RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Būvniecības inženierzinātņu fakultāte
Transportbūvju institūts

Ilze PAEGLĪTE
Doktora studiju programmas "Būvzinātne" doktorante

KUSTĪGĀS SLODZES DINAMISKĀS IEDARBES UZ AUTOCEĻU TILTIEM EKSPERIMENTĀLA IZPĒTE UN NOVĒRTĒJUMS

Promocijas darbs

Būvniecības un transporta inženierzinātnes nozares sauszemes transporta apakšnozare
(promocijas padome "RTU P-06")
Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai

Zinātniskais vadītājs
Dr. sc. ing. profesors
Juris SMIRNOVS

Rīga 2021

Darbs izstrādāts ar valsts pētījumu programmas “Inovatīvi 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.

ANOTĀCIJA

Tilti un ceļa pārvadi ir nozīmīgi ekonomiski un politiski aktīvi, kas ar katru gadu tikai palielinās, tāpēc ir svarīgi noteikt tiltu reālo darbību slodzes iedarbībā. Dinamisko īpašību izpēte ir svarīgs tiltu drošuma nodrošināšanas faktors, kas lielā mērā ietekmē tiltu veiktspēju un kalpošanas laiku. Promocijas darba praktiskā nozīme saistīta ar tiltu infrastruktūras ilgmūžību. .

Izmantojot tiltu pārbaudēs ar dinamisku slodzi iegūtos datus, izstrādāta tiltu dinamiskās veiktspējas novērtēšanas metode – dinamiskuma indekss, kas ļauj novērtēt jau ekspluatācijā esošu un jaunu tiltu konstrukciju dinamiskās veiktspējas līmeni, ņemot vērā tādus tilta parametrus kā laiduma garuma/augstuma attiecība, pašsvārstību frekvence, svārstību rimšanas koeficients, relatīvā vertikālā deformācija un starptautiskais seguma nelīdzenuma indekss *IRI*. Ar šo metodi var noteikt tiltu dinamiskās veiktspējas līmeni, neveicot pārbaudi ar dinamisku slodzi. Dinamiskuma indeksa aprēķina metodi var izmantot tiltu īpašnieki un uzturētāji, lai notieku konkrētā tilta dinamiskās veiktspējas līmeni.

Darbā ir noteiktas arī maksimāli pieļaujamās dinamiskā koeficienta vērtības tipveida dzelzsbetona tiltiem, ņemot vērā Latvijā maksimāli pieļaujamās ikdienas satiksmes smagsvara slodzes. Iegūtos rezultātus var izmantot ekspluatācijā esošu vai pārbūvētu dzelzsbetona siju tiltu maksimāli pieļaujamās slodzes un drošuma novērtēšanai.

Izmantojot promocijas darbā veikto pētījumu rezultātus, sniegtas rekomendācijas Latvijas valsts standarta *LVS 190-11* “Tiltu inspekcija un pārbaude ar slodzi” papildināšanai ar konkrētām prasībām tiltu pārbaudes ar dinamisku slodzi veikšanai un pārbaudē iegūto rezultātu novērtējumam, ļaujot precīzāk veikt tiltu pārbaudi ar dinamisku slodzi un interpretēt pārbaudēs iegūtos rezultātus.

ANNOTATION

Bridges and overpasses are an important economic and political asset and its worh grows every year that is why it is important to find the real reaction of the bridge to a live load. Moreover, a research about dynamic properties of bridges is an important safety ensuring factor, which greatly affects the performance and service life of bridges. The practical significance of the dissertation is related to the durability and longevity of the bridge infrastructure.

Using data obtained from the dynamic testing of bridges a method was developed to evaluate bridge dynamic level without performing a dynamic test . In this method a dynamic index of the bridge is calculated. Dynamic index allows to evaluate the dynamic level of existing and new structures taking into account such bridge parameters as span length / height ratio, natural frequency, vibration damping coefficient, relative deflection and international roughness index IRI. Dynamic index method can be used by bridge owners and maintainers to determine the dynamic potential of a particular bridge.

The maximum allowable values of the dynamic amplification factor for standard prestressed concrete beam bridges were determined. These values were calculated for maximum allowed traffic load in Latvia. The obtained results can be used for the safety assessment of existing and reconstructed reinforced concrete beam bridges.

Using the results of the dissertation, recommendations are given for supplementing the Latvian state standard LVS 190-11 “Bridge inspection and load testing” with specific requirements for dynamic bridge testing and evaluation of the test results, allowing more accurate dynamic bridge testing and interpretation of the test results.

