km/h pār nelīdzenu segumu, jo ļoti nelīdzenam segumam tas var būt maksimālais atļautais braukšanas ātrums.

S3 – triecienslodze. Laiduma vidū novieto 20 cm augstu iepriekš izgatavotu tramlīnu. Automašīna priekšējo riteņu asi nobrauc no tramlīna, ļauj konstrukcijai brīvi svārstīties, līdz svārstības norimst. Pēc pārbaudes no klātnes noņem visus šķēršļus un veic vēl vienu “nulles” ierakstu bez satiksmes.

Datu apstrāde

Atkarībā no pārbaudē izmantotajiem mērinstrumentiem datus apstrādā atbilstoši katras mērierīces specifikācijām.

D1 – akselerometru dati. Akselerometru iegūtos datus ar *FFT* algoritma metodi pārveido uz svārstību frekvencēm, tā iegūstot svārstību formas un frekvences.

D2 – pārvietojumu mērītāju dati. No pārvietojumu mērījumu datiem izveido svārstību diagrammas katrai slodzei un ceļa segumam, pēc kurām aprēķina brīvo svārstību frekvenci un dinamisko koeficientu. No triecienslodzes diagrammām nosaka svārstību rimšanas koeficientu.

D3 – tenzometru dati. Tenzometri ieraksta spriegumus, kas veidojas konstrukcijā no konkrētās slodzes. Šos datus pārveidojot, uz pārvietojumiem iegūst svārstību diagrammas un nosaka brīvo svārstību frekvenci un dinamisko koeficientu.

D4 – rezultātu apkopojums. Iegūtos rezultātus apkopo atskaitē un salīdzina ar aprēķina modelī iegūtajiem rezultātiem.

Rezultātu novērtēšana

R1 – pašsvārstību frekvences. Iegūtās pašsvārstību frekvences un svārstību formas tiek salīdzinātas ar analītiski aprēķinātajām vērtībām, ja vērtības atšķiras par vairāk nekā 10 %, tad jāveic aprēķina modeļa pārbaude. Tas liecina par aprēķina modeļa neatbilstību reālajai konstrukcijai.

R2 – dinamiskais koeficients. Ja dinamiskais koeficients pie līdzena ceļa seguma tiek iegūts lielāks par 1,4, aprēķina modelī slodzes drošības koeficients ir jāizmaina atbilstoši iegūtajai dinamiskā koeficienta vērtībai, jo tas norāda, ka attiecīgajai konstrukcijai un slodzei Eirokodeksā pieņemtais dinamiskais koeficients ir par mazu.

Nosaka konstrukcijas dinamiskuma indeksu, tā novērtējot tilta dinamiskās veiktspējas līmeni.

R3 – gājēju komforta kritērijs. Tiltiem ar gājēju ietvēm iegūtās paātrinājuma vērtības salīdzina ar *LVS EN 1990:2022/A1:2008* A2.4.3.2. punktā minētajiem gājēju komforta kritērijiem (lietojamības robežstāvoklim). Vertikālie paātrinājumi – līdz $0,7 \text{ m/s}^2$, horizontālie paātrinājumi – līdz $0,2 \text{ m/s}^2$.

R4 – iegūto rezultātu vispārējs novērtējums un pārbaudes atskaites sagatavošana. Pārbaudē iegūtos datus par tilta konstrukciju, pārbaudē izmantotajām ierīcēm un to izvietojumu, pieliktās slodzes un iegūtos rezultātus apkopo atskaitē. Atskaites beigās tiek izdarīti secinājumi par konstrukcijas dinamisko veiktspēju un atbilstību aprēķiniem.

Izstrādātā metodika pārbaudei ar dinamisku slodzi ļauj noteikt nepieciešamos tiltu dinamiskos raksturlielumus, kas izmantoti 3. nodaļā dinamisko raksturlielumu analīzei. Analīzē noteikti dinamisko raksturlielumu (pašsvārstību frekvence, svārstību rimšanas koeficients, dinamiskais koeficients) vērtību diapazoni, kas liecina par paaugstinātu tilta dinamisko veiktspēju. Iegūtie dinamisko raksturlielumu diapazoni pēc tam izmantoti dinamiskuma indeksa aprēķina metodē 3.2. apakšnodaļā.

3. TILTU DINAMISKĀS VEIKTSPĒJAS NOVĒRTĒŠANAS METODE

Tilta dinamiskās veiktspējas novērtēšanu var veikt ar pārbaudi, izmantojot kustīgu slodzi, kas ne vienmēr ir iespējams. Tādēļ ir izstrādāta metode tiltu dinamiskās veiktspējas novērtēšanai, neveicot tilta pārbaudi ar dinamisku slodzi.

Konstrukciju dinamisko veiktspēju raksturo šādi galvenie parametri:

- dinamiskais koeficients – raksturo vertikālās deformācijas vai sprieguma palielinājumu dinamiskās slodzes iedarbībā;
- logaritmiskais dekrementa un svārstību rīšanas koeficients – abi raksturo ātrumu, kādā norimst uzspiestās svārstības; atkarīgs no konstrukcijas stinguma;
- vertikālā deformācija – konstrukcijas padošanās slodzes ietekmē; atkarīgs no konstrukcijas stinguma un pieliktās slodzes;
- pašsvārstību frekvence – konstrukcijas svārstības atkarībā no konstrukcijas formas un materiāla; atkarīgs no konstrukcijas stinguma.

No šiem parametriem izriet, ka tilta dinamiskā veiktspēja ir stipri saistīta ar konstrukcijas stingumu, ko raksturo svārstību rīšana, vertikālā deformācija un pašsvārstību frekvence. Dinamisko koeficientu nav iespējams noteikt konstrukcijai, neveicot pārbaudi ar dinamisku slodzi, tāpēc izstrādātajā metodē tas netiek izmantots.

Izanalizējot iepriekš minētos parametrus, kas ietekmē konstrukcijas dinamisko veiktspēju, ir noteikti parametri, ko ir iespējams noskaidrot projektēšanas procesā – konstrukcijas stingums un pašsvārstību frekvence. Savukārt ekspluatācijā esošai konstrukcijai tie ir rīšanas koeficients, pātrinājumus un svārstību amplitūdu. No tiem svarīgākie ir rīšanas koeficients un svārstību amplitūda, kas raksturo arī konstrukcijas stingumu.

Dažādiem tiltu veidiem parametru vērtības var atšķirties, tāpēc promocijas darbā tika atsevišķi apskatīti četru veidu tilti – dzelzsbetona plātņu tilti, spriegbetona siju tilti un spriegbetona plātņu tilti ar vienu un vairākām ribām. Tiltiem tika noteikti iepriekš minētie parametri, kas raksturo konstrukcijas stingumu un dinamisko

veiktspēju. Šie parametri tika analizēti, lai noteiktu, kuri parametri un kādi parametru diapazoni raksturo konstrukcijas, kurām novērojama paaugstināta dinamiskā veiktspēja. Lai noteiktu katra konkrētā parametra vērtību diapazonu, izmantoti dati, kas iegūti tiltu pārbaudēs ar dinamisku slodzi no 2000. līdz 2016. gadam.

Iegūto datu analīzes rezultātā noteiktas četru dzelzsbetona tiltu dinamisko veiktspēju ietekmējošo kritēriju vērtības, kas tālāk izmantotas tiltu dinamiskās veiktspējas līmeņa noteikšanas metodē, ko raksturo dinamiskuma indekss. Dinamiskuma indeksa aprēķina metode aprakstīta 3.2. apakšnodaļā.

Pēc rezultātu analīzes tika atlasīti pieci kritēriji:

- 1) laiduma garuma / konstrukcijas augstuma attiecība;
- 2) relatīvā vertikālā deformācija;
- 3) pašsvārstību frekvence;
- 4) rimšanas koeficients;
- 5) starptautiskais nelīdzenuma indekss *IRI*.

Pirmie divi kritēriji raksturo konstrukcijas stingumu: laiduma garuma / augstuma attiecība jeb konstrukcijas slaidums un relatīvā vertikālā deformācija, kas raksturo konstrukcijas vertikālās deformācijas attiecību pret laiduma garumu.

Otrie divi kritēriji raksturo svārstības: pašsvārstību frekvenci un svārstību rimšanas koeficientu. Ja pašsvārstību frekvenci var noteikt, veicot tilta dinamisko analīzi, tad svārstību rimšanas koeficientu, neveicot pārbaudi, noteikt nav iespējams. Tāpēc svarīgi bija noteikt šī parametra vērtību diapazonu no eksperimentāli iegūto pārbaudžu ar dinamisku slodzi rezultātiem.

Pēdējais kritērijs ir starptautiskais nelīdzenuma indekss *IRI*.

3.1. Eksperimentāli iegūto dzelzsbetona tiltu dinamisko raksturlielumu analīze

Dzelzsbetona plātņu tilti

Tilta dinamiskās veiktspējas un stingumu raksturojošo parametru diapazoni redzami 3.1. tabulā.

Vērtību diapazona daļa, kas norāda uz lielāku dinamisko veiktspēju, tika noteikta, salīdzinot pētījumā iekļautos tiltu parametrus. Diapazona vērtības tika ņemtas no tiltiem, kuriem dinamiskuma

koeficients pie nelīdzena seguma ir virs 2, šajā gadījumā dinamiskuma koeficienta vērtības ir 2,4–2,7. Rezultāti liecina, ka vērtību diapazona daļa, kas norāda uz lielāku relatīvo ielieci un laiduma konstrukcijas garuma un augstuma attiecību, apstiprina lielāku dinamisko veiktspēju. Savukārt vērtību diapazona daļa, kas liecina par zemāku svārstību rimšanas koeficientu un pirmās formas pašsvārstību frekvences vērtību, norāda uz lielāku konstrukcijas dinamisko veiktspēju.

3.1. tabula

Dzelzsbetona plātņu tiltu dinamiskās veiktspējas un stingumu raksturojošo parametru diapazoni

Parametri	Vērtību diapazons	Diapazona vērtība, kas norāda uz lielāku dinamisko veiktspēju
Laiduma garuma / plātnes augstuma attiecība	16–34	> 23
Pašsvārstību frekvence	3,25–18 Hz	3,25–6 Hz
Rimšanas koeficients	0,013–0,04	0,013–0,02
Relatīvā vertikālā deformācija	1/5000 L – 1/3400 L	1/1500 L – 1/2030 L

Rezultāti, kas apkopoti 3.1. tabulā, tālāk tiek izmantoti dinamiskuma indeksa aprēķina metodē, kas aprakstīta 3.2. apakšnodaļā.

Spriegbetona siju tilti

Spriegbetona siju tiltu dinamiskās veiktspējas un stingumu raksturojošo parametru diapazoni redzami 3.2. tabulā. Diapazona vērtības tika ņemtas no tiltiem, kuriem dinamiskuma koeficients pie nelīdzena seguma ir virs 2, šajā gadījumā dinamiskuma koeficienta vērtība ir 3,10. Laiduma garuma / sijas augstuma attiecība šāda tipa sijām nav noteicošais lielums, jo sijām ir fiksēts augstums. Pašsvārstību frekvence virs 5 Hz un rimšanas koeficients virs 0,02 liecina par paaugstinātu dinamisko veiktspēju. Lielāka pašsvārstību frekvence liecina par lielāku konstrukcijas dinamisko veiktspēju, ko norāda korelācijas koeficients 0,99 starp pašsvārstību frekvenci un dinamisko koeficientu nelīdzenam ceļa segumam.

Vienkārši balstītu spriegbetona siju tiltu dinamiskās veiktspējas un stingumu raksturojošo parametru diapazoni

Parametri	Vērtību diapazons	Diapazona vērtība, kas norāda uz lielāku dinamisko veiktspēju
Laiduma garuma / sijas augstuma attiecība	18-19	19
Pašsvārstību frekvence	3,5-14,3 Hz	5-14,3 Hz
Rimšanas koeficients	0,01-0,05	0,02-0,05
Relatīvā vertikālā deformācija	1/1700 L - 1/3070 L	1/2010 L - 1/3070 L

Dinamiskuma indeksa metodē siju tiltu dati netika izmantoti, jo ir pieejami tikai trīs tiltu pārbaudes ar dinamisku slodzi rezultāti un šādus tiltus Latvijā vairs nebūvē. Tomēr 4. nodaļā tika noteikti siju tiltu pieļaujamie dinamiskie koeficienti, kas ļauj raksturot esošo siju tiltu pieļaujamās dinamiskās slodzes rezervi.

Spriegbetona plātņu tilti ar vienu ribu

Apkopojot un izanalizējot spriegbetona plātņu tiltu dinamiskos parametrus, tika noteikti dinamisko veiktspēju un stingumu raksturojošo parametru diapazoni, kas tālāk izmantoti 3.2. apakšnodaļā dinamiskuma indeksa aprēķinā. Diapazona vērtības tika ņemtas no tiltiem, kuriem dinamiskuma koeficients pie nelīdzena seguma ir virs 2. Spriegbetona plātņu tiltu gadījumā dinamiskuma koeficienta vērtības ir 2,1-3,5.

Spriegbetona plātņu tiltu dinamisko veiktspēju un stingumu raksturojoši parametri apkopoti 3.3. tabulā. Redzams, ka spriegbetona konstrukcijām laiduma garuma / augstuma attiecība ir robežās no 24 līdz 26. Pašsvārstību frekvence ir salīdzinoši zema, un lielāka dinamiskā veiktspēja ir konstrukcijām ar pašsvārstību frekvencei ap 4,3-4,5 Hz. Lielāku dinamisko veiktspēju raksturo arī rimšanas koeficients intervālā no 0,03 līdz 0,04, savukārt relatīvā vertikālā deformācija 1/2090 L - 1/2500 L. Spriegbetona tiltiem ar vienu ribu

Spriegbetona plātņu tiltu dinamisko veiktspēju un stingumu raksturojošo parametru diapazoni

Parametri	Vērtību diapazons	Diapazona vērtība, kas norāda uz lielāku dinamisko veiktspēju	Papildu konstrukcijas parametri, kas rada paaugstinātu dinamiku
Laiduma garuma / plātnes augstuma attiecība	24–26	25	Brauktuve novietota uz konsoles
Pašvārstību frekvence	2,5–5,2 Hz	4,3–4,5 Hz	
Rimšanas koeficients	0,02–0,04	0,03–0,04	
Relatīvā vertikālā deformācija	1/1900 L – 1/2500 L	1/2090 L – 1/2500 L	

svarīgs parametrs ir brauktuves atrašanās uz konsoles, ja plātne ir trapecveida. Ja konstrukcija ir slaida ($L/H > 25$), tad tā ir arī daudz vieglāk iesvārstāma, tāpēc, novietojot automašīnu uz konsoles daļas, tā rada papildu vērpes spēkus.

Spriegbetona plātņu tilti ar vienu ribu

Spriegbetona ribotu plātņu tiltu dinamiskās veiktspējas un stingumu raksturojoši parametri apkopoti 3.4. tabulā. Diapazona vērtības tika ņemtas no tiltiem, kuriem dinamiskuma koeficients pie nelīdzena seguma ir virs 2. Spriegbetona plātņu tiltu gadījumā dinamiskuma koeficienta vērtības ir 2,0–5,6.

Spriegbetona ribotu plātņu tiltu dinamiskās veiktspējas un stingumu raksturojošo parametru diapazoni

Parametri	Vērtību diapazons	Diapazona vērtība, kas norāda uz lielāku dinamisko veiktspēju	Papildu konstrukcijas parametri, kas rada paaugstinātu dinamiku
Laiduma garuma / plātnes augstuma attiecība	19–27	25–27	Tilts novietots leņķī pret tilta garenasi. Brauktuve novietota uz konsoles.
Pašsvārstību frekvence	3,9–5,7 Hz	3,9–4,8 Hz	
Rimšanas koeficients	0,0–0,06	0,03–0,06	
Relatīvā vertikālā deformācija	1/2500 L – 1/5080 L	1/3500 L – 1/5080 L	

Redzams, ka spriegbetona ribotu plātņu tiltiem laiduma garuma / augstuma attiecība ir 25–27, kas liecina par konstrukcijas lielāku dinamisko veiktspēju. Pašsvārstību frekvence ir salīdzinoši zema, un lielāku dinamiskās veiktspēju raksturo vērtību diapazons 3,9–4,8 Hz. Ribotu plātņu tiltiem vērtību diapazons, kas parāda lielākas rimšanas koeficienta vērtības un mazāku relatīvā ielieci, liecina par lielāku dinamisko veiktspēju. Spriegbetona plātņu tilti, kuriem brauktuve novietota slīpi pret tilta garenasi, palielina konstrukcijas dinamisko veiktspēju.

3.1.1. Slodzes dinamiskās iedarbes ietekmējošie faktori

Izanalizējot 3. nodaļā iegūtos datus, tika noteikti dinamiskās iedarbes ietekmējošie faktori: tilta ģeometrija, ceļa līdzenums un automašīnas ātrums.

Tilta ģeometrija

Tilta ģeometrija ir viens no svarīgākajiem elementiem, kas ietekmē tilta dinamiku, jo gan tilta konstrukcijas veids un forma, gan šķērsriezuma forma ietekmē tilta dinamisko veiktspēju. Papildu slodzi tilta konstrukcijām rada transportlīdzekļu kustība, ja tilts novietots slīpi attiecībā pret autoceļa garenasi. Tilta laiduma garuma / augstuma attiecība ietekmē tilta stingumu, līdz ar to – arī dinamiku.

Tilti, kas novietoti slīpi, ir pakļauti lielākai dinamiskajai veiktspējai. Analīze veikta ar datorprogrammu *LIRA*. Aprēķini veikti 12 m garam vienkārši balstītas sistēmas tiltam ar platumu 9 m un plātnes augstumu 0,7 m. Laiduma garuma / augstuma attiecība $l/h = 20$.

3.5. tabula

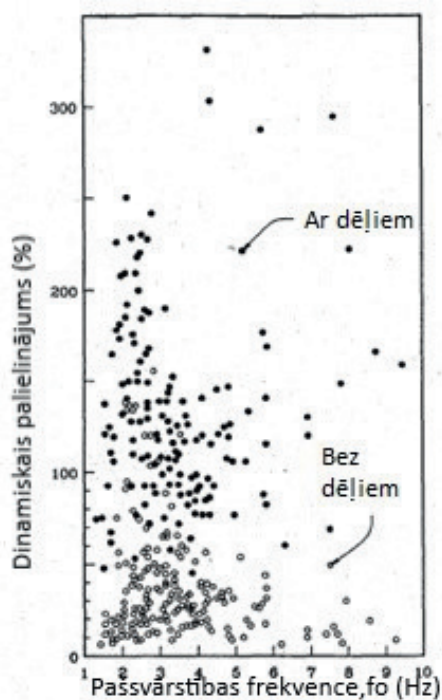
Pirmās formas pašsvārstību frekvence dažāda slīpuma tiltiem

Novietojuma slīpums	Pašsvārstību frekvence, Hz	Periods T , s
0°	6,15	0,163
15°	6,49	0,154
30°	7,69	0,13
45°	10,32	0,096

Kā redzams 3.5. tabulā, palielinoties plātnes slīpumam, pieaug pirmās svārstību formas frekvence, kā arī parādās vērpes svārstību formas, kas konstrukcijā rada vērpes spēkus.

Brauktuves seguma līdzenums

Analīzes rezultāti, kas aprakstīti 3. nodaļā, liecina, ka galvenais dinamiskā koeficienta palielinājuma iemesls ir autoceļa seguma nepilnības. Jebkurš autoceļa nelīdzenums – asfalta izdrupums, nelīdzena deformācijas šuve vai ledus ziemas apstākļos – rada papildu slodzi automašīnas piekares sistēmai, ko pēc tam automašīna pārnes uz tilta konstrukciju [99]. Šī ietekme ir parādīta arī 3.1. attēlā, kur redzams dinamiskā koeficienta palielinājums

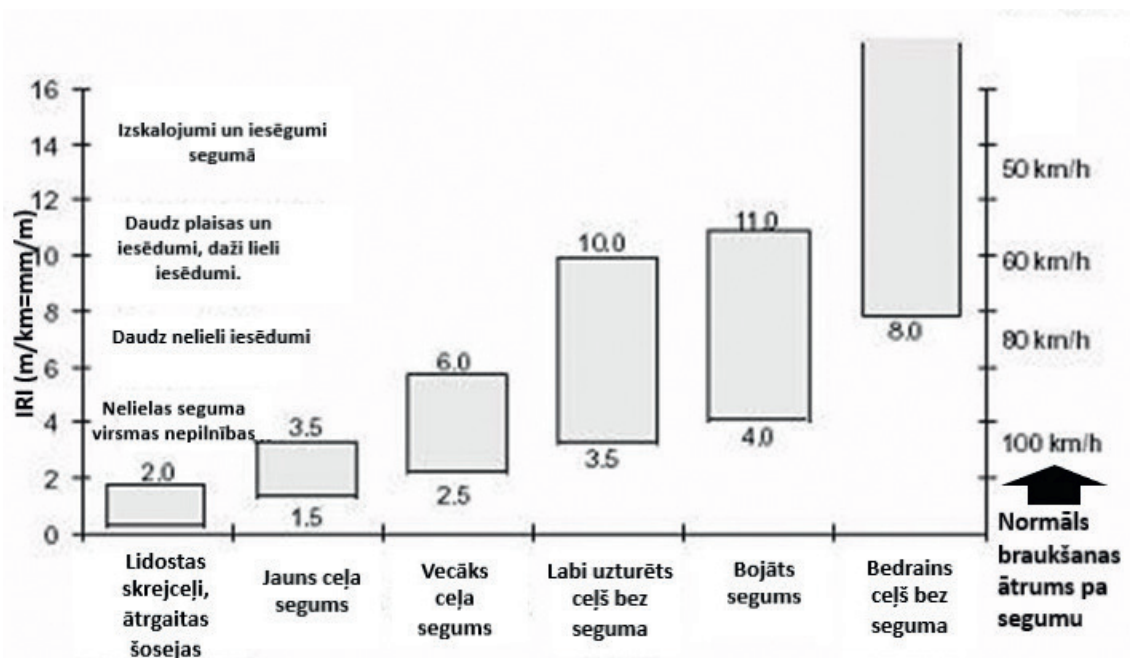


3.1. att. Ceļa seguma nelīdzenuma ietekme uz dinamisko koeficientu [56].

līdzenam un nelīdzenam segumam. Attēlā redzams, ka segumam ar dēļiem minimālais palielinājums ir 43 %, vidējais – 130 %, maksimālais – 450 %, savukārt bez dēļiem minimālais – 2 %, vidējais – 30 %, maksimālais – 102 % [56].

Autoceļiem līdzenumu raksturo, izmantojot starptautisko nelīdzenuma indeksu *IRI* (angļu val. *international roughness index*). Šo indeksu pagājušā gadsimta astoņdesmitajos gados izstrādāja Pasaules Banka, un tas tika ieviests 1986. gadā.

Starptautiskais nelīdzenuma indekss *IRI* tiek izmantots, lai noteiktu autoceļa seguma nelīdzenumu garenvirzienā. Ieteicamās starptautiskā nelīdzenuma indeksa



3.2. att. Starptautiskais nelīdzenuma indekss *IRI* (tulkots no angļu valodas) [100].

IRI mērvienības ir metri uz kilometru (m/km) vai milimetri uz metru (mm/m). *IRI* skaitlisko vērtību aprēķina, dalot standarta transportlīdzekļa piekares sistēmas pārvietojumu (mm, collas u. c.) ar attālumu, ko transportlīdzeklis veic mērīšanas laikā (km, m u. c.). *IRI* skala ir redzama 3.2. attēlā.

Jauniem tiltiem ceļa segums ir līdzens, un tas atbilst zemākajiem starptautiskā nelīdzenuma indeksa *IRI* rādītājiem, savukārt ekspluatācijā esošajiem tiltiem ar bojātu ceļa segumu starptautiskais nelīdzenuma indekss *IRI* ir daudz augstāks. Katra valsts starptautiskā nelīdzenuma indeksa *IRI* vērtības var noteikt atbilstoši savām prasībām [99].

Latvijā seguma nelīdzenumu mēra ar VSIA “Latvijas Valsts ceļi” īpašumā esošu lāzerprofilogrāfu, kas ceļa posmam var noteikt starptautisko nelīdzenuma indeksu *IRI*. Lai arī Latvijā nav veikta speciāla starptautiskā nelīdzenuma indeksa *IRI* noteikšana tiltiem, ir iespējams pielīdzināt ļoti nelīdzenus ceļa segumus nelīdzenam ceļa segumam uz tilta. “Ceļu specifikācijas 2019” [101] definē, ka jauniem asfaltbetona segumiem 20 m garos posmos starptautiskā nelīdzenuma indeksa *IRI* skaitliskā vērtība nedrīkst pārsniegt 2,5 mm/m. Latvijā 2018. gadā veiktajos mērījumos tika noteikts, ka jauniem asfalta segumiem *IRI* indekss ir zem 1 m/km. Šāda profila ceļa segumi neietekmē tilta dinamisko veiktspēju.

Zinātnieks *Sayers* [100] savā pētījumā ir noskaidrojis, ka starptautiskā nelīdzenuma indeksa *IRI* skaitliskā vērtība 6,0 m/km tiek uzskatīta par maksimālo, kas ir pieņemama kvalitatīviem autoceļu segumiem.

Tilta pārbaudei ar dinamisku slodzi, lai modelētu nelīdzenumu segumu uz brauktuves, tiek novietoti 4 cm augsti dēļu šķēršļi. Lai noteiktu, kādai seguma bojājuma pakāpei atbilst bojājumu modelis ar dēļu šķēršļiem, tika veikts eksperiments, kurā tika noteikts starptautiskais nelīdzenuma indekss *IRI* šādam seguma bojājumu modelim. Sadarbībā ar VSIA “Latvijas Valsts ceļi” Kompetences centru eksperiments tika veikts ar lāzerprofilogrāfu. Iegūtie rezultāti rādīja, ka vidējā izmērītā starptautiskā nelīdzenuma indeksa *IRI* vērtība šādam segumam ar dēļu šķēršļiem ir 6 mm/m.

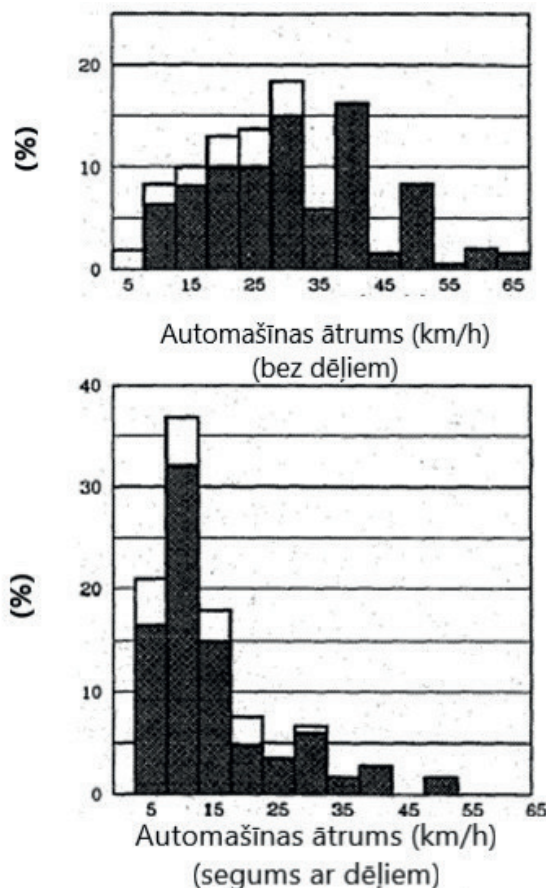
Apkopojot rezultātus, var secināt, ka par līdzenumu var uzskatīt segumu ar starptautisko nelīdzenuma indeksu *IRI* līdz 2,5, kā noteikts “Ceļu specifikācijās 2019”, par nelīdzenumu segumu var

uzskatīt tādu segumu, kura starptautiskais nelīdzenuma indekss *IRI* ir 2,5–6, par ļoti nelīdzenu segumu, ja starptautiskais nelīdzenuma indekss *IRI* pārsniedz 6.

Automašīnas ātrums

Dinamisko slodzi palielina ne tikai ceļa nelīdzenums, ļoti svarīgs lielums ir automašīnas pārvietošanās ātrums. Kā rāda 3. nodaļā apskatītie tilti, lielāks dinamiskais koeficients tiek iegūts, automašīnām braucot ar zemāku braukšanas ātrumu. To var izskaidrot ar automašīnas “pārlēkšanu” nelīdzenumiem, pārvietojoties ar lielu ātrumu, savukārt, braucot ar nelielu ātrumu, tiek uzbraukts katram nelīdzenumam uz seguma.

Smagās automašīnas rada divas vibrāciju formas: mašīnas konstrukcijas lēkāšana (angļu val. *body-bounce*), kas rodas vibrāciju frekvencēm no 2 Hz līdz 5 Hz, un riteņu pārlēkšana (angļu val. *wheel-hop*), kas rodas vibrāciju frekvencēm, kas ir lielākas par 7 Hz.



3.3. att. Ceļa seguma līdzenuma un automašīnas ātruma ietekme uz dinamiskā koeficienta palielinājumu [56].

Seguma līdzenums un automašīnas ātruma apvienojums veido šīs formas, tāpēc pārvietošanās ātrumam ir tik liela nozīme. Automašīnas ātruma ietekme uz dinamisko koeficientu redzama 3.3. attēlā. Augšējā attēlā parādīts segums bez bojājumiem, savukārt apakšējā attēlā – ar bojājumiem. Kritiskais ātrums ar nelīdzenumiem ir starp 5 km/h un 15 km/h [56].

Latvijā veiktajās tiltu pārbaudēs ar dinamisku slodzi ir iegūti līdzīgi rezultāti. Lielākais dinamiskais koeficients iegūts, automašīnai pārvietojoties ar ātrumu 20 km/h pa nelīdzenu ceļa segumu. Tāpēc Latvijā veiktajās pārbaudēs pie nelīdzena ceļa seguma kravas automašīnas pārbrauc tiltam ar ātrumu no 20 km/h līdz pat 60 km/h. Pārbraucot ar lielāku ātrumu pār 4 cm augstiem dēļiem, var rasties automašīnas piekares sistēmas bojājumi.

3.2. Tiltu dinamiskās veiktspējas novērtēšanas metode – dinamiskuma indekss (DI)

Kustīgā slodze konstrukcijā rada dinamisko slodzi, kas pie nelīdzena ceļa seguma var izraisīt vairāk nekā divas reizes lielāku slodzes palielinājumu nekā aprēķina statiskā slodze, tomēr precīzu konstrukcijas darbību dinamiskas slodzes ietekmē nav iespējams noteikt, neveicot tilta pārbaudi ar dinamisku slodzi. Tāpēc ir izstrādāta metode tiltu dinamiskās veiktspējas novērtēšanai, neveicot pārbaudi ar dinamisku slodzi. Ar jēdzienu “tilta dinamiskā veiktspēja” saprot tilta reakciju dinamiskās slodzes iedarbībā un to, vai tilta reakcija uz dinamisko slodzi var radīt tilta nestspējas samazinājumu.

Eiropkodeksā kā dinamisko veiktspēju izvērtējošs lielums tiek izmantots dinamiskais koeficients, tomēr bez pārbaudes ar dinamisku slodzi veikšanas to nav iespējams noteikt. Citi dinamiskie parametri (pašsvārstību frekvence, svārstību rimšanas koeficients) paši par sevi neraksturo konstrukcijas dinamisko veiktspēju, tāpēc tiek ieviests jauns dinamiskās veiktspējas novērtēšanas veids jeb dinamiskuma indekss (*DI*), kas apvieno piecus dinamisko veiktspēju raksturojošus parametrus. *DI* parāda tilta konstrukcijas potenciālu pārsniegt aprēķina slodzē iekļauto dinamiskās slodzes rezervi.

DI noteikšanas metode ir izstrādāta trīs Latvijā sastopamu dzelzsbetona tiltu veidiem (dzelzsbetona plātne, spriegbetona plātne ar vienu un vairākām ribām), jo katrai no šīm tiltu konstrukcijām ir

citāds dinamisko parametru vērtību diapazons, kas ietekmē konstrukcijas dinamisko veiktspēju.

No promocijas darba 3. nodaļā analizētajiem parametriem tika atlasīti pieci: laiduma garuma / konstrukcijas augstuma attiecība; relatīvā vertikālā deformācija; pašsvārstību frekvence; svārstību rimšanas koeficients; starptautiskais nelīdzenuma indekss *IRI*. Šo parametru vērtības dažāda veida tiltiem atšķirsies, tāpēc ir svarīgi zināt konstrukcijas veidu – saspriegta vai nesaspriegta konstrukcija, vienkārši balstīta vai rāmjuveida konstrukcija. Dati bija pieejami dzelzsbetona un spriegbetona plātņu tiltiem, tāpēc dinamiskuma indeksa aprēķins ir lietojams dzelzsbetona un spriegbetona plātņu tiltiem ar laiduma garumu no 7 līdz 34 metriem.

Svarīgi ir ņemt vērā, vai konstrukcijai ir kāds no dinamisko veiktspēju palielinošajiem konstruktīvajiem faktoriem. Tie ir:

- tilts novietots slīpi pret brauktuves asi;
- brauktuve atrodas uz šķērsriezuma konsoles daļas (saspriegtās konstrukcijas tiltiem).

Lai noteiktu *DI*, ir izveidota skala no 4 līdz 20, kur 4 norāda uz nelielu konstrukcijas dinamiskās veiktspējas līmeni, savukārt 20 – uz ļoti lielu konstrukcijas dinamiskās veiktspējas līmeni, kad dinamiskā slodze samazina konstrukcijas nestspēju.

Metodē tiek lietoti pieci kritēriji, kas raksturo tilta dinamisko veiktspēju. Kritēriji apzīmēti ar K1 līdz K5. Visi parametri ir nosakāmi konstrukcijai projektēšanas stadijā, izstrādājot matemātisko GEM modeli. Tie ir:

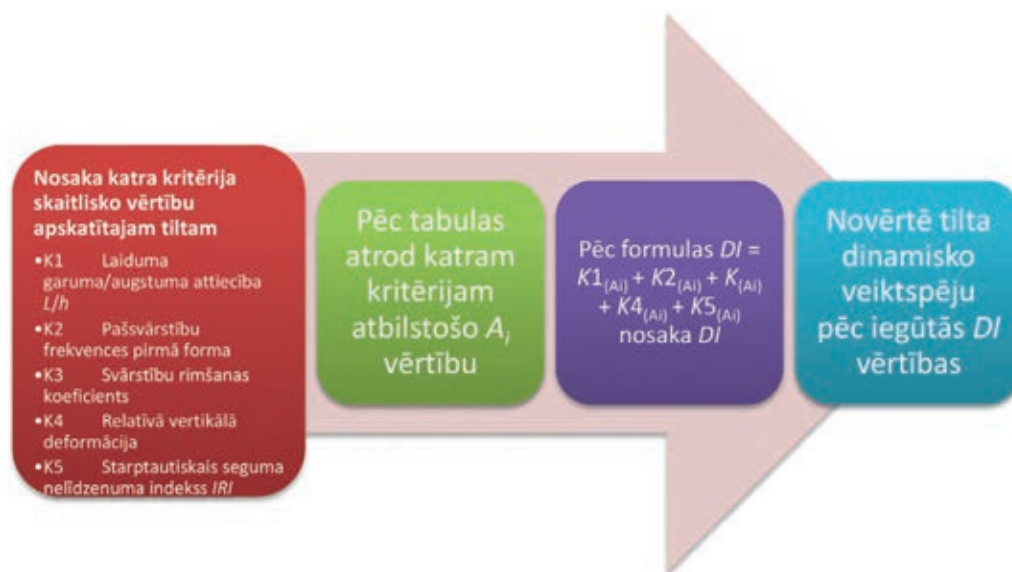
- 1) tilta laiduma konstrukcijas garuma/augstuma attiecība (K1);
- 2) pašsvārstību frekvences pirmā forma (K2);
- 3) svārstību rimšanas koeficients (šo lielumu aprēķinu procesā pieņem kā materiāla rimšanas koeficientu; K3);
- 4) laiduma relatīvā vertikālā deformācija, ar ko saprot tilta maksimālo statisko deformāciju attiecībā pret laiduma garumu (K4);
- 5) starptautiskais seguma nelīdzenuma indekss *IRI* (K5).

Jauniem tiltiem starptautiskais nelīdzenuma indekss *IRI* ir viszemākais – zem 2,5 mm/m, jo ir pilnīgi jauns segums, kas ieklāts atbilstoši 2019. gada Ceļu specifikācijām. Savukārt ekspluatācijā esošajiem tiltiem segums bieži ir ļoti nolietojies, jo nav veikti uzturēšanas darbi vai ir veikta bedrīšu aizlāpīšana, kas bieži padara segumu

ļoti nelīdzenu. Šādam ceļa segumam starptautiskais nelīdzenuma indekss *IRI* ir var būt 2,5–6 mm/m. Šīs vērtības arī izmantotas K5 kritērija vērtību diapazonam.

Metodes pamatā kritēriji K1 līdz K4, kas noteikti pēc 3.nodaļā veiktās analīzes katrai tiltu grupai, norāda uz vērtību diapazona daļu, kas liecina par lielāku dinamiku. Kritēriji K1–K5 pieņemti ar koeficientu 1, nenosakot kādu kritēriju par svarīgāku. Metodē lietotie dzelzsbetona un spriegbetona plātņu tiltu dinamisko raksturotāju jeb kritēriju (K1–K5) vērtību diapazoni ir iedalīti četrās daļās – no A1 līdz A4. Katra no daļām tiek novērtēta ar vērtību no 1 līdz 4, kur 1 liecina par nelielu dinamisko veiktspēju, savukārt 4 – par lielu. Katram no tiltu veidiem diapazons no A1 līdz A4 ir citādāks, tāpēc izveidotas trīs tabulas: 3.6. tabula – dzelzsbetona plātņu tiltiem; 3.8. tabula – spriegbetona plātņu tiltiem ar vienu ribi; 3.10. tabula – spriegbetona plātņu tiltiem ar vairākām ribām, kur atbilstoši tilta veidam un vērtību diapazoniem parādītas daļu A1 līdz A4 vērtības.

Katra kritērija diapazona daļas A vērtība tiek noteikta, ņemot vērā pārbaudāmā tilta dinamiskos rādītājus un diapazona daļu, kurā iekļaujas noteiktais kritērijs, iegūstot vērtību no 1 līdz 4. Šāds process tiek veikts visiem pieciem kritērijiem. Kad šīs vērtības ir saskaitītas, iegūst skaitli no 4 līdz 20, kas norāda konstrukcijas DI. 39. formula rāda, kā tiek aprēķināts DI:



3.4. att. DI noteikšanas algoritms.

$$DI = K1_{(Ai)} + K2_{(Ai)} + K3_{(Ai)} + K4_{(Ai)} + K5_{(Ai)}, \quad (39.)$$

kur:

$K1_{Ai}$ – kritērija K1 vērtība diapazonā no 1 līdz 4;

$K2_{Ai}$ – kritērija K2 vērtība diapazonā no 1 līdz 4;

$K3_{Ai}$ – kritērija K3 vērtība diapazonā no 1 līdz 4;

$K4_{Ai}$ – kritērija K4 vērtība diapazonā no 1 līdz 4;

$K5_{Ai}$ – kritērija K5 vērtība diapazonā no 1 līdz 4;

i – vērtība no 1 līdz 4.

3.4. attēlā parādīts DI noteikšanas algoritms. Ja dinamiskuma indekss ir lielāks par 10, tas liecina par dinamisko veiktspēju, kas ietekmē konstrukcijas nestspēju.

3.2.1. Dzelzsbetona plātnes tilti

Metode ir derīga tikai nepārtrauktas sistēmas plātņu tiltiem norādītajā kritēriju vērtību diapazonā. 3.6. tabulā redzami kritēriji un to vērtību sadalījums četrās daļās. Šādu tabulu izmanto

3.6. tabula

Dinamiskuma indeksa noteikšana rāmjeida dzelzsbetona plātņu tiltiem

	Kritērijs	A1	A2	A3	A4	DI
K1	Laiduma garuma / augstuma attiecība; L/h	16–20,5	20,6–24,9	25–29,5	29,5–34	$K1_{(Ai)}$
K2	Pašsvārstību frekvences pirmā forma	13,06–17	9,92–13,05	6,78–9,91	3,36–6,77	$K2_{(Ai)}$
K3	Svārstību rimšanas koeficients	0,0605–0,073	0,049–0,060	0,036–0,048	0,023–0,035	$K3_{(Ai)}$
K4	Relatīvā vertikālā deformācija	1/3400–1/2925	1/2924–1/2450	1/2449–1/1975	1/1974–1/1500	$K4_{(Ai)}$
K5	Starptautiskais seguma nelīdzenuma indekss IRI	$\leq 2,9$	2,9–4	4,1–5,0	5,1–6,0	$K5_{(Ai)}$
				Dinamiskuma indekss:		ΣK_j

dinamiskuma indeksa noteikšanai. Konkrētajam tiltam novērtē katru no kritērijiem.

3.7. tabulā norādītas dzelzsbetona plātņu tiltu metodē apskatīto kritēriju vērtības, kā arī dinamiskuma indekss. Katram tiltam dota

3.7. tabula

Tiltu parametru un aprēķinātās DI vērtības

Tilta nosaukums	Tilta sistēma: vienkārši balstīts (VB) / rāmis (R)	Tilta novietojums pret garenasi	Laiduma garuma / augstuma (L/H) attiecība	Aprēķinātā pirmās formas pašsvārstību frekvence, Hz	Svārstību rimšanas koeficients	Relatīvā vertikālā deformācija (laiduma garums / statiskā deformācija)	Lielākais dinamiskais koeficients (pa nelīdzenu brauktuvi)	Dinamiskuma indekss (max 16 p)
Tilts pār Gauju uz AC V235	Rāmis	Leņķis	34	3,36	0,046	1/1900	2,40	19
Tilts pār Seceni uz AC P76 Aizkraukle-Jēkabpils	Rāmis	Leņķis	25	6,6	0,023	1/1500	2,70	19
Tilts pār Lauces upi uz AC P87 Bauska-Aizkraukle	VB	Taisni	23	8,88	0,046	1/2030	2,00	15
Tilts pār Dzirlas upi uz AC P035 Gulbene-Balvi	Rāmis	Taisni	16	9,78	0,073	1/3200	2,04	10
Tilts pār Līčupi uz AC A3	Rāmis	Taisni	20	17	0,065	1/3400	1,30	8

arī dinamiskā koeficienta vērtība, kas parāda pārbaudē ar dinamisku slodzi noteikto reālo tilta dinamisko veiktspēju.

Rezultāti rāda, ka pie nelīdzenas brauktuves dinamiskuma indekss ir ļoti augsts tiltiem, kas novietoti slīpi pret brauktuves garenasi. Tātad šo tiltu konstrukcija pie nelīdzenas brauktuves var tikt pakļauta slodzēm, kas ietekmē tilta nestspēju.

3.2.2. Saspriegtās dzelzsbetona plātnes

Metode ir derīga tikai rāmjveida saspriegtās dzelzsbetona plātnes tiltiem. 3.8. tabulā apkopoti kritēriji un to vērtības saspriegtās konstrukcijas rāmjveida tiltiem.

3.8. tabula

Dinamiskuma indeksa noteikšana rāmjveida saspriegta dzelzsbetona plātņu tiltiem

	Kritērijs	A1	A2	A3	A4	DI
K1	Laiduma garuma / augstuma attiecība; L/h	22	24	25	26	$K1_{(Ai)}$
K2	Pašsvārstību frekvences pirmā forma	3,0–3,62	3,63–4,24	4,25–4,86	4,85–5,5	$K2_{(Ai)}$
K3	Svārstību rimšanas koeficients	0,02–0,025	0,026–0,03	0,031–0,036	0,0036–0,04	$K3_{(Ai)}$
K4	Relatīvā vertikālā deformācija	1/1900–1/2050	1/2051–1/2200	1/2210–1/2350	1/2351–1/2500	$K4_{(Ai)}$
K5	Starptautiskais seguma nelīdzenuma indekss IRI	2,9–3,65	3,65–4,43	4,44–5,2	5,21–6	$K5_{(Ai)}$
Dinamiskuma indekss:						ΣK_j

3.9. tabulā apkopotas apskatīto saspriegtās konstrukcijas plātņu tiltu metodē apskatīto kritēriju vērtības, kā arī dinamiskuma indekss. Katram tiltam dota arī dinamiskā koeficienta vērtība, kas rāda pārbaudē ar dinamisku slodzi noteikto reālo tilta dinamisko veiktspēju. Lai arī nav noteikts, kā dinamiskais koeficients korelē ar dinamiskuma indeksu, ir redzams, ka tiltam ar lielāko dinamisko koeficientu arī dinamiskuma indekss ir ļoti augsts – 17 no 20.

Dinamiskuma indeksa vērtības

Nosaukums	Tilta sistēma: vienkārši balstīts / rāmis	Brauktuve uz konsoles J/N	Laiduma garuma / augstuma (L/H) attiecība	Aprēķinātā pirmās formas pašsvārstību frekvence, Hz	Svārstību rimšanas koeficients	Relatīvā vertikālā deformācija (laiduma garums / statiskā deformācija)	Lielākais dinamiskais koeficients	Dinamiskuma indekss (max 20 p)
Tilts uz AC A12 pār dzelzceļu Rīga-Rēzekne	Vienkārši balstīts	Jā	24	3,0	0,02	1/1900	1,5	9
Ceļa pārvads pār dzelzceļu Rīga-Krustpils 95,214 km	Rāmis	Jā	25	5	0,03	1/2500	3,5	17
Tilts pār Pedeles upi Valkā	Rāmis	Nē	22	4,47	0,04	1/2090	2,1	15
Tilts pār Dzelzceļu Jelgava-Tukums uz AC A9 Rīga-Liepāja	Rāmis	Jā	26	5,5	0,03	1/2020	1,9	15

3.2.3. Saspriegtas konstrukcijas ribotu plātņu tilti

Metode derīga tikai nepārtrauktas konstrukcijas tiltiem ar kritēriju vērtībām konkrētajos metodes diapazonos. 3.10. tabulā apkopoti kritēriji un to vērtības saspriegtas konstrukcijas rāmjuveida tiltiem.

Dinamiskuma indeksa noteikšana nepārtrauktas konstrukcijas saspriegtū ribotu plātņu tiltiem

	Kritērijs	A1	A2	A3	A4	DI
K1	Laiduma garuma / augstuma attiecība; L/h	19–21	21,1–23	23,1–25	25,1–27	$K1_{(Ai)}$
K2	Pašsvārstību frekvences pirmā forma	7,3–6,38	6,37–5,57	5,56–4,76	4,75–3,0	$K2_{(Ai)}$
K3	Svārstību rimšanas koeficients	0,02–0,03	0,031–0,04	0,041–0,05	0,051–0,06	$K3_{(Ai)}$
K4	Relatīvā vertikālā deformācija	1/2500–1/3145	1/3156–1/3790	1/3791–1/4435	1/4436–1/5080	$K4_{(Ai)}$
K5	Starptautiskais seguma nelīdzenuma indekss IRI	2,9–3,68	3,69–4,46	4,47–5,24	5,24–6	$K5_{(Ai)}$
				Dinamiskuma indekss: ΣK_j		

3.11. tabulā apkopotas apskatīto saspriegtās konstrukcijas ribotu plātņu tiltu metodē apskatīto kritēriju vērtības, kā arī dinamiskuma indekss. Katram tiltam dota arī dinamiskā koeficienta vērtība, kas rāda pārbaudē ar dinamisku slodzi noteikto reālo tilta dinamisko veiktspēju.

Izstrādātā metode ir derīga norādīto tiltu veidiem definēto kritēriju diapazonos. 3.12. tabulā redzams, ka, izvērtējot 3.11. tabulā norādītos kritērijus, dinamiskuma indeksa tendence ir līdzīga dinamiskā koeficienta vērtību tendencei, tāpēc var teikt, ka šāda piecu kritēriju metode ļauj novērtēt tilta dinamisko veiktspēju bez pārbaudes ar dinamisku slodzi veikšanas vai noteikt nepieciešamību veikt pārbaudi ar dinamisku slodzi. Ja aprēķinātā dinamiskuma indeksa vērtība ir lielāka par 12, tilta dinamiskās veiktspējas līmeni var uzskatīt par augstu un būtu vēlams veikt tilta pārbaudi ar dinamisku slodzi.

Dinamiskuma indeksa vērtības

Nosaukums	Tilta sistēma: vienkārši balstīts / rāmis	Tilta novietojums pret garenasi	Laiduma garuma / augstuma (L/H) attiecība	Aprēķinātā pirmās formas pašsvārstību frekvence (Hz)	Svārstību rimšanas koeficients	Relatīvā vertikālā deformācija (laiduma garums / statiskā deformācija)	Lielākais dinamiskais koeficients	Dinamiskuma indekss (<i>max 20 p</i>)
Ceļa pārvads uz AC A6 Rīga-Baltkrievijas robeža	Rāmis	Taisni	20	6,0	0,02	1/2500	1,7	9
Tilts pār upi Dīvāja uz AC A6	Vienkārši balstīts	Slīps	19	7,3	0,03	1/4550	2,0	11
Ceļa pārvads uz AC P8 pār AC E22 ($R = 6000$ m)	Rāmis	Taisni	25	4,0	0,06	1/3470	5,6	17
Ceļa pārvads uz AC E22 pār AC V920	Rāmis	Taisni	27	4,9	0,06	1/5080	4,1	19

Dinamiskuma indeksa metodi var lietot pasūtītājs un infrastruktūras pārvaldītājs (VSIA “Latvijas Valsts ceļi”, AS “Latvijas valsts meži” vai pašvaldības), lai novērtētu, vai konkrētās konstrukcijas tiltam esošais ceļa segums var radīt nestspējas samazinājumu un vai konkrētajam tiltam ir nepieciešams veikt pārbaudi ar dinamisku slodzi.

4. SIJU TILTU PIEĻAUJAMIE DINAMISKIE KOEFICIENTI

Dinamiskā koeficienta lielāko pieļaujamo vērtību no nestspējas viedokļa var aprēķināt tikai konkrētai konstrukcijai un konkrētai slodzei, jo dinamiskā koeficienta vērtība ir apgriezti proporcionāla slodzes un konstrukcijas masai. Pārsniedzot šo dinamiskā koeficienta vērtību, konstrukcija nesabruks, taču tajā var rasties bojājumi, kas samazina nestspēju.

Kustīgās slodzes dinamiskā koeficienta vērtība ir saistīta ar tilta laiduma konstrukcijas ģeometriskajiem un materiāla īpašību raksturotājiem, kā arī ar slodzes veidu (autotransporta slodze, dzelzceļa ritošais sastāvs, gājēju slodze utt.), tāpēc arī tipveida konstrukcijām, lai arī ar vienādu laiduma garumu, dinamiskie koeficienti ir atšķirīgi.

Uz Latvijas autoceļiem vairums tiltu un pārvadu (aptuveni 90 %) ir būvēti no tipveida konstrukcijām atbilstoši autotransporta slodzēm pēc shēmām *N-13*, *N-18*, *N-30* un atsevišķām smagsvara transporta vienībām *NG-60*, *NG-80*.

Šodienas autotransporta plūsmā MK 2015. gada 2. jūnija noteikumu Nr. 279 "Ceļu satiksmes noteikumi" 2. pielikumā atļautā lielākā nekontrolētā transporta vienība ir *K44* – sešas konteinervedējs ar normatīvo masu 44 t un kopējo garumu 13,4 m. Aprēķinos tiek izmantota minētā *K44* slodze, jo tā ir ikdienas apstākļos maksimāli pieļaujamā smagsvara slodze. Pārbaudēs ar dinamisku slodzi šādas masas automašīnas neizmanto, jo tās nelīdzena seguma apstākļos konstrukcijā var radīt spēkus, kas atstās paliekošus bojājumus.

Maksimālā pieļaujamā dinamiskā koeficienta vērtības noteikšanai tika izmantota šāda aprēķina metode.

1. Zinot šķērsriezuma izmērus un stiegrojuma daudzumu, nosaka sijas maksimāli pieļaujamo piepūli vai spriegumu E_{Rd} , kN·m vai N/mm².
2. Nosaka konstrukcijas pašvara ierosināto maksimālo piepūli vai spriegumu M_g , kN·m vai N/mm².
3. Nosaka starpību $E_{Rd,i} - E_{g,i}$, kas parāda kustīgās slodzes lielāko pieļaujamo piepūli E_p .

4. Nosaka $E_{p,i}$, kas ir konkrētās kustīgās slodzes ierosinātā maksimālā piepūle vai spriegums konstrukcijā. Šajā gadījumā tā ir ikdienas maksimāli pieļaujamā slodze *K44*.
5. Lielāko pieļaujamo dinamiskā koeficienta vērtību nosaka pēc 40. formulas, kur lielākā pieļaujamā dinamiskā koeficienta vērtība ir attiecība $E_p/E_{p,i}$.

$$\text{Maksimāli pieļaujamā dinamiskā koeficienta vērtība} = \frac{E_{Rd,i} - E_{g,i}}{E_{p,i}} \quad (40.)$$

kur:

$E_{Rd,i}$ – konstrukcijas visvairāk nologotā elementa vai šķēluma pieļaujamā lielākā piepūle vai spriegumi, kN·m vai N/mm²;

$E_{g,i}$ – konstrukcijas pašsvara ierosinātā piepūle, kN·m vai N/mm²;

$E_{p,i}$ – konkrētās kustīgās slodzes statiskās iedarbības ierosinātā lielākā normatīvā piepūle vai spriegumi, kN·m vai N/mm²;

i – visvairāk noslogotākais šķēlums vai konstrukcijas elements.

Aprēķins veikts šādām tipveida laiduma konstrukcijām:

- dzelzsbetona sijas ar karkasa veida stiegrojumu (izgatavotas pēc 56. tipa projekta rasējumiem (ar un bez diafragmām));
- spriegbetona (stīgbetona) sijas ar un bez diafragmām;
- spriegbetona sijas ar stieplu kūļiem.

Latvijā pārbaudes ar dinamisku slodzi notiek tikai jauniem vai rekonstruētiem tiltiem, tāpēc šādām tipveida dzelzsbetona konstrukcijām nav daudz pārbažu ar dinamisku slodzi rezultātu. Tomēr, pēc rekonstrukcijas veicot pārbaudi ar dinamisku slodzi, ir iespējams salīdzināt reālās dinamiskā koeficienta vērtības ar konkrētajai tipveida konstrukcijai maksimāli pieļaujamo.

Maksimālās pieļaujamās dinamiskā koeficienta vērtības tipveida dzelzsbetona un spriegbetona siju tiltiem apkopotas 4.1. tabulā. Viszemākais maksimāli pieļaujamais dinamiskais koeficients ir dzelzsbetona siju tiltiem ar karkasa stiegrojumu ar diafragmām, kas ir tikai 1,4. Tas liecina par 40 % rezervi dinamiskās slodzes uzņemšanai. Otra zemākā rezerve ir stīgbetona sijām ar diafragmām. Savukārt vislielākais maksimāli pieļaujamais dinamiskais koeficients ir dzelzsbetona siju tiltiem ar karkasa stiegrojumu bez diafragmām – 4,4.

Tipveida siju dinamiskais koeficients ir atkarīgs no laiduma garuma, tāpēc, izmantojot šos rezultātus, jāņem vērā ne tikai siju veids, bet arī laiduma garums, un tad jānosaka maksimāli pieļaujamais dinamiskais koeficients, kas ir zemākā dinamiskā koeficienta vērtība. Pārsniedzot šo dinamiskā koeficienta vērtību, konstrukcija nesabruks, taču tajā var rasties bojājumi, kas samazina tilta nestspēju.

4.1. tabula

Maksimālās pieļaujamās dinamiskā koeficienta vērtības tipveida siju tiltiem

Tilta tips	Dinamiskā koeficienta vērtību diapazons				
	$L = 8,66 \text{ m}$	$L = 11,36 \text{ m}$	$L = 14,06 \text{ m}$	$L = 16,76 \text{ m}$	$L = 22,16 \text{ m}$
Karkasa stiegrojuma sijas ar diafragmām	1,4–2,9	1,6–2,8	1,6–2,4	2,4	1,8–3,2
Karkasa stiegrojuma sijas bez diafragmām	2,5–3,1	2,9–3,5	3,2–4,4	2,9–4,4	–
Stīgbetona sijas ar diafragmām	–	2,2–2,8	2,3–2,7	1,7–2,5	–
Stīgbetona bezdiafragmu sijas	–	3,5–3,8	3–3,5	2,6–3,8	–
Spriegbetona (stieplu kūļi) sijas	–	–	–	2,4–3,3	2,2–3,8

Rezultātu analīzē 3. nodaļā tika apskatīti trīs spriegbetona siju tilti, no kuriem diviem ir tipveida siju tiltu rekonstrukcijas. Tilts pār Iecavas upi ir stīgbetona siju tilts bez diafragmām ar laidumu 11,36 m. Šim tiltam izmērītais dinamiskais koeficients ir 3,1, kas ir par 19 % mazāk nekā analītiski noteiktā maksimālā pieļaujamā vērtība 3,8. Savukārt tiltam pār Juglas kanālu Rīgā (laidumu veido dubulta T profila spriegbetona bez diafragmu sijas ar laidumu 22,16 m) eksperimentāli izmērītais dinamiskais koeficients ir 1,32,

kas ir par 40 % mazāk nekā analītiski noteiktā maksimāli pieļaujamā vērtība 2,2.

Tipveida projektu tilti Latvijā vairs netiek būvēti, tomēr šādu tiltu daudzums Latvijā ir ap 90 % no kopējā tiltu skaita. Piedāvātā metode ļauj novērtēt rekonstruēto tiltu nestspējas rezervi dinamiskās slodzes uzņemšanai un salīdzināt to ar eksperimentāli iegūtajām dinamiskā koeficienta vērtībām, tā nosakot, vai tiltam ir pietiekama dinamiskā rezerve MK 2015. gada 2. jūnija noteikumu Nr. 279 „Ceļu satiksmes noteikumi” 2. pielikumā maksimāli pieļaujamās smagsvara slodzes *K44* uzņemšanai.

5. REKOMENDĀCIJAS DINAMISKO RAKSTUROJUMU VĒRTĪBU IEKĻĀUŠANAI *LVS 190-11* "TILTU INSPEKCIJA UN PĀRBAUDE AR SLODZI"

Pamatojoties uz promocijas darbā veikto pētījumu rezultātiem, ir sagatavoti ieteikumi standarta *LVS 190-11* "Tiltu inspekcija un pārbaude ar slodzi" 7.3. un 7.4. nodaļā iekļautās informācijas papildināšanai.

Papildinājumi 7.3. un 7.4. nodaļā balstīti uz disertācijas 2. nodaļā izstrādāto metodiku tilta pārbaudei ar dinamisku slodzi un 3.1. apakšnodaļā veikto tiltu dinamisko parametru analīzi.

Papildinājumi 7.3. nodaļā

1. Iekļaut punktu "Pirms pārbaudes ar dinamisku slodzi veikšanas":
 - jāveic tilta tehniskā stāvokļa novērtējums, nosakot, vai konstrukcijai nav kādi nestspēju samazinoši bojājumi;
 - jāveic pilns tilta aprēķins, nosakot vietas, kurās jānovieto mērierīces, lai iegūtu visprecīzākos tilta dinamiskos rādītājus;
 - jā sastāda pārbaudes programma, norādot, kas tiks mērīts, ar kādām mērierīcēm un kādas slodzes tiks izmantotas.
2. Papildināt punktu "Dinamiskās slodzes radīšanai var izmantot piekrautu transportlīdzekli, kāds ikdienā varētu šķērsot tilta konstrukcijas un tajās radīt nelabvēlīgus dinamiskos efektus" ar šādu teikumu: "Visi transportlīdzekļi, kas tiek izmantoti pārbaudē, ir jānosver, lai pēc tam novērtētu konkrētās slodzes iedarbību uz laiduma konstrukciju.
3. Papildināt punktu "Tilta pārbaudes laikā transporta līdzeklim vairākas reizes jāpārbrauc laiduma konstrukcija pie dažādiem kustības ātrumiem" ar šādu teikumu: "Transportlīdzekļiem pārbaudes laikā jāšķērsos tilts ar ātrumu 20 km/h, 40 km/h, 60 km/h un, ja nepieciešams, ar ātrumu līdz atļautajam braukšanas ātrumam tilta atrašanās vietā. Braucieni jāveic pa līdzenu un nelīdzenu brauktuves segumu".

4. Rekomendēju izmainīt teikumu "Lai noteiktu konstrukcijas dinamiskos raksturojumus, var izmantot kustīgās, triecienu, vibrāciju slodzes, kas var izraisīt noturīgu svārstību (tai skaitā brīvo svārstību) rašanos." šādā redakcijā: "Lai radītu konstrukcijā gan brīvās svārstības, gan uzspiestās svārstības, pārbaudē ar dinamisku slodzi var izmantot kustīgās, triecienslodzes un vibrāciju slodzes."
5. Papildināt punktu "Tilta pārbaudes laikā ir jāpieraksta svārstību raksturojumi (vibrogrammas), izmantojot speciālu aparāturu svārstību pierakstīšanai" ar teikumu "Tiltu dinamiskos parametrus ierakstīt, izmantojot pārvietojumu, spriegumu un paātrinājumu mērierīces. Akselerometru paraugu ņemšanas frekvencei jābūt vismaz divas reizes lielākai nekā frekvencēm, ko paredzēts ierakstīt."

Papildinājumi 7.4. nodaļā

1. Iekļaut punktu "Pārbaudes ar dinamisku slodzi rezultātu izvērtējums".
2. Iekļaut punktu "Veikt pārbaudes ar dinamisku slodzi iegūto pārvietojumu un pašsvārstības frekvences salīdzinājumu ar analītiski aprēķināto".
3. Iekļaut punktu "Izmērītā pašsvārstību frekvence jāsalīdzina ar analītiski aprēķināto. Ja atšķirība starp vērtībām ir vairāk par 10 %, jāveic konstrukcijas aprēķina modeļa korekcija, pamatojoties uz eksperimentā iegūtajiem datiem".
4. Iekļaut punktu "Ja tilta pašsvārstību frekvence ir robežās no 3 Hz līdz 6 Hz, ir rekomendējams pārbaudīt, vai konstrukcijas dinamiskais koeficients līdzinai brauktuvei ir zem *LVS EN 1991-2* slodzes modelī *LM1* paredzētās vērtības 1,4".
5. Iekļaut punktu "Ja pēc pārbaudes ar dinamisku slodzi datu analīzes dinamiskais koeficients pie līdzena ceļa seguma tiek iegūts lielāks par 1,4, aprēķina modelī slodzes drošības koeficients ir jāizmaina atbilstoši iegūtajai dinamiskā koeficienta vērtībai un jāpārbauda konstrukcijas nestspēja, ņemot vērā eksperimentāli noteikto dinamiskā koeficienta vērtību".

SECINĀJUMI

Izstrādāta metode tiltu dinamiskās veiktspējas novērtēšanai, izmantojot autoceļu tiltu pārbaudēs ar dinamisku slodzi eksperimentāli iegūtos dinamisko raksturlielumu datus, lietojot negraujošas svārstību analīzes un datorizētas datu nolasīšanas metodes, ņemot vērā tilta brauktuves virsmas līdzenuma raksturojumus, kā arī piemērojot šo metodi ekspluatācijā esošu tiltu dinamiskās veiktspējas novērtēšanai. Izstrādāti priekšlikumi Latvijas Republikā patlaban spēkā esoša standarta *LVS 190-11* "Tiltu inspekcija un pārbaude ar slodzi" 7.3. un 7.4. nodaļas papildināšanai ar dinamisko raksturojumu eksperimentālas noteikšanas metodiku un pārbaudes rezultātā iegūto dinamisko raksturojumu novērtēšanai.

1. Izstrādāta dzelzsbetona un spriegbetona plātņu tiltu dinamisko raksturlielumu iegūšanas un novērtēšanas metodika pārbaudei ar konkrētu slodzi.
2. Eksperimentāli noteiktā dinamiskā koeficienta vidējā skaitliskās vērtības tiltiem, kas projektēti saskaņā ar Eirokodeksu prasībām, t. i., pēc 2000. gada (līdzenai brauktuvei), 97 % gadījumu ir no 1 līdz 1,4. Iegūtā vērtība ir mazāka nekā Eirokodeksā (no 1,4 līdz 1,7 atkarībā no laiduma garuma) noteiktajām raksturīgajām satiksmes slodzēm slodzes modelim *LM1*.
3. Eksperimentāli noteiktā dinamiskā koeficienta vidējās skaitliskās vērtības tiltiem, kas projektēti pirms 2000. gada (līdzenai brauktuvei), 88 % gadījumu ir 1,1, kas ir mazāk nekā *SNIP* būvnormās noteiktā dinamiskā koeficienta vērtība $(1 + \mu) = 1,2$.
4. Eksperimentāli pierādīts, ka seguma līdzenums un automašīnas ātrums ietekmē tilta dinamisko koeficientu.
5. Noteikts, ka par lielu tilta dinamisko veiktspēju norāda dzelzsbetona tiltu pašsvārstību frekvence robežās no 3 Hz līdz 6 Hz.
6. Izstrādātā tiltu **dinamiskuma indeksa** noteikšanas metode ļauj novērtēt jau ekspluatācijā esošu un jaunu tiltu konstrukciju dinamisko veiktspēju skalā no 4 līdz 20. Dinamiskuma indeksa aprēķina metode ļauj bez pārbaudes ar dinamisku slodzi noteikt tilta konstrukcijas dinamiskās veiktspējas līmeni, ņemot vērā laiduma garuma / augstuma attiecību, aprēķināto pašsvārstību frekvences pirmo formu, svārstību rimšanas

koeficientu, relatīvo vertikālo deformāciju un starptautisko nelīdzenuma indeksu *IRI*.

7. Noteiktās dzelzsbetona un spriegbetona siju tiltu maksimāli pieļaujamās dinamiskā koeficienta vērtības MK 2015. gada 2. jūnija noteikumu Nr. 279 "Ceļu satiksmes noteikumi" 2. pielikumā maksimāli pieļaujamajai smagsvara satiksmes slodzei parāda siju tiltu pieļaujamo nestspējas rezervi dinamiskās slodzes uzņemšanai. Viszemākā dinamiskā koeficienta rezerve tika aprēķināta dzelzsbetona sijām ar karkasa stiegrojumu ar diafragmām un laiduma garumu 8,66 m. Dinamiskais koeficients šādai konstrukcijai ir 1,4, kas liecina par 40 % rezervi dinamiskās slodzes uzņemšanai.
8. Izstrādātas rekomendācijas *LVS 190-11* "Tiltu inspekcija un pārbaude ar slodzi" 7.3. un 7.4. nodaļas papildināšanai. 7.3. nodaļa papildināta ar norādījumiem dinamiskās pārbaudes veikšanai un sagatavošanai. 7.4. nodaļa papildināta ar norādījumiem dinamiskā koeficienta un pašsvārstību frekvences novērtēšanai.

GENERAL DESCRIPTION OF THE THESIS

Importance of the topic

The study of the dynamic properties of bridges and the improvement of research methods are important factors when analysing bridge performance, stability and service life. In recent years, the number of trucks on Latvian roads have been growing rapidly. Longer and heavier vehicles are being used to increase their efficiency. The European Union Directive 96/53/EC of 1996 (EU, 1996) determines vehicles' permissible length and total weight. Maximum length of a road train must not exceed 18.75 m, width 2.55 m; the weight of a three-axle vehicle with a three-axle trailer on a road train must not exceed 40 t, except for an ISO 40-foot container carrier – 44 t. Section 4 of the European Union Directive 96/53/EC allows longer road trains on the Member States roads if a modular transport system is used. Many countries use this point to develop the use of heavy vehicles for freight transport. For example, in Sweden, modular vehicles up to 25.25 m in length and up to 60 t can be used, while in Finland 9-axle modular vehicles up to 76 t can be used. The use of high load capacity vehicles in the Scandinavian countries is mainly due to their desire to reduce harmful emissions. However, as the length and weight of vehicles increase, bridges with high values of dynamic characteristics are subjected to increased dynamic loads, thus accelerating the deterioration of structures and creating risks of reduced load-carrying capacity.

Part 2 of the Eurocode LVS EN 1991 "Traffic loads for bridges" gives design loads, which already include the dynamic effects. Eurocodes are intended for the design of new bridge structures. At the same time, out of 971 bridges owned by Latvian State Roads, State-Owned Limited Liability Company, 51 % were built more than 50 years ago, 70 % – more than 40 years ago and 82 % – more than 30 years ago. Most of the bridges in cities were also built more than 40 years ago. The data of the bridge maintenance system LatBRUTUS of Latvian State Roads show that 59 % of all bridges have varying degrees of damage due to an aggressive external environment and

increasing traffic load. These damages can reduce bridge service life and increase risks for traffic safety.

The dynamic increase in traffic load is closely related to the evenness of the bridge pavement and the speed and mass of vehicles. Cracks and potholes in the road pavement create additional vibrations and stresses in the bridge superstructure, which are not considered during the bridge design. The Eurocodes do not specify how the dynamic characteristics of bridges in operation are to be assessed, nor do they give permissible or unacceptable values for dynamic characteristics.

In Europe and in other places in the world, several extensive research projects have been developed to study the dynamic properties of bridges and the effects of dynamic loads. The SAMARIS project carried out within the 5th Framework Program found that as the proportion of heavy vehicles on European roads increased, the value of the dynamic amplification factor increased compared to what was stated in the building regulations. The study compares the results of bridge tests with dynamic loads and data obtained by theoretical models. However, the conclusions of the study do not provide recommendations on how to evaluate the obtained results.

The research project "ARCHES", carried out within the 6th Framework Program summarizes information on different national approaches of studying the bridge dynamic properties. However, in the findings of the literature review in Chapter 1 of the dissertation, dynamic characteristics of bridges and their impact assessment or their recommended values for bridges of different constructions are not given. Most of the bridges included in the research are new structures, therefore the dynamic characteristics of existing or reconstructed bridges have not been extensively studied.

In Latvia, 93 % of all bridges are reinforced concrete and prestressed concrete bridges, 5 % – steel bridges, 2 % – masonry and timber bridges. Looking at the bridges by type of construction, it can be concluded that 69 % of the bridges built in Latvia have reinforced concrete and prestressed concrete beams, 25 % are prestressed concrete slab bridges with spans up to 30 meters. Therefore, the main focus of this research is on the dynamic properties of reinforced concrete bridges.

Eurocode LVS EN 1991 Part 2 “Traffic loads on bridges” does not provide values of the dynamic amplification factor for road bridges that could be used to assess the load-carrying capacity and safety of existing or reconstructed bridges for actual loads or load models selected by the contracting authority. No building code provides methods or instructions on how to evaluate the experimentally obtained dynamic characteristics of a bridge and the dynamic performance of the bridges and if a bridge’s response to a dynamic load can lead to a reduction in bridge load-carrying capacity. Therefore, it is necessary to develop a method for evaluating the dynamic performance of a bridge, thus increasing the bridges’ safety and service life.

Objective of the study

The aim of the dissertation is to develop a method to evaluate the dynamic performance of a bridge using experimentally obtained dynamic characteristics data from dynamic bridge tests, using non-destructive oscillation analysis, digital data reading and processing methods, and taking into account the pavement condition.

Tasks of the Thesis

To achieve the defined goal, several tasks must be solved.

1. Develop a dynamic bridge testing methodology which would allow to determine the dynamic parameters of the bridge taking into account the type of moving load, the type of bridge span, static scheme of the structure, and the road pavement unevenness.
2. Perform analysis of the dynamic characteristic parameters obtained from the dynamic load tests for different types of reinforced concrete bridges.
3. Based on the analysis results, determine the recommended limiting values for the dynamic characteristics of the bridge taking into account the type of bridge structure, static schemes and the road pavement unevenness.
4. Develop a method for evaluating the dynamic performance of a bridge without the need to perform a dynamic load test.

5. To develop recommendations for supplementing the Latvian state standard LVS 190-11 "Bridge inspection and testing with load" with:
 - a) specific requirements for bridge testing with dynamic load;
 - b) criteria for evaluating the values of the dynamic parameters obtained during the dynamic load test.

Theses to be defended

1. The developed dynamic bridge load testing method allows to determine the dynamic parameters of a bridge for a specific load for different pavement conditions.
2. From the bridge dynamic characteristic parameter analysis, values that indicate an increased dynamic performance of the structure are determined.
3. The developed method of the dynamic index allows to evaluate the level of the dynamic performance of existing and new bridge structures taking into account the following bridge parameters: span length/height ratio; natural frequency; vibration damping ratio; relative vertical deformation; international roughness index *IRI*.

Scientific novelty

A bridge load testing methodology with dynamic load was developed for obtaining and evaluating dynamic parameters of reinforced concrete and prestressed concrete slab bridges. The method takes into account the level of pavement unevenness.

A method called the dynamic index was developed to evaluate the dynamic performance of reinforced concrete and prestressed concrete slab bridges. The method allows to determine the level of bridge dynamic performance without carrying out a dynamic load test.

The maximum permissible dynamic amplification factor values for standard prestressed concrete and reinforced concrete girder bridges were determined. These values can be used to assess the safety of existing or reconstructed reinforced concrete girder bridges.

Practical application of the Thesis

A bridge dynamic load testing methodology for obtaining and evaluating dynamic parameters of reinforced concrete and prestressed concrete slab bridges was developed taking into account different road surface conditions. The practical significance of the developed methodology is related to preserving the transport infrastructure and assessing its technical condition.

The dynamics index method allows to evaluate the level of the dynamic performance of the bridge without performing a bridge dynamic load test. This method can be used by bridge owners and maintainers to determine if the uneven pavement of the bridge results in increased dynamic performance and if it is necessary to order a dynamic load test.

Maximum allowable dynamic amplification factor values for standard prestressed concrete and reinforced concrete girder bridges can be used to assess the safety of existing or reconstructed reinforced concrete girder bridges.

Supplementing the Latvian state standard LVS 190-11 “Bridge inspection and load testing” with specific requirements for the dynamic load testing and evaluation of the results obtained in the test will allow more accurate dynamic load testing and interpretation of obtained results.

Limitations of the research

The limitations of the research are based on the available data set used in the development of the new method. The dynamic index method is intended for reinforced concrete slab bridges, prestressed concrete frame slab bridges and ribbed slab bridges with a span length from 7 to 34 meters.

Equipment and methods used

The dissertation is based on the experimental determination of the dynamic parameters of new reinforced concrete and prestressed concrete bridges with digital measurement recording devices. The

research is based on the changes in displacements and stresses caused by moving loads and the analysis of the obtained diagrams.

Equipment used in the study

- Displacement measurements with Noptel PSM-200 (measurement frequency 50 Hz).
- Stress measurements with strain gauges connected to a multi-channel system SPIDER (measurement frequency 50 Hz).
- Acceleration measurements with X6-1a accelerometers (measurement frequency 50 Hz).
- A computer where all acquired digital measurements are recorded.

The obtained data were processed using the computer program Microsoft Excel (versions 2003 and 2010) and the signal and modal analysis program ME'Scope, where the data obtained by the accelerometer with the FFT algorithm are converted to natural frequencies. RPSM Win software was used to record and position data from the Noptel PSM-200 displacement sensor. Structural calculations were performed with FEM computer programs Lira and RFEM, which use modal analysis to determine the natural frequencies. Calculations of bridges were performed in compliance with the requirements of the Eurocodes, which are based on the limit state method.

Structure and volume of the Doctoral Thesis

The dissertation consists of an annotation, introduction, five main chapters divided into sections, conclusions, bibliography and an appendix.

The dissertation comprises 148 pages, 81 figures, 27 tables, 105 references and one appendix.

Chapter 1. Literature review. The chapter discusses the dynamic parameters and their calculation methods. Moving load caused oscillations in the structure and equipment for its measurements. The dynamic load inclusion in the traffic load models in different national standards.

Chapter 2 describes the dynamic load testing methodology for obtaining and evaluating the dynamic characteristics of bridges and the application of the methodology in bridge testing.

Chapter 3 analyses the reinforced concrete and prestressed concrete bridge dynamic parameters and determines dynamic parameter values that affect the dynamic performance of the bridge. A method for calculating the bridge dynamics index is described. It allows to evaluate the dynamic performance of a bridge without performing a dynamic load test.

Chapter 4 describes calculation of the maximum permissible dynamic amplification factor values of reinforced concrete and prestressed concrete beam bridges with spans from 8.66 to 22.16 m.

Chapter 5 presents recommendations for supplementing Sections 7.3. and 7.4 of standard LVS 190-11 “Bridge inspection and load testing”.

Approbation of the results and publications

Publications

1. I. Paeglite, J. Smirnovs, A. Paeglitis (2021) Reinforced concrete highway bridge dynamic assessment method using data obtained by live scale load testing // Bridge Maintenance, Safety, Management, Resilience and Sustainability: Proceedings of the Tenth International IABMAS Conference (IABMAS 2020), Japan, Sapporo, 12–16 April 2021.
2. I. Paeglite, J. Smirnovs, A. Paeglitis (2018) Evaluation of the increased dynamic effects on the highway bridge superstructure. // Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 2018, vol. 13, no. 3, pp. 301–312, <https://doi.org/10.7250/bjrbe.2018-13.418> (indexed in SCOPUS).
3. I. Paeglite, J. Smirnovs, A. Paeglitis (2017) Dynamic behaviour of prestressed slab bridges // Proceedings of 12th International Conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques”, (MBMST 2016), 26–27 May 2016, Vilnius, Lithuania. 8 p. (indexed in SCOPUS).
4. I. Paeglite, J. Smirnovs, A. Paeglitis (2016) Traffic load effects on dynamic bridge performance // Bridge Maintenance, Safety,

Management, Resilience and Sustainability: Proceedings of the Eighth International IABMAS Conference (IABMAS 2016), Brazil, Foz do Iguacu, 26–30 June 2016, pp. 2364–2369. [M. kr.: 02T] (indexed in SCOPUS).

5. I. Paeglite, J. Smirnovs (2015) Dynamic effects caused by the vehicle-bridge interaction // 5th International Scientific Conference Proceedings, Vol. 4 Jelgava, Latvia University of Agriculture, 2015, 371 p. ISSN 2255-7776.
6. I. Paeglite, J. Smirnovs, A. Paeglitis (2015) The Dynamic Amplification Factor for bridges with span length from 10 to 35 meters // Journal Engineering Structures and Technologies, 2015, pp. 1–8, <https://doi.org/10.3846/2029882X.2014.996254>.
7. I. Paeglite, A. Paeglitis (2014) Dynamic Amplification Factors of Some City Bridges // World Academy of Science, Engineering and Technology, International Science Index 96, International Journal of Civil, Structural, Construction and Architectural Engineering, 8 (12), 1183–1187. <http://waset.org/publications/9999937>.
8. I. Paeglite, A. Paeglitis (2013) The Dynamic Amplification Factor of the Bridges in Latvia // Journal Procedia Engineering, 2013, pp. 851–858. 10.1016/j.proeng.2013.04.108 (indexed in SCOPUS).
9. I. Paeglite, A. Paeglitis (2013) Dynamic Load Testing of the Latvian Bridges. International IABSE Conference “Assessment, Upgrading and Refurbishment of Infrastructure”, Rotterdam, Netherlands, 6–8 May 2013 (indexed in SCOPUS).

Participation with presentations at conferences

1. 10th International Bridge Maintenance, Safety, Management, Resilience and Sustainability Conference (IABMAS 2020), “Reinforced concrete highway bridge dynamic assessment method using data obtained by live scale load testing”, 12–16 April 2021, Sapporo, Japan. Online conference. (Oral presentation and full publication in the conference proceedings).
2. 3rd International Conference “Innovative Materials, Structures and Technologies” (IMST 2017) “Evaluation method of the moving vehicle caused dynamic effects on the highway bridge superstructure”, 27–28 September 2017. Riga, Latvia. (Poster).

3. Riga Technical University 57th International Scientific Conference. Section: National Research Programme “Innovative Materials and Smart Technologies for Environmental Safety (IMATEH). Presentation: “Transportlīdzekļu svara un kustības ātruma ietekmes novērtēšana uz konstrukcijas dinamiskajām īpašībām” 17 October 2016, Riga, Latvia. (Oral presentation).
4. 8th International IABMAS Conference (IABMAS 2016), “Traffic load effects on dynamic bridge performance”, 26–30 June 2016, Foz do Iguacu, Brazil. (Oral presentation and publication in the conference proceedings).
5. 12th International conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques”, (MBMST 2016), “Dynamic behaviour of prestressed slab bridges”, 26–27 May 2016. Vilnius, Lithuania. (Oral presentation and publication indexed in SCOPUS).
6. 2nd International Conference “Innovative Materials, Structures and Technologies” (IMST 2015) 30 September – 2 October 2015, Riga, Latvia. (Oral presentation).
7. International Conference “Civil Engineering 15”, Dynamic effects caused by the vehicle-bridge interaction”, 14–15 May 2015, Jelgava, Latvia. (Oral presentation and publication in the conference proceedings).
8. ICSC 2014: International Conference on Structural and Construction Engineering, “Dynamic effects of selected bridges in Latvia”, 22–23 December 2014, London, United Kingdom. (Oral presentation and publication in journal).
9. 11th International Conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques”, “The Dynamic Amplification Factor of Bridges in Latvia”, 16–17 May 2013, Vilnius, Lithuania. (Oral presentation and publication indexed in SCOPUS).

1. LITERATURE REVIEW

The assessment of the dynamic impact of vehicle loads has always played an important role in ensuring the safety and performance of bridges. The inclusion of traffic load in the bridge design started in the 19th century, when the construction of railways and railway bridges began [1], [2].

Over the last 20 years, as measuring devices [19] and their capabilities evolved, many studies have been carried out to analyse the dynamic effects of a driving vehicle on the bridge. It was studied by several scientists, such as Fryba [9], Young and Lin [12], Akin and Mofid [20], [1]. The results of laboratory and experimental data have been studied analytically by scientist Nowak [10], [21], [22], who analysed load models used in the United States in AASHTO standard and the loads that heavy vehicles induce in the bridge structure. Scientist O'Brien [26], [27] studied weight-in-motion (WIM) systems and modal analysis of bridges. Scientist Rattigan [23], [28] studied the values of the dynamic amplification factor and its impact on dynamic load and bridge design. At the same time, these studies do not provide recommendations or considerations on the dynamic characteristics like dynamic amplification factor or natural frequency. They do not give any recommended or non-recommendable intervals for the values.

As computer capabilities and types of signal analysis developed, a transition was made to sensory result-based bridge analysis methods and modal analysis that identified natural frequencies and mode shapes [29]. Physical changes in bridge properties (rigidity, mass and energy dissipation) lead to changes in the bridge's spectral properties (frequencies, vibration damping and mode shapes). For example, changes to the stiffness indicate damage to the bridge, and it may be determined by recording changes in the bridge's natural frequency [24]. However, no methods have been developed for the quantitative assessment of changes in the natural frequency that indicates damage to the bridge.

Regarding road bridges, Eurocode 1990 requires the contracting authority to indicate requirements and criteria for vibrations where relevant. It is recommended to use comfort criteria whose values are not specified in the construction standard. At the same time,

construction standards do not provide recommendations for the assessment of the dynamic properties of bridges in operation [36].

1.1. Characteristic parameters of dynamic performance

Unlike static load, the dynamic load causes mass accelerations and thus creates inertia forces [48]. It is important to check the bridge's reaction to a dynamic load, since each structure is designed according to design loads, but different external factors can increase the design load.

The load generated by vehicles is a time-altering stochastic load described by the principles of probability theory. The load can be measured using traffic data obtained by WIM system [49].

The mass in the bridge structure is distributed throughout the whole structure, so the degrees of freedom are endless. However, in many cases, the real system can be reduced to a system with a definitive number of degrees of freedoms. The finite element method (FEM) [48] is used for the calculations.

The most important dynamic characteristics for bridge structures are natural frequency, damping ratio, and dynamic amplification factor.

Natural frequency

Free vibrations occur when the structure is moved out of its equilibrium position and oscillates freely. Free vibrations are subsiding, as opposed external forces also operate in the design together with internal forces. The damping in the structure may be idealised as viscous damping. For a viscose damped system, the free oscillations shall be indicated by the general equation of motion:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0, \quad (1)$$

where

\ddot{u} – acceleration;

\dot{u} – speed;

u – displacement;

m – mass;

c – damping constant;

k – stiffness;

$p(t) = 0$ as no external force has been applied.

The equation shows that the dynamic properties of the structure depend on the mass distribution, geometric characteristics and the stiffness of the structure [13].

Each characteristic mode shape of structural deformation is referred to as the form of natural frequency. T_n is a period of free vibrations, which is the time required for one cycle of oscillation. The corresponding angular frequency of free oscillations ω_n and natural frequency f_n shall be calculated according to Formulae (2) and (3):

$$f_n = \frac{1}{T_n}; \quad (2)$$

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n}. \quad (3)$$

For dynamic analysis, the principle of modal analysis or natural frequency analysis shall be used. Together with the natural frequencies, the mode shapes shall also be viewed. This can be determined if in equation of motion (Equation (1)) oscillation damping and the effect of the external forces are taken as 0. The total number of natural frequencies shall be equal to the number of degrees of freedom. Each natural frequency numerical value has an appropriate vector or mode shape.

Forced vibrations

The forced vibrations occur in the structure from periodically changing external forces that act on the structure's mass. A vehicle crossing the bridge causes forced vibrations. The forced vibrations in the equation of motion are indicated by the periodically variable external force function $p(t)$:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + kv = p(t). \quad (4)$$

A dynamic load is time-varying, so the function of the input cannot be described with a single harmonious function. The vehicle's moving load model describes the function of the external force, and this type of operation is studied by the vehicle-bridge interaction.

Damping ratio

If the vibrations have not been imposed, they will fade over time. Vibration damping is caused by friction of steel compounds, opening and closing of micro-cracks in concrete structures, friction between structure and non-structural elements.

The damping ratio of the structure cannot be calculated by knowing only the dimensions of the structure. Therefore, real dynamic load testing of structure is the only way to obtain data that can determine the damping ratio. Such data can be derived from both free and imposed vibrations [51].

The decrease in vibration movement is also characterised by logarithmic decrement and is calculated as a logarithm from consecutive displacement reduction peaks in the vibration curve. Equation (5) shows the calculation of logarithmic decrement.

$$\delta = \ln \frac{u_i}{u_{i+1}} = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}, \quad (5)$$

where ξ is damping ratio, which is a dimensionless ratio. It also depends on the weight and rigidity of the structure.

If the damping ratio ξ has a small numerical value $\sqrt{1-\xi^2} < 1$, it gives an approximate equation of damping as $\delta = 2\pi\xi$, acceptable at $\xi < 0.2$, which refers to most of the structures. The damping ratio can therefore be calculated as $\xi = \delta/2\pi$.

It is not possible to determine the damping ratio analytically. For structures with a small damping ratio, an expression may be used [51]:

$$\xi = \frac{1}{2\pi j} \ln \frac{\ddot{u}_i}{\ddot{u}_{i+j}}. \quad (6)$$

A slight increase in the damping ratio may significantly decrease the value of the dynamic amplification factor in resonance. An exact pattern of vibration damping for structures has not yet been developed, but it has been proven that the assumption of linear viscous damping is correct and refers to most structures. The exception is the interaction between the ground and the structure, where special vibration patterns should be considered [52].

Considering all the factors affecting the vibration damping ratio and its changes, it is also used to determine whether the structure has damages.

Dynamic amplification factor (DAF)

The dynamic amplification factor is calculated as the ratio between the maximum load effect when the bridge is dynamically loaded and the maximum load effect when the same load is applied statically (Equation (7)). This shows how much vertical deformations caused by the static load will increase due to the interaction between the car and the bridge. For design purposes, the static load is multiplied by the dynamic amplification factor. The alternative to this method is to perform a complex FEM dynamic analysis of the designed structure considering the interaction between the bridge and the vehicle [55].

In most cases, Equation (7) is used to calculate the dynamic amplification factor from the data obtained by dynamic load testing, although there are other methods.

$$DK = \frac{R_{dyn}}{R_{stat}} \quad (7)$$

R_{dyn} is obtained directly from the measurement data by reading the results reported by the measuring equipment. R_{stat} can be obtained at any measurement point (not just from the same measuring device), which minimizes the possibility of overestimating dynamic amplification factor.

Dynamic amplification factor value 1.3 corresponds to a 30 % dynamic increase. The Eurocode LVS EN 1991-2 determines that a generalized dynamic amplification factor value may be used for the calculation, which is added to the maximum design load.

However, the method included in the Eurocode LVS EN 1991-2 is conservative, since the dynamic amplification factor is calculated taking into account only a few parameters. The design traffic load model for bridges in Eurocode is calculated by adding dynamic amplification factor to the most disadvantaged static load model obtained by extrapolating load effects using free traffic simulations and WIM data. The value of the theoretical dynamic amplification

factor of the Eurocode for the bridge depends on the shape of the influence line and one variable – the length of the bridge [62].

The finite element method does not consider the interaction between the bridge, vehicle and road profile, so the dynamic amplification factor values are conservative and produce a maximum dynamic effect. Such a conservative method is acceptable for new structures, since the dynamic load is already included in the design process. However, a more accurate assessment is required for existing structures for which the design values included in the Eurocode can indicate insufficient load-carrying capacity and lead to costly reconstruction.

1.2. Overview of experimental methods for detection of the vehicle induced variations in the bridge

A dynamic load test allows to obtain the true dynamic characteristics of the bridge and, if necessary, adjust the bridge's design model. A complete dynamic load test includes measurements

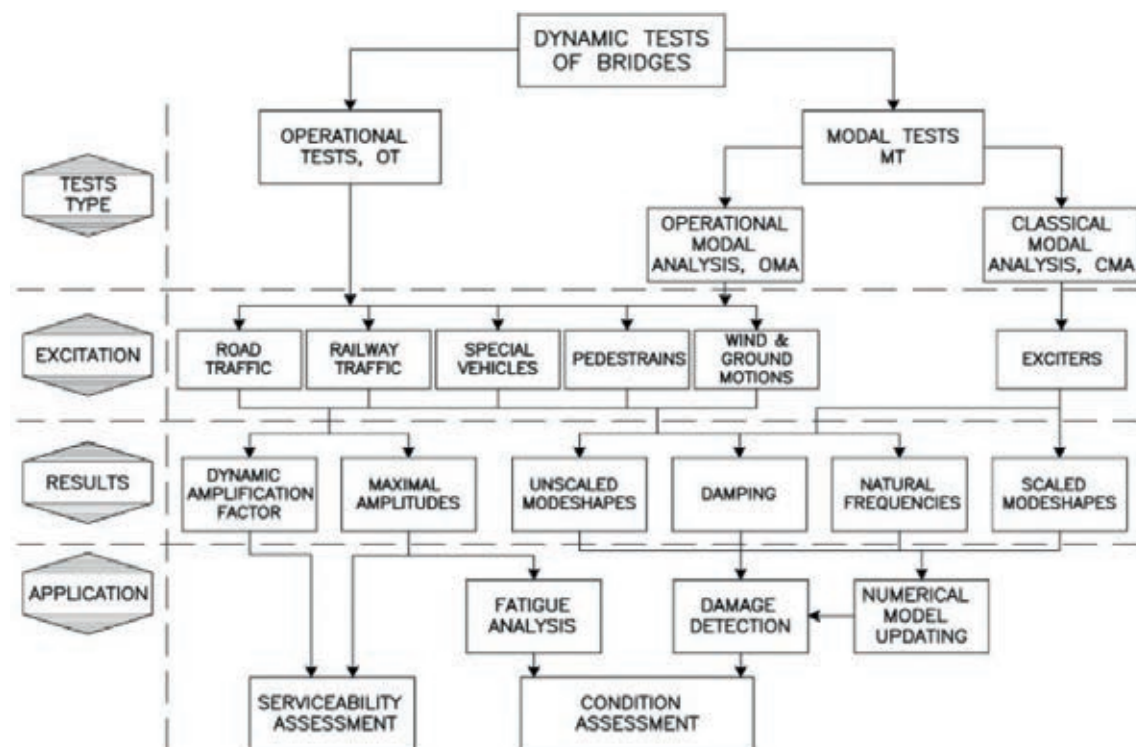


Fig. 1.1. Methods for dynamic load testing [75].

of displacements and accelerations at different points of the bridge. It is possible to determine the dynamic amplification factor from the bridge displacement measurements, while the acceleration measurements are used for the modal analysis of the bridge.

Methods for dynamic load testing can be divided into two groups: a bridge test for a specific load (operational test) which determines the characteristics of structural vibrations using a particular load, and modal tests that determine the parameters of vibration of the structure itself, regardless of the load and type of oscillation [75]. The diagram in Fig. 1.1 shows the methods of testing with a dynamic load. Figure 1.1 also shows excitation methods, the results to be obtained, and the parameters and application of a dynamic load test.

Dynamic load testing uses daily traffic loads (cars, trains or pedestrians) or environmental loads (wind or ground vibrations). Measurements provide information about the dynamic parameters for the entire structure-vehicle system. The results of these types of road and pedestrian bridge tests are suitable for a particular load, as they depend on the vehicle's suspension system, the weight of the car's axle, velocity, place of crossing and other factors.

In this study, the data are obtained by operational tests using a specific load.

1.3. Equipment and measuring devices

During tests, the structure's dynamic characteristics may be measured with accelerometers, strain gauges, and displacement meters. The displacement data is used to determine the dynamic amplification factor, the natural frequency and the damping ratio. The acceleration data is used to find natural frequencies and mode shapes. Instruments shall be placed on the main span to show the highest values or display the most accurate mode shapes.

Accelerometers

Accelerometers shall be used for the measurement of the acceleration of the structure. The most commonly used measurements are piezoelectric, piezoresistance and microelectromechanical system (MEMS) accelerometers. According

to the type of data to be recorded, they are classified into analogue and digital accelerometers.

For each accelerometer, the sampling frequency is set. The instruments are located at specific points corresponding to the positions of the data to be obtained. The deployment of accelerometers is designed to capture as many mode shapes as possible. The FEM model is used to determine the points on the bridge where the instruments should be placed.

In the research, three-axle digital accelerometers X6-1a were used. Accelerometer range ± 16 g with 15-bit resolution. Frequencies available for accelerometer sampling were 12 Hz, 25 Hz, 50 Hz, 100 Hz, and 200 Hz. The 50 Hz frequency was used for the measurements.

The data obtained by accelerometers are transformed into vibration frequencies with the FFT algorithm. Data are then analysed by signal theory techniques, such as using a curve that is adjusted using a multiple orthogonal polynomial algorithm to determine the mode shapes for modal analysis [61].

Displacement meters

Although accelerometer data can be used to obtain displacements, accelerometer data are transformed into displacements using a double integration method. Such a method does not always produce sufficiently accurate results, therefore, local analogue and digital displacement methods are used to determine displacements.



Fig. 1.2. The Noptel PSM-200 displacement sensor is installed on the bridge before performing a dynamic load test.

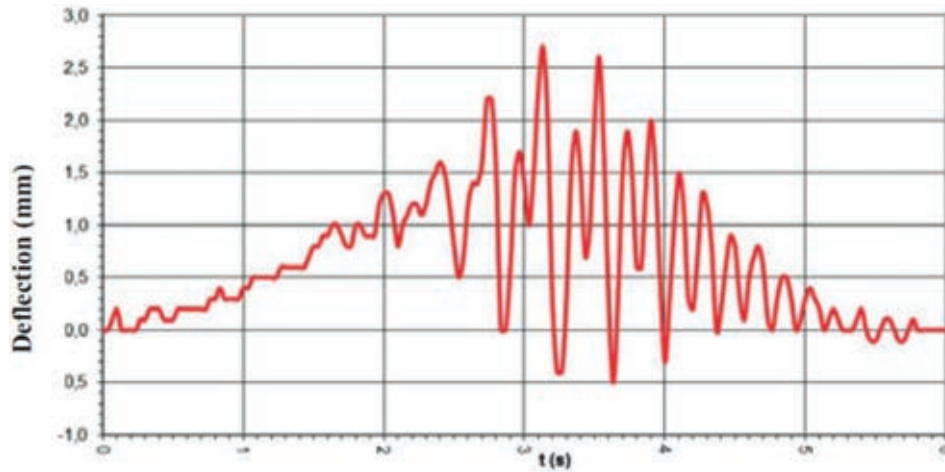


Fig. 1.3. Vibration diagram by Noptel PSM-200.

Noptel PSM-200 laser device (Fig. 1.2) may be used to measure large displacements in structures. Its operating principle is based on a laser beam and a receiver that is placed on the structure. The measurement distance may reach up to 350 metres. Measurement frequency is up to 500 times per second.

Depending on the type of bridge and the necessary data, the vibration diagrams for the bridges in Latvia were obtained using Noptel PSM-200, strain gauges and image processing method. An example of the vibration diagram is shown in Fig. 1.3.

The natural frequency range for road bridges is usually between 0 and 10 Hz, in rare cases up to 20 Hz [61]. This range is sufficient to observe the first five forms of vibration. The sampling frequency must be at least twice the maximum value of interest, usually 30–100 Hz.

Strain gauges

Strain gauges are among the most widely used sensors when surface deformation needs be determined on a specific cross-section. The strain gauge is a device whose electrical resistance is proportional to the deformation of the device. Thus, by transforming the data obtained by the strain gauges, deformations can be obtained more precisely than with accelerometers. However, although these data will be more accurate than

accelerometers, they are influenced by measurement noise, particularly in the high range of measurements. Metallic strain gauges are the most commonly used.

Data collection and processing systems

Many channel systems, such as SPIDER, are used to connect multiple devices (strain gauges and accelerometers) simultaneously. This system allows to immediately see and record vibrations on a computer screen at different design points.

Vehicles used for testing

Vehicles with measured mass are used to create loads on the bridge structure. A vehicle with three to five axles and a mass of around 20–40 tonnes is normally used for the tests.

Heavyweight vehicles are used to model a dynamic load as close to an actual traffic load as possible.

1.4. Dynamic load in design load model

The limit state method is used in the Eurocode taking both load and material partial factors into account. The limit state method looks at all possible limit states and is based on probability theory principles. If the effect of the load exceeds the strength of the structural element, a collapse occurs.

The design standards for bridges in the 21st century use two limit states – ultimate and serviceability limit state, where the ultimate limit state is calculated in the light of the structural collapse, while the serviceability limit state determines whether the design meets specific usage criteria.

The European code LVS EN 1991-2:2003 “Traffic loads on bridges” [94] provides four vertical load models LM1, LM2, LM3, and LM4 and horizontal load patterns resulting from vehicle braking and accelerating, as well as centrifugal and transverse loads. Load models LM1, LM3, and LM4 are used for the design of road bridges.

The load model LM1 consists of tandem and distributed load (general model for overall and local tests). The tandem system

has two axle loads and a distributed load: $Q_{ik} \alpha = \alpha_{Qi} Q_{ik}$, where the numerical values of α factors are given in the National Annex of each EU Member State. The dynamic load is included in load model LM1 as loads Q_{ik} and q_{ik} , so it is unnecessary to increase the design loads further.

Traffic loads in the Eurocode were identified from the static traffic load simulation. The load placement is shown in Fig. 1.4.

In the load model LM3, the dynamic load should be assessed in addition if vehicles are intended to move at a speed of more than 70 km/h. In this case, account should be taken of the dynamic increase calculated in accordance with Formula (8):

$$\varphi = 1.40 - \frac{L}{500} \geq 1.0, \quad (8)$$

where L is the length of the impact line in metres [95].

The dynamic factor is already included in the pedestrian 5 kN/m² load model LM4.

According to the standard LVS EN 1991-2 in force in Latvia, load models include constant dynamic amplification factor values depending on the length of the bridge and load influence line, as well

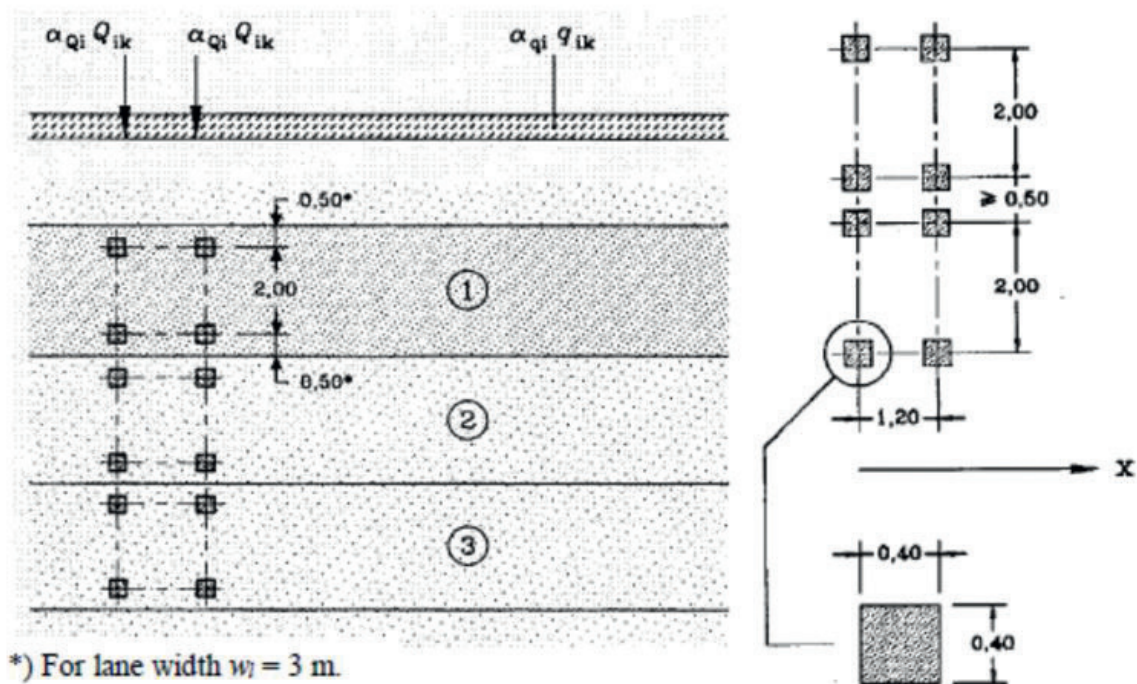


Fig. 1.4. Tandem and distributed load for design load model LM1 [94].

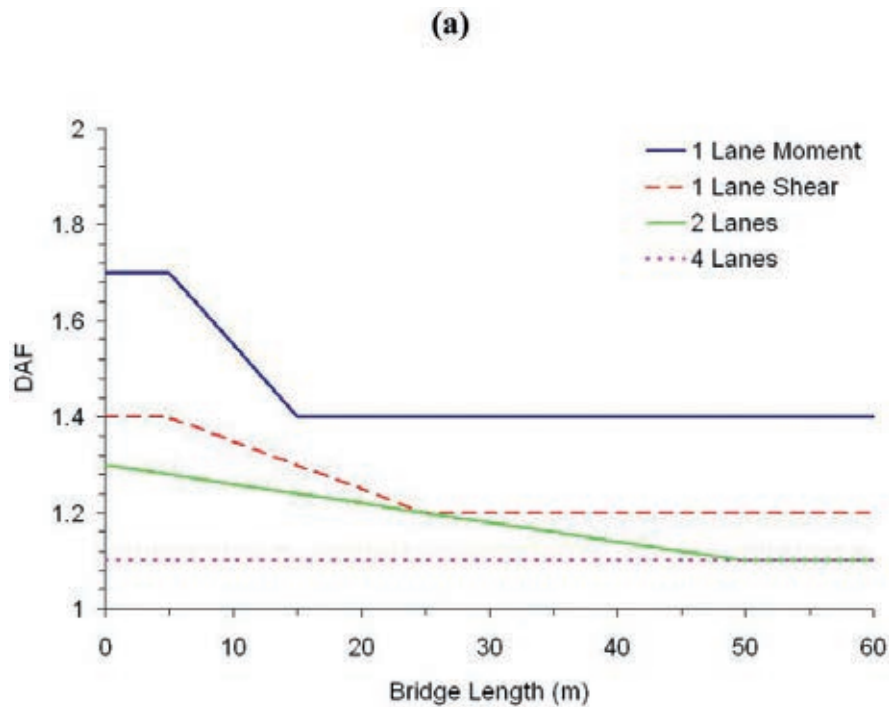


Fig. 1.5. Dynamic amplification factor values used in Eurocode design load [63].

as the number of driving lanes on the bridge intended for the static load effect of the 100-year cycle [27].

Values of the dynamic amplification factor for the two-lane carriageway bridge used in the standard LVS EN 1991-2:2003 “Traffic loads on bridges” are shown in Fig. 1.5.

Eurocode LVS EN 1991-2 “Traffic loads on bridges” does not include the values of the dynamic amplification factor for the bridges in service.

1.5. Standard for dynamic bridge load testing in Latvia

Bridge load testing in Latvia is performed following the requirements specified by the standard LVS 190-11 “Bridge inspections and load tests” [96]. The Latvian Standard does not prescribe a specific sequence of dynamic tests and information to be collected before performing it, nor does it provide criteria for evaluating the results obtained.

The standard gives the test performer a lot of options to perform the test at his or her discretion without specifying the impact of the obtained results on the mechanical strength and stability of the structure. Although the sentence “results of the measurements carried out during the test should be compared with the calculated values” is included, this is more relevant to the static loading results, where the vertical deformations intended to be obtained from the particular load can be calculated precisely.

LVS 190-11 “Bridge inspections and load tests” does not specify what test method for bridges should be used to determine vibration. However, the most commonly used method is a test using a specific dynamic load.

2. METHODOLOGY FOR DYNAMIC LOAD TESTING

There is a generally accepted practice for performing dynamic load testing. However, each company that performs dynamic load testing of bridges does it differently because there is no standard that would regulate dynamic load testing. For this reason, each company that performs dynamic load testing should choose the most appropriate sequence and type of test for a particular bridge structure, considering the available data recording methods and the available dynamic load.

The methodology developed in the dissertation shows the sequence of dynamic load testing used in Latvia, the types of instruments used, the data to be recorded and their evaluation. Four cm high planks placed on the pavement are used to cause oscillations in the bridge. The use of the planks makes it possible to model different road surface conditions, which are especially important for bridges that have been in operation for some time. The distance between the planks depends on the distance between the wheel axles of the vehicle. The height of the planks (4 cm) is based on the average height of ice and snow cover in winter conditions where proper maintenance of the road surface is not performed. Planks of this height and location characterise uneven pavement with an *IRI* value of 6 mm/m.

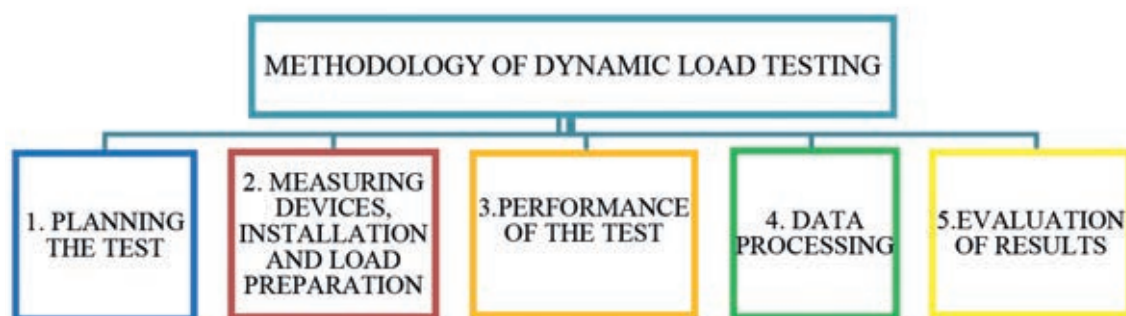


Fig. 2.1. Methodology for obtaining and evaluating dynamic characteristics for dynamic load testing.

The methodology for dynamic load testing of a bridge can be divided into five parts, shown graphically in Fig. 2.1.

Planning the test

N1 – assessment of the technical condition of the bridge.

Perform a general inspection of the bridge, which includes documentation examination, information regarding previous inspections and surveys, and examination of construction drawings. Perform a visual inspection of the bridge and determine whether the structure has damages that reduce the load-carrying capacity. The most common damages are cracks in the concrete, corrosion of the reinforcement, damaged bearings or settling of the supports. Based on the information obtained, a conclusion shall be given as to whether the structure may be subjected to a load test.

Important! If damage occurs which affects the load-carrying capacity of the structure, the test shall not be performed.

N2 – FEM model and load-carrying capacity assessment.

The FEM model has to be made, and calculations performed using the obtained construction drawings and material strength information. The load-carrying capacity of the bridge is determined. It is essential to find out the strength class of the materials. If this is not known, non-destructive or destructive tests must be performed to determine the properties of the materials.

The loads specified in the standard LVS EN 1991-2 “Actions on structures – Part 2. Traffic loads on bridges” should be used. The design calculation is performed for the ultimate and serviceability limit state.

N3 – dynamic analysis of the bridge and determination of instrument placement.

From the dynamic analysis, the natural frequencies and mode shapes are found. The dynamic analysis also shows the specific locations on the bridge where the gauges are to be located. The

required number of measuring equipment, the length of wires for the measuring equipment, and the possibility of access to the places where the measuring equipment must be located shall be determined from the construction drawings or by inspecting the bridge. Before the test, the measuring instruments must be inspected and calibrated.

N4 – dynamic test program.

Dynamic load test program showing the specific locations where the gauges should be located and their quantities should be made.

The program must include the following information:

- the time at which traffic on the bridge will have to be closed;
- location of measuring instruments;
- number and responsibilities of the personnel involved in the inspection;
- test manager;
- number and weight of cars required.

A specific number of vehicle crossings and speeds need to be set. If the bridge is already open to traffic, instructions must be given to close the traffic on the bridge during the test.

Measuring devices, installation and load preparation

It is essential to position and attach the measuring devices and gauges correctly for reliable and accurate results. It is crucial to record the weather conditions of a particular day and the location of each measuring device, as this may affect the accuracy of the measurements and their interpretation.

M1 – measuring instrument locations on the bridge structure.

Based on the previous FEM calculations, the places where the measuring instruments are to be placed are marked on the bridge structure.

M2 – placement of measuring instruments on the structure.

The measuring instruments must be attached to the structure according to the method specified in the measuring instrument specification. If the device should be connected to a computer with wires, the wires must be placed so that they do not obstruct traffic.

M3 – vehicle weighing.

Vehicles are weighed using specific car scales. The drivers of the vehicles who will make the trips should be instructed on how many trips and at what speeds they will have to do.

M4 – bridge deck preparation for inspection.

Make sure that the bridge carriageway is empty during the test. Make sure the car has enough space to pick up speed before driving on the bridge. Ensure that the 4 cm high boards and the 20 cm high springboard required for the test are placed nearby for the test to run smoothly.

Performance of the test

During the test procedure, it must be ensured that the traffic is closed and that no other external loads could affect the test data. The test is performed by modelling different road surface conditions: without planks – even surface; with planks – worn surface with pits or in winter with ice deposits.

S1 – crossing the bridge with even pavement.

Before starting the test, a “zero” reading is done without the vehicle on the bridge. The data starts to be recorded when the vehicle is not yet on the bridge and ends when the oscillation subsides. The vehicle crosses the bridge at a speed of 20 km/h, 40 km/h, 60 km/h and, if necessary, up to the maximum permitted speed at the bridge location.

S2 – crossing the bridge with uneven pavement.

Before the vehicle drives on the bridge, 4 cm high planks are placed on the road. The distance between the planks is 3–3.5 m, depending on the wheel axle distance. The vehicle crosses the bridge at 20 km/h, 40 km/h, 60 km/h on uneven ground. If necessary, at a speed of 70 km/h over uneven surfaces, as this may be the maximum permitted speed for very uneven surfaces.

S3 – impact load.

A pre-made 20 cm high springboard is placed in the middle of the span. The car drives the front wheel axle off the springboard and allows the structure to oscillate freely until the oscillations subside. After the test, all obstacles shall be removed from the bridge and another “zero” entry shall be done without traffic.

Data processing

Depending on the measuring instruments used for the test, the data shall be processed according to the specifications of each measuring device.

D1 – accelerometer data.

The data obtained by the accelerometer are converted to natural frequencies by the FFT algorithm method, thus obtaining mode shapes and natural frequencies.

D2 – displacement data.

From the displacement measurement data, oscillation diagrams are created for each load and road surface, from which the dynamic amplification factor and natural frequency are calculated. The oscillation damping ratio is determined from the impact load diagrams.

D3 – strain gauge data.

Strain gauges record the stresses generated in the structure from a given load. By transforming this data, oscillation diagrams for displacements, natural frequency and dynamic amplification factor of oscillations are determined.

D4 – summary of results.

The obtained results are summarized in a report and compared with the results obtained in the calculation model.

Evaluation of results

R1 – Natural frequencies.

The obtained natural frequencies and mode shapes are compared with the analytically calculated values. If the values differ by more than 10 %, then the calculation model must be checked. This difference in the frequency indicates that the calculation model does not correspond to the actual structure.

R2 – dynamic amplification factor.

If the dynamic amplification factor for even pavement is greater than 1.4, then the load safety factor must be changed according to the obtained dynamic amplification factor value in the design model. Low dynamic amplification factor indicates that the dynamic

amplification factor in the Eurocode for the respective structure is too low.

The dynamics index of the structure is determined, thus evaluating the level of the dynamic performance of the bridge.

R3 – pedestrian comfort criterion.

Acceleration values obtained for bridges with sidewalks are compared with standard LVS EN 1990: 2022/A1: 2008 paragraph A2.4.3.2, pedestrian comfort criteria (serviceability limit state). Vertical accelerations – up to 0.7 m/s^2 , horizontal accelerations – up to 0.2 m/s^2 .

R4 – general evaluation of the obtained results and preparation of the test report.

The test data on the bridge structure, the equipment used in the test and their location, the loads applied, and the results obtained shall be summarized in a report. At the end of the report, conclusions are made about the dynamic performance of the structure and compliance with the calculations.

The developed methodology for dynamic load testing allows to determine the required dynamic characteristics of bridges, which are used to analyse the dynamic characteristics done in Chapter 3 of the dissertation. The analysis determines dynamic characteristic (natural frequency, damping ratio, dynamic amplification factor) range of values that indicate increased dynamic performance of the bridge. The obtained ranges of dynamic characteristics were then used in the dynamics index calculation method described in Section 3.2 of Chapter 3 of the dissertation.

3. METHOD OF DYNAMIC BRIDGE PERFORMANCE ASSESSMENT

The assessment of the dynamic bridge performance may be evaluated using a moving load test, but that is not always possible. Therefore, a new method for evaluating the dynamic bridge performance has been developed. For this method, a dynamic load test does not need to be performed.

The following parameters characterise the dynamic performance of the structures:

- *dynamic amplification factor* describes the increase in vertical deformation or strain from the dynamic load;
- *logarithmic decrement and damping ratio* describe the speed at which the imposed oscillations are subsiding; they depend on the structure's stiffness;
- *vertical deformation* is deflection of the structure under the load; it depends on the structure's stiffness and the load applied;
- *natural frequency* are oscillations depending on the shape and material of the structure; they depend on the structure's stiffness.

These parameters show that the dynamic performance of the bridge is strongly connected with the stiffness of the structure, characterised by the damping of vibrations, vertical deformation and the natural frequency. It is not possible to determine the dynamic amplification factor for the structure without performing a dynamic load test, so it is not used in the developed method.

When analysing the above-described parameters that affect the dynamic performance of the structure, the parameters that can be identified in the design process are the structure's stiffness and the natural frequency. On the other hand, for a structure in service, these parameters are damping ratio, accelerations and the amplitude of oscillations. The most important of these are the damping ratio and the amplitude of the oscillation, which also describe the structure's stiffness.

The parameter values may vary for different types of bridges, so four types of bridges – concrete-slab bridges, prestressed concrete

beam bridges, and prestressed concrete slab bridges with one or more ribs have been examined separately in the dissertation. For all bridges, the above parameters describing design stiffness and dynamic performance were obtained. These parameters were analysed to determine which parameters and what parameter range show increased dynamic performance. To determine the range of values for each given parameter, dynamic load test data from 2000 to 2016 were used.

From the analysis of dynamic load test data, four criteria were obtained that influence the dynamic performance of the bridge. These criteria were used in the dynamic index method described in Section 3.2.

Following the analysis of the results, five criteria were selected:

- 1) span length-to-height ratio;
- 2) relative vertical deformation;
- 3) natural frequency;
- 4) damping ratio;
- 5) international roughness index (*IRI*).

The first two criteria describe the stiffness of the structure: the length-to-height ratio of the span, or the slenderness of the structure, and the relative vertical deformation, which describes the ratio of the vertical deformation of the structure to the length of the span.

The next two criteria describe oscillations: the natural frequency and damping ratio. The natural frequency can be determined from the calculation model, but it is not possible to determine the damping ratio without performing the test. It was, therefore, essential to determine the range of values for this parameter from the results of experimental dynamic load tests.

The last criterion is the international roughness index *IRI*.

3.1. Analysis of experimentally obtained dynamic characteristics of concrete bridges

Reinforced concrete slab bridges

The ranges of the dynamic performance and characteristics of the bridges are shown in Table 3.1. Part of the range that indicates an increased dynamic performance were taken from bridges with

dynamic amplification factor values on uneven pavement above 2, in this case the dynamic amplification factor values are from 2.4 to 2.7. Table 3.1 shows that the part of the range of values that points to a larger relative deflection and the length-to-height ratio of the span points to an increased dynamic performance. On the other hand, the portion of the range of values, which indicates a lower damping ratio and the value of the first-form natural frequency, points to an increased dynamic performance of the structure.

Table 3.1

**Ranges of dynamic performance and stiffness parameters
for concrete slab bridges**

Parameters	Range of values	Part of the range that indicates an increased dynamic performance
Span length-to-height ratio	16-34	> 23
Natural frequency	3.25-18 Hz	3.25-6 Hz
Damping ratio	0.013-0.04	0.013-0.02
Vertical relative deformation	1/5000 L - 1/3400 L	1/1500 L - 1/2030 L

The results summarised in Table 3.1 are then used in the dynamic index calculation method described in Section 3.2.

Prestressed beam bridges

The ranges of the dynamic performance and stiffness characteristics of the prestressed beam bridges are shown in Table 3.2. The part of the range that indicates an increased dynamic performance was taken from bridges with a dynamic amplification factor value higher than 2 on uneven pavement, in this case the dynamic factor value is 3.10. The span length-to-height ratio of this type of beams is not the determinant value because the beams have a fixed height. The natural frequency above 5 Hz and the damping ratio above 0.02 indicate an increased dynamic performance.

Table 3.2

Ranges of dynamic performance and stiffness parameters for simply supported prestressed beam bridges

Parameters	Range of values	Part of the range that indicates an increased dynamic performance
Span length-to-height ratio	18-19	19
Natural frequency	3.5-14.3 Hz	5-14.3 Hz
Damping ratio	0.01-0.05	0.02-0.05
Vertical relative deformation	$1/1700 L - 1/3070 L$	$1/2010 L - 1/3070 L$

In the dynamic index method, beam bridge data are not used because there are only three dynamic load bridge tests with results available, and such bridges are no longer constructed in Latvia. However, in Chapter 4, the permissible dynamic amplification factors for beam bridges were calculated. These values show the available dynamic load reserve for existing beam bridges.

Prestressed slab bridges with one rib

The parameters for the dynamic performance and stiffness of prestressed slab bridges with one rib are given in Table 3.3. The values of the range that indicates an increased dynamic performance were taken from bridges with dynamic amplification factor value on uneven pavement above 2. In the case of prestressed concrete slab bridges, the values of the dynamic amplification factor are from 2.1 to 3.5. These values are then used in the dynamic index calculation method described in Section 3.2.

The span length-to-height ratio is between 24 and 26 for prestressed structures. The natural frequency is between 2.5 Hz and 5.2 Hz, however, an increased dynamic performance indicates a natural frequency between 4.3 Hz to 4.5 Hz. An increased dynamic performance is also indicated by a damping ratio between 0.03 and 0.04, while the relative vertical deformation of $1/2090 L - 1/2500 L$. For prestressed slab bridges with one rib, an important parameter is the position of the carriageway and if the vehicle is positioned on

Table 3.3

Ranges of dynamic performance and stiffness parameters for prestressed beam bridges with one rib

Parameters	Range of values	Part of the range that indicates an increased dynamic performance	Additional parameters leading to increased dynamic performance
Span length-to-height ratio	24–26	25	The carriageway is positioned on a console
Natural frequency	2.5–5.2 Hz	4.3–4.5 Hz	
Damping ratio	0.02–0.04	0.03–0.04	
Vertical relative deformation	1/1900 L – 1/2500 L	1/2090 L – 1/2500 L	

the console of the cross-section. If the design is slender ($L/H > 25$), it is also much easier to oscillate. Hence, placing the car on the console part creates additional torsional forces.

Prestressed slab bridges with multiple ribs

The parameters for the dynamic performance and stiffness of prestressed slab bridges with multiple ribs are given in Table 3.4. Part of the range that indicates an increased dynamic performance was taken from bridges with dynamic amplification factor at uneven pavement above 2. In the case of prestressed concrete slabs, the values of the dynamic amplification factor are from 2.0 to 5.6.

The span length-to-height ratio for prestressed beam bridges with multiple ribs is between 25–27, indicating an increased dynamic performance of the structure. The natural frequency is from 3.9 Hz to 4.8 Hz, but higher dynamic performance is indicated by a range of values from 3.9 Hz to 4.8 Hz. The slanted prestressed concrete bridges, which are placed at an angle to the longitudinal axis of the road, show an increased dynamic performance of the structure.

Table 3.4

**Ranges of dynamic performance and stiffness parameters
for prestressed beam bridges with multiple ribs**

Parameters	Range of values	Part of the range that indicates an increased dynamic performance	Additional parameters leading to increased dynamic performance
Span length-to-height ratio	19–27	25–27	The bridge is at an angle to the longitudinal axis of the bridge The crriageway is positioned on a console
Natural frequency	3.9–5.7 Hz	3.9–4.8 Hz	
Damping ratio	0.0 –0.06	0.03–0.06	
Vertical relative deformation	1/2500 L – 1/5080 L	1/3500 L – 1/5080 L	

3.1.1. Factors affecting the dynamic load

The analysis of the data from Chapter 3 identified the factors affecting dynamic performance: the geometry of the bridge, the road pavement unevenness and the car's velocity.

Bridge geometry

The bridge geometry is one of the most important parameters affecting the dynamics of the bridge, since both the type and shape of the bridge structure and the cross-section shape influence the bridge dynamic performance. The additional load for the bridge is caused by the vehicle movement when the bridge is at an angle to the longitudinal axis of the road. The length/height ratio of the bridge affects the rigidity of the bridge and, thus, the dynamic performance.

Bridges positioned at an angle to the longitudinal axis of the road are exposed to an increased dynamic performance. The analysis

was done by a computer software LYRA. Calculations were done for a 12 m simply-supported bridge of 9 m width and a slab height of 0.7 m. Span length/height ratio $l/h = 20$.

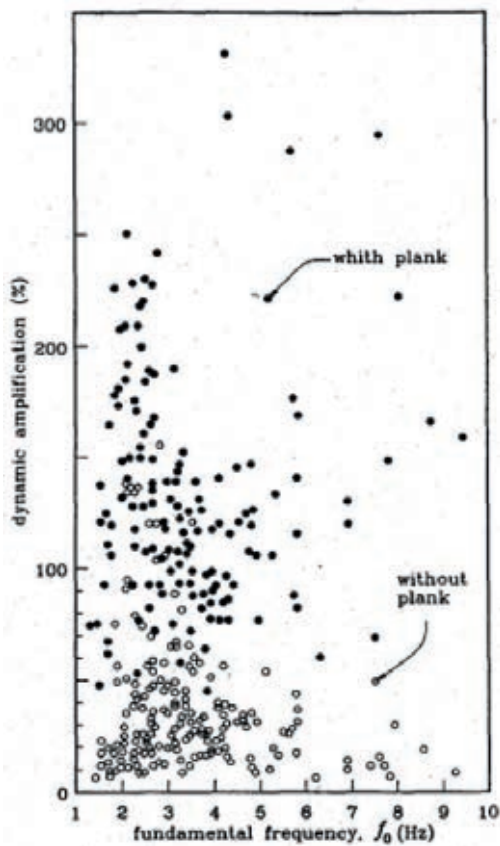
Table 3.5

The first-form natural frequency for different angled bridges

Angle	Natural frequency, Hz	Period T , s
0°	6.15	0.163
15°	6.49	0.154
30°	7.69	0.13
45°	10.32	0.096

It can be seen from the data in Table 3.5, the frequency of the first natural frequency form increases as the angle of the slab increases and the warping vibrations appear, which creates warping forces in the structure.

Pavement condition – unevenness



The analysis results in Chapter 3 showed that the main reason for the increase in the dynamic amplification factor is the deterioration of road pavement. Any roughness on the road – asphalt deterioration, uneven deformation or ice in the winter – creates an additional load for the car suspension system, which is then transferred by the car to the bridge structure [99]. This effect is also shown in Fig. 3.1, which shows

Fig. 3.1. Pavement unevenness influence on dynamic amplification factor.

an increase in the dynamic amplification factor for even and uneven surface. The figure shows that the minimum increase with boards is 43 %, the average is 130 %, the maximum is 450 %, and without boards a minimum is 2 %, an average is 30 %, a maximum is 102 % [56].

For roads, the pavement is characterised by the international roughness index (*IRI*). This index was developed by the World Bank and was introduced in 1986.

The *IRI* is used to determine the roughness of road pavement in the longitudinal direction. The recommended units for the *IRI* are meters per kilometer (m/km) or millimeter per meter (mm/m). The *IRI* value is calculated by dividing the standard vehicle suspension system displacement (mm, inches, etc.) by the distance taken by the vehicle during measurement (km, m, etc.). The *IRI* scale is shown in Fig. 3.2.

For new bridges, road pavement is even and is consistent with the lowest *IRI* values, while the *IRI* is much higher for damaged road surfaces in operation. Each country can determine *IRI* values according to its requirements [99].

In Latvia, the international roughness index is measured by a laser profile owned by Latvian State Roads, which can determine the *IRI* for the road section. Although Latvia does not have a specified

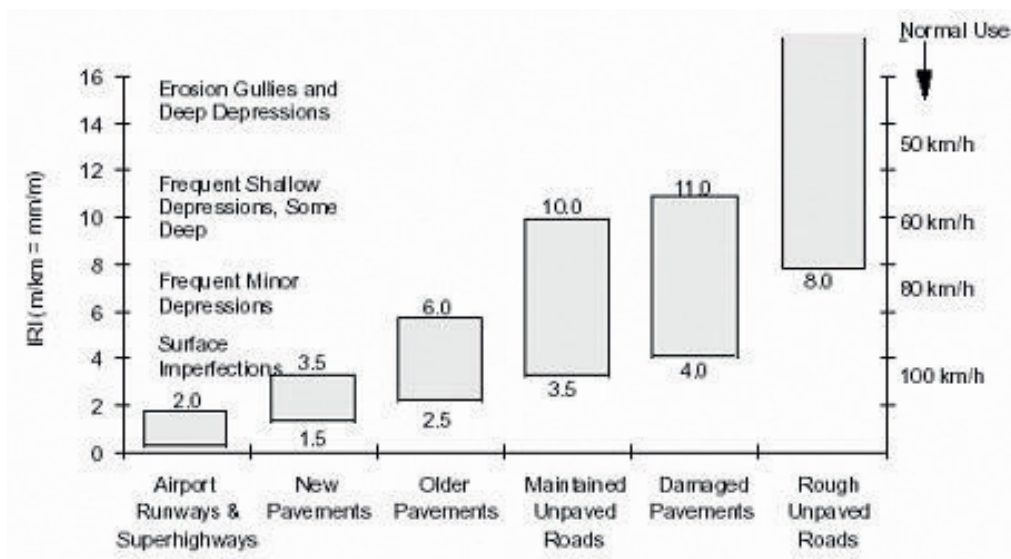


Fig. 3.2. International roughness index *IRI* [100].

IRI values for bridges, it is possible to find appropriate *IRI* values for very rough road pavement on the bridge. “Road specification 2019” [101] defines that for new asphalt concrete pavement, the *IRI* value must not exceed 2.5 mm/m for 20 m long sections. Measurements carried out in Latvia in 2018 determined that the *IRI* values were below 1 m/km for new asphalt pavements. Such profile pavement does not affect the dynamic performance of the bridge.

Scientist Sayers [100] has found that the *IRI* value of 6.0 m/km is considered the maximum acceptable for high-quality road pavements.

For a dynamic load test, 4 cm high planks are placed on the pavement to model a rough surface. In cooperation with the Competencies Centre of Latvian State Roads, an experiment was conducted with a laser profile. The results obtained showed that the average measured *IRI* value for such pavement with 4 cm high planks is 6 mm/m.

When compiling the results, it can be concluded that pavement can be considered even when *IRI* is up to 2.5, as defined in “Road Specifications 2019”, uneven pavement when the *IRI* is between 2.5 and 6, and very rough pavement if the *IRI* exceeds 6.

The velocity of the vehicle

The roughness of the road alone does not increase the dynamic load. The speed of the car’s movement is a significant factor. The bridge analysis in Chapter 3 shows that a higher dynamic amplification factor is obtained when cars travel at a slower speed. Higher dynamic amplification factor can be explained by the car’s “jumping” over rough pavement when moving at high speed. At the same time, driving at a low-speed vehicle drives up every roughness on the surface.

Heavy vehicles produce two forms of vibration: a body-bounce that occurs for vibration frequencies from 2 Hz to 5 Hz and a wheel-hop when vibration frequencies greater than 7 Hz occur. The surface evenness combined with car velocity makes these vibration forms, so movement speed is essential. The effect of the vehicle speed on the dynamic amplification factor is shown in Fig. 3.3. The upper image shows undamaged pavement, while the lower image shows damaged

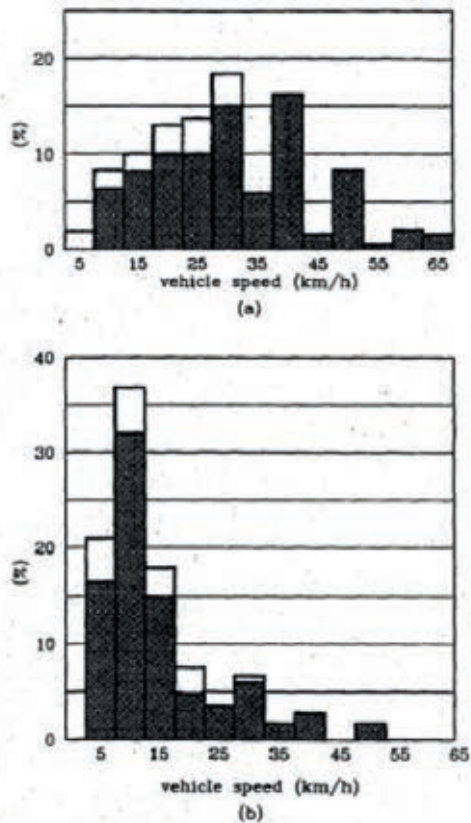


Fig. 3.3. Pavement unevenness and vehicle velocity influence on the dynamic amplification factor [56].

uneven pavement. The critical speed for the uneven pavement is between 5 and 15 km/h [56].

Similar results have been obtained from the dynamic load tests of the bridges in Latvia. The highest dynamic amplification factor is obtained when the car travels at 20 km/h on an uneven pavement. Therefore, during tests carried out in Latvia, trucks pass a bridge at speeds between 20 km/h and 60 km/h. Crossing a bridge at higher speeds over boards of 4 cm height may cause damage to the car's suspension system.

3.2. Bridge dynamic performance evaluation method – dynamic index (DI)

A moving load on an uneven road surface creates a dynamic load that can result in a load that is twice the static load. However, it is not possible to determine the actual performance of the structure under dynamic load without performing a dynamic load test. Therefore, a method has been developed to assess the dynamic performance of bridges without performing a dynamic load test. The term “dynamic

performance of the bridge” means the bridge’s response to the dynamic load and whether the bridge’s response to the dynamic load may reduce the load-carrying capacity.

The Eurocode uses a dynamic amplification factor as a dynamic performance evaluation criteria, but it is not possible to determine a dynamic amplification factor without a dynamic load test. Other dynamic parameters (natural frequency, damping ratio) do not in themselves describe the dynamic performance of the structure. Hence a new type of dynamic performance assessment – a dynamic index (*DI*), is introduced. Dynamic index combines five parameters that describe dynamic performance. *DI* shows the potential of the bridge structure to exceed the dynamic load reserve included in the design load.

The *DI* calculation method has been developed for three types of concrete bridges – reinforced concrete slab and prestressed concrete slab bridges with one and multiple ribs. Each of these bridge types has a different range of dynamic parameter values that affect the dynamic performance, hence three separate tables of values were created.

Five parameters were selected from the analysis in Chapter 3 of the dissertation: span length/ height ratio, relative vertical deformation, natural frequency, damping ratio and international roughness index *IRI*. The values of these parameters vary between types of bridges, hence it is essential to know the type of structure, whether it is prestressed, simply-supported or a frame. Data were available for reinforced concrete and prestressed concrete bridges, hence the dynamic index calculation can be applied to reinforced concrete and prestressed concrete bridges with a span length of 7 to 34 meters.

It is important to take into account whether the bridge has any of the factors that increase dynamic performance. These factors are:

- the bridge is placed at an angle to the longitudinal axis of the road;
- the carriageway is positioned on a console part of the cross-sectional (for prestressed concrete bridges).

A scale from 4 to 20 was established to determine *DI*. On the scale, 4 indicates no increase in the dynamic performance of the structure while 20 points to an increased level of the dynamic

performance of the structure. An increased level is when the dynamic load decreases the load-carrying capacity of the structure.

The method uses five criteria that describe the dynamic performance of the bridge. The criteria are identified from K1 to K5. All parameters can be found for the design stage when developing the mathematical FEM model. The criteria are:

- 1) the length/height ratio of the bridge span structure (K1);
- 2) the first form of the natural frequency (K2);
- 3) the damping ratio (in the calculation process, these values can be adopted as a material damping ratio) (K3);
- 4) the relative vertical deformation of the span, which is a ratio between the maximum static deformation of the bridge and length of the span (K4);
- 5) international roughness index *IRI* (K5).

For new bridges where the pavement is embedded according to the Road Specifications 2019, the international roughness index *IRI* is the lowest – below 2.5 mm/m. For in-service bridges, the surface has often worn off because maintenance work has not been performed or there has been pothole patching, which often makes the surface very uneven. For such road conditions, the *IRI* can be between 2.5 and 6 mm/m. These values are also used for the value range of the K5 criterion.

Criteria K1 to K4, determined by the analysis carried out in Chapter 3 of the dissertation for each bridge group, show the range of values that indicate increased dynamic performance. Criteria K1–K5 are adopted with a coefficient of 1, without setting any criteria as more important. Sensitivity analysis was not performed. The values of dynamic descriptors or criteria (K1–K5) for reinforced concrete and prestressed concrete bridges used in the method are divided into four parts, from A1 to A4. Every part is valued from 1 to 4, where 1 shows a low increase in dynamic performance and 4 is a significant increase. For each type of bridge, the range from A1 to A4 is different and, therefore, three tables have been created: Table 3.6 – for concrete slab bridges, Table 3.8 – for prestressed concrete bridges with one rib, Table 3.10 – for prestressed concrete bridges with multiple ribs, where, according to the type of bridge and ranges of criteria, the values of A1 to A4 are shown.

The value of part A of each of the criteria range is determined by taking into account the dynamic characteristics of the bridge under examination and the part of the range within which the specified criterion is included, obtaining a value of 1 to 4. This process is carried out for all five criteria. When these values are counted, a number from 4 to 20 is obtained indicating the dynamic index. Formula (9) shows how DI is calculated:

$$DI = K1_{(Ai)} + K2_{(Ai)} + K3_{(Ai)} + K4_{(Ai)} + K5_{(Ai)}, \quad (9)$$

where

- $K1_{Ai}$ – the value of criterion K1 in the range of 1 to 4;
- $K2_{Ai}$ – the value of criterion K2 in the range of 1 to 4;
- $K3_{Ai}$ – the value of criterion K3 in the range of 1 to 4;
- $K4_{Ai}$ – the value of criterion K4 in the range of 1 to 4;
- $K5_{Ai}$ – the value of criterion K5 in the range of 1 to 4;
- i – value from 1 to 4.

Figure 3.4 shows the dynamic index calculation algorithm. If the dynamic index is more than 10, it shows a dynamic performance that impacts the structure's load-carrying capacity.

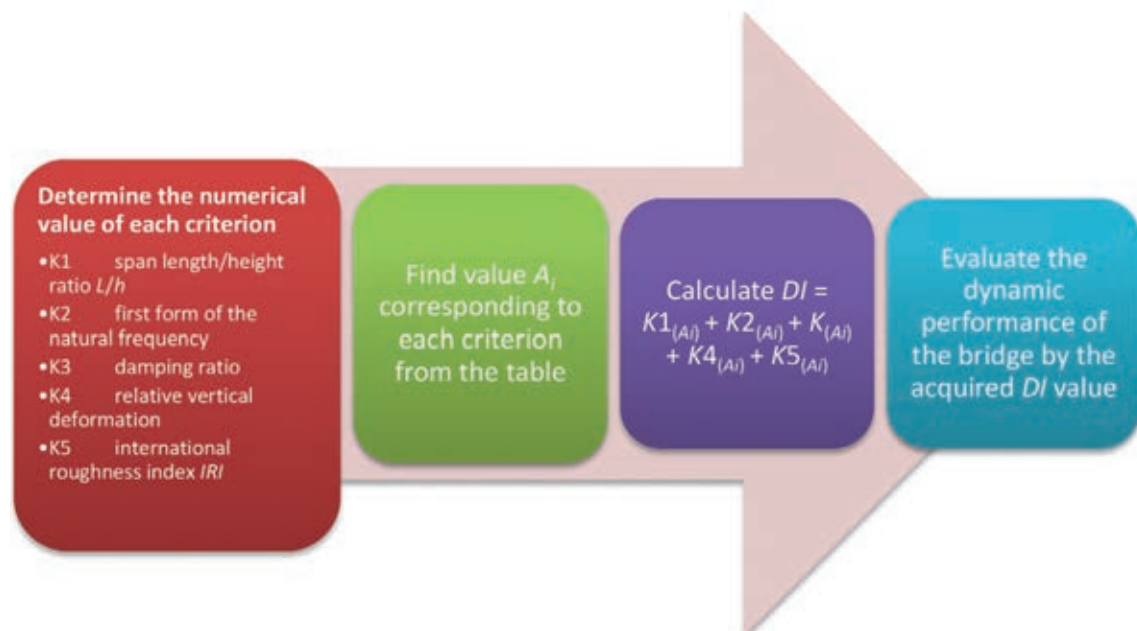


Fig. 3.4. Dynamic index algorithm.

3.2.1. Reinforced concrete slab bridges

The method is valid only for continuous system slab bridges within the specified range of criteria values. Table 3.6 shows the criteria and the distribution of their values into four parts. Table 3.6 is used to determine the dynamic index. Each of the criteria shall be evaluated for the bridge in question.

Table 3.6

Determination of dynamic index for reinforced concrete frame slab bridges

	Criteria	A1	A2	A3	A4	DI
K1	Span length / height ratio, L/h	16–20.5	20.6–24.9	25–29.5	29.5–34	$K1_{(Ai)}$
K2	The first form of the natural frequency	13.06–17	9.92–13.05	6.78–9.91	3.36–6.77	$K2_{(Ai)}$
K3	Damping ratio	0.0605–0.073	0.049–0.060	0.036–0.048	0.023–0.035	$K3_{(Ai)}$
K4	Relative vertical deformation	1/3400–1/2925	1/2924–1/2450	1/2449–1/1975	1/1974–1/1500	$K4_{(Ai)}$
K5	International roughness index IRI	≤ 2.9	2.9–4	4.1–5.0	5.1–6.0	$K5_{(Ai)}$
				Dynamic index:		ΣK_j

Table 3.7 shows the values of the criteria examined in the method of reinforced concrete slab bridges and the dynamic index. Each bridge is also given a dynamic amplification factor value that shows the actual dynamic performance of the bridge determined in the dynamic load test.

The results show that at an uneven pavement the dynamic index is very high for bridges positioned at an angle to the longitudinal axis of the carriageway. These bridges with uneven pavement may be subject to loads affecting the load-carrying capacity of the bridge.

Table 3.7

Bridge parameters and calculated *DI* values

Bridge	Bridge system: simply supported / frame	Position against longitudinal axis	Span length / height (<i>L/H</i>) ratio	Calculated first natural frequency (Hz)	Damping ratio	Relative vertical deformation (span length/ static deformation)	Max Dynamic amplification factor	Dynamic index (<i>max 20 p</i>)
Bridge over river Gauja on AC V235	Frame	Slanted	34	3.36	0.046	1/1900	2.40	19
Bridge over river Secene, road P76 Aizkraukle-Jēkabpils	Frame	Slanted	25	6.6	0.023	1/1500	2.70	19
Bridge over river Lauce, road P87 Bauska-Aizkraukle	Simply supported	Parallel	23	8.88	0.046	1/2030	2.00	15
Bridge over river Dzirla, road P035 Gulbene-Balvi	Frame	Parallel	16	9.78	0.073	1/3200	2.04	10
Bridge over river Līcupe, road A3	Frame	Parallel	20	17	0.065	1/3400	1.30	8

3.2.2. Prestressed reinforced concrete slabs

The method is valid only for reinforced concrete frame slab bridges. Table 3.8 shows the criteria and their values for frame-type bridges.

Table 3.8

Determination of dynamic index for prestressed reinforced concrete slab bridges

	Criteria	A1	A2	A3	A4	DI
K1	Span length/ height ratio, L/h	22	24	25	26	$K1_{(Ai)}$
K2	The first form of the natural frequency	3.0–3.62	3.63–4.24	4.25–4.86	4.85–5.5	$K2_{(Ai)}$
K3	Damping ratio	0.02– 0.025	0.026– 0.03	0.031– 0.036	0.0036–0.04	$K3_{(Ai)}$
K4	Relative vertical deformation	1/1900– 1/2050	1/2051– 1/2200	1/2210– 1/2350	1/2351– 1/2500	$K4_{(Ai)}$
K5	International roughness index <i>IRI</i>	2.9–3.65	3.65–4.43	4.44–5.2	5.21–6	$K5_{(Ai)}$
				Dynamic index:		$\sum K_j$

Table 3.9 shows the values of the criteria examined in the method of the prestressed slab bridges and the dynamic index. Each bridge is also given a dynamic amplification factor value that shows the actual dynamic performance of the bridge specified in the test with a dynamic load. Although it has not been determined how the dynamic amplification factor correlates with the dynamic index, it can be seen that for the bridge with the highest dynamic amplification factor, the dynamic index is also very high – 17 out of 20.

Table 3.9

Bridge parameters and calculated *DI* values

Bridge	Bridge system: simply supported / frame	Carriage-way on console Y/N	Span length / height (L/H) ratio	Calculated first natural frequency (Hz)	Damping ratio	Relative vertical deformation (span length/ static deformation)	Max dynamic amplification factor	Dynamic index (<i>max</i> 20 p)
Bridge on AC A12 over railroad Rīga-Rēzekne	simply supported	Yes	24	3.0	0.02	1/1900	1.5	9
Overpass over railway Rīga-Krustpils 95,214 km	frame	Yes	25	5	0.03	1/2500	3.5	17
Bridge over river Pedele in Valka	frame	No	22	4.47	0.04	1/2090	2.1	15
Bridge over Railroad Jelgava-Tukums on AC A9 Rīga-Liepāja	frame	Yes	26	5.5	0.03	1/2020	1.9	15

3.2.3. Prestressed concrete ribbed slab bridges

The method is only valid for continuous bridges with values of the criteria within the given range. Table 3.10 lists the criteria and their values for prestressed frame-type bridges.

Table 3.11 shows the values of the criteria of prestressed ribbed slab bridges and the dynamic index. Each bridge is also given a dynamic amplification factor value that shows the actual dynamic performance of the bridge specified in the dynamic load test.

Table 3.10

Determination of the dynamic index for prestressed reinforced concrete ribbed slab bridges

	Criteria	A1	A2	A3	A4	DI
K1	Span length/ height ratio, L/h	19–21	21.1–23	23.1–25	25.1–27	$K1_{(Ai)}$
K2	The first form of the natural frequency	7.3–6.38	6.37–5.57	5.56–4.76	4.75–3.0	$K2_{(Ai)}$
K3	Damping ratio	0.02–0.03	0.031–0.04	0.041–0.05	0.051–0.06	$K3_{(Ai)}$
K4	Relative vertical deformation	1/2500–1/3145	1/3156–1/3790	1/3791–1/4435	1/4436–1/5080	$K4_{(Ai)}$
K5	International roughness index IRI	2.9–3.68	3.69–4.46	4.47–5.24	5.24–6	$K5_{(Ai)}$
				Dynamic index:		ΣK_j

The developed method is valid for the specified types of bridges within the defined criteria ranges. Table 3.11 shows that when assessing the criteria in Table 3.10, the dynamic index trend is similar to the dynamic amplification factor value trend. The developed five-criteria method allows to evaluate the dynamic performance of the bridge without a dynamic load test, or it can suggest the need for a dynamic load test. If the calculated dynamic index value is greater than 12, the dynamic performance level of the bridge can be considered high, and it would be desirable to perform a dynamic load test.

The contracting party or the infrastructure manager (Latvian State Roads, JSC “Latvia’s State Forests” or local governments) can use the dynamic index method to assess the particular bridge with uneven road pavement and see if a dynamic load on the structure may result in a reduction in the load-carrying capacity and whether it is necessary to perform a dynamic load test for the particular bridge.

Table 3.11

Bridge parameters and calculated *DI* values

Bridge	Bridge system: simply supported / frame	Position against longitudinal axis	Span length / height (<i>L/H</i>) ratio	Calculated first natural frequency (Hz)	Damping ratio	Relative vertical deformation (span length/ static deformation)	Max dynamic amplification factor	Dynamic index (<i>max 20 p</i>)
Road overpass on road A6, Riga-Belarus Border	Frame	Parallel	20	6.0	0.02	1/2500	1.7	9
Bridge over river Dīvāja on road A6	Simply supported	Slanted	19	7.3	0.03	1/4550	2.0	11
Road overpass on road P8 over road E22 (<i>R = 6000m</i>)	Frame	Parallel	25	4.0	0.06	1/3470	5.6	17
Road overpass on road E22 over road V920	Frame	Parallel	27	4.9	0.06	1/5080	4.1	19

4. PERMISSIBLE DYNAMIC AMPLIFICATION FACTORS FOR BEAM BRIDGES

The maximum permissible value of the dynamic amplification factor from the load carrying-capacity point of view can be calculated only for a specific structure and a specific load because the value of the dynamic amplification factor is inversely proportional to the load and the mass of the structure. Exceeding permissible value of the dynamic amplification factor the structure will not collapse, however, the damages caused can reduce the load-carrying capacity.

The value of the dynamic amplification factor of the moving load is related to the geometrical and material characteristics of the bridge span structure. It is also related to the type of load (traffic load, railway load, pedestrian load), therefore dynamic amplification factor values for the same type and length of beams are different.

On Latvian roads, most bridges and overpasses (approximately 90 %) are constructed of standard bridge structures by the design load schemes N-13, N-18, N-30 and some heavy transport units NG-60, NG-80.

In today's road transport flow in Latvia, the maximum permitted uncontrolled heavy transport load indicated in Cabinet Regulation No. 279 "Road Traffic Regulations" Annex 2 is K44 – a six-axle container carrier with a standard mass of 44 t and a total length of 13.4 m. The above-mentioned K44 load is used in the calculations, as it shows the maximum permissible heavy load in daily traffic. Vehicles of such mass are not used in dynamic load tests, as they can create forces in the structure that will cause permanent damage under uneven pavement conditions.

The following calculation method was used to determine the value of the maximum allowable dynamic amplification factor.

1. Knowing the dimensions of the cross-section and the amount of reinforcement, determine the maximum allowable stress of beam E_{Rd} , kN·m or N/mm².
2. Determine the maximum applied stress of the self-weight on structure M_g , kN·m, or N/mm².

3. Determine the difference $E_{Rd,i} - E_{g,i}$, which shows the maximum allowable stress E_p for the moving load.
4. Determine $E_{p,i}$, which is the maximum applied stress in the structure of the specific moving load. In this case, it is the maximum permissible load K44.
5. The maximum allowable value of the dynamic amplification factor is determined according to Formula (40), where the maximum allowable value of the dynamic amplification factor is ratio $E_p/E_{p,i}$.

Maximum allowable value of dynamic amplification factor =

$$= \frac{E_{Rd,i} - E_{g,i}}{E_{p,i}}, \quad (40)$$

where

$E_{Rd,i}$ – maximum allowable stresses of the most loaded element or section of the structure, kNm or N/mm²;

$E_{g,i}$ – stress from the structure self-weight, kN·m or N/mm²;

$E_{p,i}$ – maximum applied stress in the structure of the specific moving load, kN·m or N/mm²;

i – the most heavily loaded section or structural element.

The calculation is performed for the following standard span structures:

- reinforced concrete beams with frame-type reinforcement (made according to type 56 design drawings (with and without diaphragms));
- prestressed concrete beams with and without diaphragms;
- prestressed concrete beams with wire bundles.

In Latvia, tests with dynamic loads are performed only on new or reconstructed bridges. Therefore, there are not many results of tests with dynamic loads on such standard reinforced concrete structures. However, by performing a dynamic load test after reconstruction, it is possible to compare the actual values of the dynamic amplification factor with the maximum allowable for the specific standard span structures.

The maximum permissible values of the dynamic amplification factor for standard reinforced concrete and prestressed concrete girder bridges are summarized in Table 4.1. The lowest permissible

dynamic amplification factor of value 1.4. was found for reinforced concrete beam bridges with frame reinforcement and diaphragms. Value 1.4 represents a 40 % margin for dynamic load. The second-lowest reserve is for reinforced concrete beams with diaphragms. In turn, the highest permissible dynamic amplification factor was found for reinforced concrete beam bridges with frame reinforcement without diaphragms – 4.4.

The dynamic amplification factor of standard span structures depends on the span length, so using these results, not only the beam type but also the span length should be considered. The maximum allowable dynamic amplification factor is the lowest value of the permissible dynamic amplification factor. Exceeding this value of the dynamic amplification factor will not cause the collapse of the structure. However, it may cause damages that can reduce the load-carrying capacity of the bridge.

In the dynamic parameter analysis in Chapter 3 of the dissertation, three prestressed concrete beam bridges were considered, two of which are standard beam bridge reconstructions. The bridge over the Iecava River is a prestressed concrete beam bridge without diaphragms with a span of 11.36 m. The dynamic amplification factor measured for this bridge is 3.1, which is 19 % less than the analytically determined maximum permissible value of 3.8. The experimentally measured dynamic amplification factor of the bridge over the Jugla canal in Riga (span consists of double T-profile prestressed concrete beams without diaphragm with span 22.16 m) is 1.32, which is 40 % less than the analytically determined maximum permissible value 2.2.

Standard project bridges are no longer built in Latvia, however, the number of standard type bridges in Latvia is about 90 % of the total number of bridges. The proposed method allows to assess the load-carrying capacity reserve of the reconstructed bridges for dynamic load and to compare it with the experimentally obtained dynamic amplification factor values. Thus, determining whether the bridge has sufficient dynamic reserve for maximum permissible heavy load K44 determined in Annex 2 of the Cabinet Regulation No. 279 “Road Traffic Regulations”.

Table 4.1

Maximum permissible values of the dynamic amplification factor for standard girder bridges

Bridge type	Value range of dynamic amplification factor				
	<i>L</i> = 8.66 m	<i>L</i> = 11.36 m	<i>L</i> = 14.06 m	<i>L</i> = 16.76 m	<i>L</i> = 22.16 m
Frame reinforcement beams with diaphragms	1.4-2.9	1.6-2.8	1.6-2.4	2.4	1.8-3.2
Frame reinforcement beams without diaphragms	2.5-3.1	2.9-3.5	3.2-4.4	2.9-4.4	–
Prestressed concrete beams with diaphragms	–	2.2-2.8	2.3-2.7	1.7-2.5	–
Prestressed concrete beams without diaphragms	–	3.5-3.8	3-3.5	2.6-3.8	–
Prestressed concrete beams (wire bundles)	–	–	–	2.4-3.3	2.2-3.8

5. RECOMMENDATIONS FOR SUPPLEMENTING LVS 190-11 “BRIDGE INSPECTION AND LOAD TESTING”

Based on the dissertation results, recommendations have been prepared for the standard LVS 190-11 “Bridge inspection and load testing” Sections 7.3. and 7.4.

Recomendations for Sections 7.3. and 7.4. are based on methodology for dynamic load testing developed in Chapter 2 of the Thesis and on the analysis of the dynamic parameters of the bridges performed in Section 3.1 of the Thesis.

Recommendations for Section 7.3:

1. Include the following point: Before the dynamic load test:
 - an assessment of the technical condition of the bridge must be done to determine whether the structure has any damage that reduces the load-bearing capacity;
 - perform a bridge dynamic analysis with FEM software program to determine the locations where gauges should be placed to obtain the most accurate bridge dynamic performance;
 - develop a test program indicating what will be measured, what measuring devices and loads will be used.
2. Supplement text “A loaded vehicle may be used to generate the dynamic load, which could cross the bridge daily and cause increased dynamic effects” with the following sentence: All vehicles used in the test must be weighed to assess the effect of the specific load on the span structure.
3. Supplement text “During the bridge test, the vehicle must pass the span structure several times at different speeds” with the following sentence: Vehicles must cross the bridge at speeds 20, 40, 60 km/h and, if necessary, up to the permitted speed limit of the bridge location. The crossing must be done on even and uneven pavement.
4. It is recommended to revise the following sentence “To determine the dynamic characteristics of the structure,

moving, impact, or vibration loads can be used, which can cause permanent oscillations (including free oscillations)”. Revised: To create both free and forced oscillations in the structure, moving, impact, and vibration loads can be used in the dynamic load test.

5. Supplement text “During the bridge test, the vibration characteristics (diagrams) must be recorded using special equipment for recording oscillations” with sentences: The dynamic parameters of the bridges can be recorded using displacement, stress and acceleration measuring devices. The sampling frequency of the accelerometer must be at least twice the frequency to be recorded.

Recommendations for Section 7.4:

Include the following points:

- Evaluation of the results of the dynamic load test.
- The results of the dynamic load test must be compared with the analytically calculated results.
- The measured natural frequency must be compared with the analytically calculated one. If the difference between the values is more than 10 %, the design calculation model must be corrected based on the experimental data.
- If the bridge’s natural frequency is in the range from 3 Hz to 6 Hz, it is recommended to check whether the dynamic amplification factor for even pavement condition is below the value 1.4 specified in LVS EN 1991-2 load model LM1.
- If the dynamic amplification factor obtained from the dynamic load test for even pavement condition is higher than 1.4, the design load partial factor must be changed according to the obtained dynamic amplification factor value. The load-carrying capacity of the structure must be checked, considering the experimentally determined dynamic amplification factor value.

CONCLUSIONS

A method was developed for estimating the dynamic performance of a bridge. In the method, dynamic parameter data experimentally obtained from bridge dynamic load tests were used. The data were obtained by non-destructive oscillation analysis and digital data reading methods taking into account the bridge pavement unevenness. The method can be used not only for new bridges but also for the ones in operation. Proposals were developed for supplementing Sections 7.3. and 7.4. in standard LVS 190-11 "Bridge inspection and load testing" of the Republic of Latvia with the methodology of experimental determination of dynamic characteristics of bridges and evaluation of dynamic characteristics obtained from dynamic load testing.

1. A dynamic bridge load testing methodology was developed for obtaining and evaluating the dynamic parameters of reinforced concrete and prestressed concrete slab bridges.
2. Experimentally obtained dynamic amplification factor mean values for bridges designed by the requirements of the Eurocodes were calculated, which for bridges designed after 2000 (for even pavement) in 97 % of cases are between 1 and 1.4. The values obtained are lower than the values specified in Eurocode load model LM1 – from 1.4 to 1.7 depending on the span length.
3. Experimentally obtained dynamic amplification factor mean values for bridges designed before 2000 (for even pavement) in 88 % of cases are 1.1, which is lower than the value of the dynamic amplification factor determined in the SNIP building standards $(1 + \mu) = 1.2$.
4. It has been experimentally proven that the pavement's evenness level and vehicle speed influence the bridge's dynamic amplification factor.
5. It was determined that a bridge has an increased dynamic performance if the natural frequency of reinforced concrete bridge is in the range of 3 Hz to 6 Hz.
6. The dynamic index method allows to evaluate the dynamic performance of new bridges and bridges in operation on a scale from 4 to 20. The developed method of the dynamic

index allows to evaluate the level of the dynamic performance without the need to perform a dynamic load test. In the method, five parameters are used: span length/height ratio, natural frequency, vibration damping ratio, relative vertical deformation, and international roughness index *IRI*.

7. The maximum permissible values of the dynamic amplification factor for standard prestressed concrete and reinforced concrete girder bridges were determined for Cabinet Regulation No. 279 "Road traffic regulations" Annex 2 Maximum acceptable heavy traffic load. These dynamic amplification factor values show the permissible load-carrying capacity margin of beam bridges. The lowest dynamic amplification factor margin was calculated for reinforced concrete beams with frame reinforcement and diaphragms – span length for these beams – 8.66 m. The dynamic amplification factor for such a structure is 1.4, which indicates a margin of 40 % to absorb the dynamic load.
8. Recommendations for supplementing the Latvian state standard LVS 190-11 "Bridge inspection and load testing" Sections 7.3. and 7.4 have been developed. Section 7.3. has been supplemented with instructions for the performance and preparation of the dynamic load test. Section 7.4. has been supplemented with criteria for evaluation of the dynamic amplification factor and natural frequency.

LITERATŪRAS SARAKSTS/ LIST OF REFERENCES

- [1] R. Willis, "Appendix to the report of the commissioners appointed to inquire into the application of iron to railway structures," London, 1849.
- [2] "Dee Bridge disaster," 2010. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Dee_Bridge_disaster. [Accessed: 17-Jul-2017].
- [3] H. Jeffcott, "On the vibrations of beams under the action of moving loads," *Phil. Mag.*, vol. Series 7, no. Nr. 8, pp. 66–97, 1929.
- [4] R. S. Ayre, L. S. Jacobsen, and C. S. Hsu, "Transverse Vibration of One- and Two-Span Beams under the Action of a Moving Mass Load," in *Proceedings of the First National Congress of Applied Mechanics*, 1951, pp. 81–90.
- [5] S. Timoshenko, *Vibration of bridges*. 1927.
- [6] C. Inglis, *A Mathematical treatise on vibration of railway bridges*. Cambridge: Cambridge university press, 1934.
- [7] M. M. Stanišić and J. C. Hardin, "On the response of beams to an arbitrary number of concentrated moving masses," *J. Franklin Inst.*, vol. 287, no. 2, pp. 115–123, 1969.
- [8] S. Timoshenko, *Vibration problems in engineering*, 4th ed. New York: D.Van Nostard Company, 1974.
- [9] L. Fryba, *Vibrations of Solids and Structure Under Moving Loads*, 3rd ed. London: Thomas Telford Ltd, 1999.
- [10] E. Hwang and A. Nowak, "Simulation of Dynamic Load for Bridges," *J. Struct. Eng.*, vol. 117, no. 5, pp. 1413–1434, 1991.
- [11] T. Wang, V. Garg, and K. Chu, "No Title," *J. Struct. Eng.*, vol. 117, no. 7, pp. 2099–2116, 1991.
- [12] Y. Yang and B. Lin, "VEHICLE-BRIDGE INTERACTION ANALYSIS BY DYNAMIC CONDENSATION METHOD," *J. Struct. Eng.*, vol. 121, no. 11, pp. 1636–1643, 1995.
- [13] G. B. Warburton, *The Dynamical Behaviour of Structures*, 2nd ed. Oxford: Pergamon Press, 1976.
- [14] C. Dodds and J. Robson, "The Description of Road Surface Roughness," *J. Sound Vib.*, vol. 31, no. 2, pp. 175–183, 1973.
- [15] M. Inbanathan and M. Wieland, "Closure to "Bridge Vibrations due to Vehicle Moving over Rough Surface"," *J. Struct. Eng.*, vol. 113, no. 9, pp. 1820–1821, 1989.
- [16] F. Mannering and W. Kilareski, *Principles of Highway Engineering and traffic Analysis*. New York: John Wiley and Sons, 1990.

- [17] P. Ullidtz, *Pavement analysis*. Elsevier, 1987.
- [18] J. Lin and C. Weng, "Evaluation of dynamic vehicle load on bridge decks," *J. Chinese Inst. Eng.*, vol. 27, no. 5, pp. 695–705, 2004.
- [19] A. Yavari, M. Nouri, and M. Mofid, "Discrete element analysis of dynamic response of Timoshenko beams under moving mass," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 33, no. 3, pp. 143–153, 2002.
- [20] J. E. Akin and M. Mofid, "Numerical Solution for Response of Beams with Moving Mass," *J. Struct. Eng.*, vol. 115, no. 1, pp. 120–131, 1989.
- [21] A. S. Nowak, "Live load model for highway bridges," *Struct. Saf.*, vol. 13, no. June 1994, pp. 53–66, 1993.
- [22] H. H. Nassif and A. S. Nowak, "Dynamic effect of truck loads on girder bridges," pp. 383–387, 1995.
- [23] P. Gonzalez, A. Rattigan, "The dynamic amplification on Highway Bridges due to traffic flow," 2001.
- [24] J. Keenahan, P. J. McGetrick, A. González, and E. J. O'Brien, "Using Instrumented Vehicles to detect damage in bridges," in *15th International Conference on Experimental Mechanics, Porto, Portugal, 22–27 July 2012, Paper No. 2934.*, 2012, vol. 1, pp. 07–22.
- [25] O. Mohammed, A. Gonzalez, and D. Cantero, "Dynamic impact of heavy long vehicles with equally spaced axles on short-span highway bridges," *Balt. J. Road Bridg. Eng.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–13, 2018.
- [26] Y. Li, E. O'Brien, and A. González, "The development of a dynamic amplification estimator for bridges with good road profiles," *J. Sound Vib.*, vol. 293, no. 1–2, pp. 125–137, May 2006.
- [27] A. González, E. J. O'Brien, and D. Cantero, "Maximum dynamic stress on bridges traversed by moving loads," *Proc. ICE - Bridg. Eng.*, vol. 162, no. 2, pp. 75–85, Jan. 2009.
- [28] A. González, P. Rattigan, E. J. O'Brien, and C. Caprani, "Determination of bridge lifetime dynamic amplification factor using finite element analysis of critical loading scenarios," *Eng. Struct.*, vol. 30, no. 9, pp. 2330–2337, Sep. 2008.
- [29] J. He and Z.-F. Fu, *Modal analysis*, vol. 53. 2001.
- [30] R. Brincker, L. Zhang, and P. Andersen, "Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition," in *Proceedings of the International Modal Analysis Conference – IMAC, 2000*, vol. 4062, pp. 625–630.
- [31] R. Brincker and C. Ventura, *Introduction to Operational Modal Analysis*. 2015.
- [32] A. González, "Vehicle-bridge dynamic interaction using finite element modelling," in *Finite element analysis*, 2010, pp. 637–662.

- [33] H. Zhong, M. Yang, and Z. J. Gao, "Dynamic responses of prestressed bridge and vehicle through bridge-vehicle interaction analysis," *Eng. Struct.*, vol. 87, pp. 116–125, 2015.
- [34] P. J. McGetrick, C.-W. Kim, A. Gonzalez, and E. J. O. Brien, "Experimental validation of a drive-by stiffness identification method for bridge monitoring," 2015.
- [35] M. R. Willford and P. Young, *A Design Guide for Footfall Induced Vibration of Structures*, vol. 44, no. 0. 2006.
- [36] K. A. Hossain and K. M. Amanat, "Effect of span length on the dynamic amplification factor in the deck of concrete box girder bridges," *J. Civ. Eng.*, vol. 39, no. 1, pp. 59–75, 2011.
- [37] A. González, J. Dowling, E. J. O'Brien, and A. Znidaric, "Experimental determination of dynamic allowance for traffic loading in bridges," Aug. 2012.
- [38] O. Burdet and S. Corthay, "Dynamic load testing of Swiss bridges," *IABSE Symp. San Fr. Extending Lifesp. Struct.*, vol. 73/2, pp. 1123–1128, 1995.
- [39] Raid Karoumi, Andreas Andersson, and H. Sundquist, "Static and Dynamic Load Testing of the New Svinesund Arch Bridge," *Int. Conf. Bridg. Eng. 21st Century, Hong Kong*, 2006.
- [40] Z. Tian, L. Zhang, T. Peng, and F. Ma, "Load Tests of Dongping Bridge in Foshan, China," *IABSE Congr. Rep.*, vol. 17, no. 3, pp. 492–493, Jan. 2008.
- [41] A. Kopacik, "Loading Tests of Highway Bridges in Slovakia," no. October, 2003.
- [42] B. Jacob, L. Central, V. Dolcemascolo, L. Régional, and D. Ouest, "Dynamic Interaction Between Instrumented Vehicles and Pavements," pp. 142–160, 1997.
- [43] SAMARIS, "Sustainable and Advanced Materials for Road InfraStructure – Guidance for the optimal assessment of highway structures," 2006.
- [44] A. González and A. Žnidarič, "Recommendations on dynamic amplification allowance," *Assess. Rehabil. Cent. Eur. Highw. Struct. ARCHES, Deliv. D10*, 2009.
- [45] F. Fleming and J. . Romualdi, "Dynamic response of Highway Bridges," *J. Struct. Div.*, vol. 87, no. 7, pp. 31–60, 1961.
- [46] S. P. Brady, E. J. O'Brien, and A. Žnidarič, "Effect of Vehicle Velocity on the Dynamic Amplification of a Vehicle Crossing a Simply Supported Bridge," *J. Bridg. Eng.*, vol. 11, no. 2, pp. 241–249, Mar. 2006.
- [47] A. González and A. Znidaric, "Recommendations on dynamic amplification allowance," European Commission, 2009.
- [48] M. I and G. Teteris, *Būvmehānika*. ZVAIGZNE, 1997.

- [49] A. Paeglitis and A. Paeglitis, "Traffic load models for Latvian road bridges with span length up to 30 meters," *Balt. J. Road Bridg. Eng.*, vol. 9, no. 2, pp. 139–145, Jun. 2014.
- [50] H. Bachmann and W. Ammann, *Vibrations in structures: induced by man and machines*. Zurich: International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), 1987.
- [51] A. K. Chopra, *Dynamic of Structures: Theory and Applications of Earthquake engineering*, 4th ed. Pearson, 2014.
- [52] F. Orban, "Damping of materials and members in structures," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 268, no. 1, 2011.
- [53] C. (Dublin I. O. T. (Dublin I. O. T. Caprani and S. Bolton, "Structural Dynamics," 2002.
- [54] M. S. Cao, G. G. Sha, Y. F. Gao, and W. Ostachowicz, "Structural damage identification using damping: A compendium of uses and features," *Smart Mater. Struct.*, vol. 26, no. 4, 2017.
- [55] K. Henchi, M. Fafard, M. Talbot, and G. Dhatt, "AN EFFICIENT ALGORITHM FOR DYNAMIC ANALYSIS OF BRIDGES UNDER MOVING VEHICLES USING A COUPLED MODAL AND PHYSICAL COMPONENTS APPROACH," *J. Sound Vib.*, vol. 212, no. 4, pp. 663–683, May 1998.
- [56] R. Cantieni, "Dynamic load tests on highway bridges in Switzerland – 60 years of experience," Dubendorf, Switzerland, 1983.
- [57] J. Billing, "Dynamic test of bridges in Ontario, 1980; data capture, test procedures and data processing," Downsview, 1982.
- [58] G. Tilly, "Dynamic behaviour of concrete structures, in Developments in civil engineering," 1986, vol. 13.
- [59] S. F. Earle, "Evaluation Of Dynamic Load Allowance Factors For Reinforced Concrete Highway Bridges," 2010.
- [60] P. Kirkegaard, R. K. Nielsen, S, and I. Enevoldsen, "Heavy Vehicles on Minor Highway Bridges – Calculation of Dynamic Impact Factors from Selected Crossing Scenarios," 1997.
- [61] P. Paultre, J. Proulx, and M. Talbot, "Dynamic Testing Procedures for Highway Bridges Using Traffic Loads," *Journal of Structural Engineering*, vol. 121, no. 2. pp. 362–376, 1995.
- [62] A. O'Connor, "Probabilistic traffic load modelling for highway bridges," Trinity College Dublin, 2001.
- [63] I. Paeglite and A. Paeglitis, "The Dynamic Amplification Factor of the Bridges in Latvia," *Procedia Eng.*, vol. 57, pp. 851–858, 2013.
- [64] A. Gozales and O. Mohammed, "Damage detections in bridges based on patterns of dynamic amplification." Wiley, p. 20, 2019.

- [65] S. G. M. Neves, F. M. Azevedo, and R. Calçada, "A direct method for analyzing the vertical vehicle-structure interaction," *Eng. Struct.*, vol. 34, pp. 414–420, 2012.
- [66] C. W. Kim, M. Kawatani, and K. B. Kim, "Three-dimensional dynamic analysis for bridge-vehicle interaction with roadway roughness," *Comput. Struct.*, vol. 83, pp. 1627–1645, 2005.
- [67] L. Ding, H. Hao, and X. Zhu, "Evaluation of dynamic vehicle axle loads on bridges with different surface conditions," *J. Sound Vib.*, vol. 323, no. 3–5, pp. 826–848, Jun. 2009.
- [68] S. S. Law and J. Li, "Updating the reliability of a concrete bridge structure based on condition assessment with uncertainties," *Eng. Struct.*, vol. 32, no. 1, pp. 286–296, Jan. 2010.
- [69] O. Mohammed and A. González, "Static and dynamic moments for any plane within a straight solid slab bridge caused by the crossing of a truck," *Eng. Struct.*, vol. 150, pp. 465–480, 2017.
- [70] J. Oliva, J. M. Goicolea, P. Antolín, and M. Á. Astiz, "Relevance of a complete road surface description in vehicle-bridge interaction dynamics," *Eng. Struct.*, vol. 56, pp. 466–476, 2013.
- [71] X. Yin, Z. Fang, C. S. Cai, and L. Deng, "Non-stationary random vibration of bridges under vehicles with variable speed," *Eng. Struct.*, vol. 32, no. 8, pp. 2166–2174, Aug. 2010.
- [72] G. Lombaert and J. P. Conte, "Random Vibration Analysis of Dynamic Vehicle-Bridge Interaction Due to Road Unevenness," *J. Eng. Mech.*, vol. 138, no. 7, pp. 816–825, Jul. 2012.
- [73] F. Zang and D. Feng, "Numerical simulation of dynamic response of subgrade under moving heavy truck in cold regions." 2013.
- [74] I. Paeglite and J. Smirnovs, "Dynamic effects caused by the bridge-vehicle interaction," 2015, pp. 1–4.
- [75] J. Zwolski and J. Bień, "Modal analysis of bridge structures by means of Forced Vibration Tests," *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 17, no. 4, pp. 590–599, 2011.
- [76] M. J. Whelan, M. V. Gangone, K. D. Janoyan, and R. Jha, "Real-time wireless vibration monitoring for operational modal analysis of an integral abutment highway bridge," *Eng. Struct.*, vol. 31, no. 10, pp. 2224–2235, 2009.
- [77] F. Ubertini, C. Gentile, and A. L. Materazzi, "Automated modal identification in operational conditions and its application to bridges," *Eng. Struct.*, vol. 46, pp. 264–278, 2013.
- [78] D. J. Ewins, *Modal testing: theory, practice, and application*, 2nd ed. Baldock, 2000.

- [79] N. M. M. MAIA, J. M. M. SILVA, E. A. M. ALMAS, and R. P. C. SAMPAIO, "DAMAGE DETECTION IN STRUCTURES: FROM MODE SHAPE TO FREQUENCY RESPONSE FUNCTION METHODS," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 17, no. 3, pp. 489–498, May 2003.
- [80] S. ALAMPALLI, "EFFECTS OF TESTING, ANALYSIS, DAMAGE, AND ENVIRONMENT ON MODAL PARAMETERS," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 14, no. 1, pp. 63–74, Jan. 2000.
- [81] E. Reynders, "System Identification Methods for (Operational) Modal Analysis: Review and Comparison," *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. 19, no. 1, pp. 51–124, 2012.
- [82] X. Meng, N. Gogoi, and A. H. Dodson, "Using multi-constellation GNSS and EGNOS for bridge deformation monitoring," *DING X. Jt. Int. Symp. Deform. Monit.*, pp. 1–5, Jan. 2011.
- [83] S. S. Kessler and S. M. Spearing, "STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF COMPOSITE MATERIALS USING PIEZOELECTRIC SENSORS," 2002.
- [84] P. Paultre, O. Chaallal, and J. Proulx, "Bridge dynamics and dynamic amplification factors — a review of analytical and experimental findings," *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 19, no. 2, pp. 260–278, Apr. 1992.
- [85] X. ZHOU, Y. XIA, Z. WEI, and Q. WU, "A videogrammetric technique for measuring the vibration displacement of stay cables," *Geo-spatial Inf. Sci.*, vol. 15, no. 2, pp. 135–141, Jun. 2012.
- [86] National Instruments, "Application Note 078 – Strain Gauge Measurements," no. August, p. 12, 1998.
- [87] C. Carey, E. J. O'Brien, A. Malekjafarian, M. Lydon, and S. Taylor, "Direct field measurement of the dynamic amplification in a bridge," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 85, pp. 601–609, 2017.
- [88] C. O'Connor and P. A. Shaw, *Bridge Loads*. Spon Press, 2000.
- [89] T. Nwofor and S. Sule, "A COMPARATIVE STUDY OF BS8110 AND EUROCODE 2 STANDARDS FOR A COMPARATIVE STUDY OF BS8110 AND EUROCODE 2 STANDARDS FOR DESIGN OF A CONTINUOUS," no. May, 2015.
- [90] T. A. A. O. S. HIGHWAY, *ASSHTO LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS, 6th EDITION*. 2012.
- [91] B. Bakht and R. DORTON, "The Ontario Bridge Code : Second Edition," pp. 88–93, 1990.
- [92] V. Der Veen, D. Boer, D. Version, V. Der Veen, and D. Boer, "Using Eurocodes and Aashto for assessing shear in slab bridges," 2016.
- [93] М. Р. Р. ФЕДЕРАЦИИ and СВОД, *Мосты и трубы*. Россия, 2011, pp. 1–319.
- [94] "LVS EN 1991-2 Satiksmes slodzes tiltiem," 2003.

- [95] I. Vayas and A. Iliopoulos, *Design of Steel-Concrete Composite Bridges to Eurocodes*. 2013.
- [96] "LVS 190-11 Tilta inspekcija un pārbaude ar slodzi," Latvia, 2009.
- [97] I. Paeglite, J. Smirnovs, and A. Paeglitis, "Dynamic Behavior of Prestressed Slab Bridges," *Procedia Eng.*, vol. 172, no. Supplement C, pp. 831–838, 2017.
- [98] I. Paeglite, A. Paeglitis, and J. Smirnovs, "Dynamic amplification factor for bridges with span length from 10 to 35 meters," *Eng. Struct. Technol.*, vol. 6, no. 4, pp. 151–158, Oct. 2014.
- [99] P. Múčka, "Road Roughness Limit Values Based on Measured Vehicle Vibration," *J. Infrastruct. Syst.*, vol. 23, no. 2, p. 04016029, 2016.
- [100] M. W. Sayers, T. D. Gillespie, and W. D. O. Paterson, *Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements*, no. 46. 1986.
- [101] LVC, *Ceļu specifikācijas 2019*. Latvijas Valsts ceļi, 2019.
- [102] A. Paeglitis and A. Gailis, *Tiltu nestspējas minimālā akceptējamā līmeņa noteikšana valsts autoceļos*. RTU izdevniecība, 2006.
- [103] I. Paeglite, J. Smirnovs, and A. Paeglitis, "Evaluation of the increased dynamic effect on the highway bridge superstructure," *Balt. J. Road Bridg. Eng.*, vol. 13, no. 3, pp. 301–312, 2018.
- [104] Andris Paeglitis, "Satiksmes slodzes modeļi Latvijas autoceļu tiltiem ar laidumu garumiem līdz 30 metriem," Riga Technical University, Riga, 2012.
- [105] R. Awall, T. Hayashikawa, T. Matsumoto, and X. He, "Parametric Study on Bridge-vehicle Interaction Dynamics of Horizontally Curved Twin I-girder Bridge," no. July, pp. 4–6, 2011.



Ilze Paeglīte Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvusi profesionālo bakalaura grādu studiju programmā "Transportbūves" un Londonas Imperiālajā koledžā – maģistra grādu studiju programmā "Tērauda konstrukciju projektēšana un biznesa menedžments".

I. Paeglīte ir RTU Ceļu un tiltu katedras lektore un zinātniskā asistente. I. Paeglītes zinātniskā darbība ir saistīta ar tiltu konstrukciju ilgtspējību, tiltu pārbaudēm un dinamisko īpašību izpēti. Viņa ir zinātniskā žurnāla "The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering" redaktora asistente. Viņa ir arī sertificēta tiltu inženiere. Profesionālo pieredzi guvusi, veicot tiltu projektēšanu un tehnisko apsekošanu.

Ilze Paeglīte holds a professional Bachelor's degree in Transportation Engineering from Riga Technical University (RTU) and a Master's degree in Steel Structural Design and Business Management from Imperial College London.

Paeglīte is a lecturer and research assistant with the Department of Roads and Bridges of RTU. Her fields of research are sustainability of bridge structures, bridge assessment and dynamic analysis. She is an assistant editor of the scientific journal "The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering".

Paeglīte is also a certified bridge engineer. She gained her professional experience working on bridge design and assessment projects.