SATURS

ANOTĀCIJA 3

ANNOTATION 4

IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI 8

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS 12

Tēmas aktualitāte 12

Darba mērķis 14

Pētījuma uzdevumi 14

Aizstāvēšanai izvirzītās tēzes 14

Darba zinātniskā novitāte 15

Darba praktiskā vērtība 15

Pētījuma ierobežojumi un lietojuma robežas 16

Pētījumā izmantotās iekārtas un metodes 16

Darba uzbūve 16

Darba aprobācija un publikācijas 17

1. AUTOTRANSPORTA SLODZES DINAMISKĀS IEDARBES UZ AUTOCEĻU TILTU LAIDUMA KONSTRUKCIJU UN TO NOTEIKŠANAS METODES. LITERATŪRAS APSKATS 20

1.1. Tiltu dinamikas problēmai veltītie starptautiskie projekti 22

1.2. Dinamiskās iedarbes raksturojošie parametri 28

1.2.1. Pašsvārstību frekvences un svārstību formas – modālā analīze 29

1.2.2. Svārstību rimšanas koeficients 31

1.2.3. Uzspiestās svārstības 33

1.2.4. Dinamiskais koeficients (DK) 35

1.3. Tilta dinamisko raksturlielumu analītiskās aprēķina metodes 40

1.3.1. Tilta nestspējas un dinamisko raksturlielumu aprēķina metodes 40

1.3.2. Tilta un automašīnas mijiedarbības analītiskās aprēķina metodes 40

1.4. Autotransporta slodzes radīto svārstību tilta konstrukcijā eksperimentālas noteikšanas metožu apskats ... 42
1.4.1. Tilta pārbaude ar slodzi ... 43
1.4.2. Tilta modālās pārbaudes metodes ... 44
1.5. Iekārtas un instrumenti mērījumu veikšanai ... 45
1.5.1. Akselerometri ... 45
1.5.2. Pārvietojumu mērītāji ... 47
1.5.3. Tenzometri ... 49
1.5.4. Datu iegūšanas un apstrādes sistēmas ... 50
1.5.5. Pārbaudēs izmantotās automašīnas ... 51
1.6. Dinamiskās slodzes ievērtējums slodžu aprēķina modelī ... 52
1.6.1. Lielbritānijas konstrukciju aprēķina standarts (*BS*) ... 52
1.6.2. Amerikas Savienoto Valstu konstrukciju aprēķina standarts (*AASHTO*) ... 54
1.6.3. Krievijas konstrukciju aprēķina standarts (*SNIP*) ... 56
1.6.4. Eiropas Savienības konstrukciju aprēķina standarts (*EUROCODE*) ... 57
1.7. Standarts tilta pārbaudei ar dinamisku slodzi Latvijā ... 59
2. METODIKA TILTA PĀRBAUDEI AR DINAMISKU SLODZI ... 61
2.1. Pārbaudes plānošana ... 62
2.2. Mērinstrumentu uzstādīšanas un slodzes sagatavošana ... 63
2.3. Pārbaužu veikšana ... 64
2.4. Datu apstrāde ... 66
2.5. Rezultātu novērtēšana ... 67
2.6. Tilta pārbaude ar dinamisku slodzi - Ceļa pārvads pār dzelzceļu Jelgava–Tukums autoceļa A9 Rīga–Liepāja 38,7km ... 69
2.7. Secinājumi ... 78
3. TILTU DINAMISKĀS VEIKTSPĒJAS NOVĒRTĒŠANAS METODE ... 79
3.1. Eksperimentāli iegūto dzelzsbetona tiltu dinamisko raksturlielumu analīze ... 81

3.1.1. Dinamiskie koeficienti tiltiem, kas pārbaudīti no 1991. līdz 2016. gadam 82
3.1.2. Dzelzsbetona plātņu tilti 88
3.1.3. Spriegbetona siju tilti (rekonstrukcijas) 94
3.1.4. Uz vietas betonēti spriegbetona tilti 98
3.1.5. Slodzes dinamiskās iedarbes ietekmējošie faktori 109
3.2. Tiltu dinamiskās veiktspējas novērtēšanas metode – dinamiskuma indekss (DI) 116
3.2.1. Dzelzsbetona plātnes tilti 119
3.2.2. Saspriegtas dzelzsbetona plātnes 121
3.2.3. Saspriegtas konstrukcijas ribotu plātņu tilti 123
4. SIJU TILTU PIEĻAUJAMIE DINAMISKIE KOEFICIENTI 125
4.1. Tiltu raksturojums 125
4.2. Metode pieļaujamā dinamiskā koeficienta noteikšanai 127
4.3. Pieļaujamie dinamiskie koeficienti siju tiltiem 127
4.4. Secinājumi 131
5. REKOMENDĀCIJAS DINAMISKO RAKSTUROJUMU VĒRTĪBU IEKĻAUŠANAI *LVS 190-11* "TILTU INSPEKCIJA UN PĀRBAUDE AR SLODZI" 133
SECINĀJUMI 135
LITERATŪRAS SARAKSTS 137
1. PIELIKUMS 146

IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI

	Latviešu valodā	**Angļu valodā**
Saīsinājumi		
AASHTO	Amerikas Autoceļu un transporta darbinieku asociācija	*American Association of State Highway and Transportation Officials*
AC	autoceļš	Road
ADR	dinamiskuma novērtējuma koeficients	*Assesment dynamic ratio*
BS	Lielbritānijas standarts	*British standart*
DI	dinamiskuma indekss	*Dynamic index*
DK	dinamiskais koeficients	*Dynamic amplification factor* (*DAF*)
DOF	kustības brīvību skaits	*Degrees of freedom*
DLA	pieļaujamā dinamiskā slodze	*Dynamic load allowance*
EMA	eksperimentālā modālā analīze	*Experimental modal analysis*
EN	Eiropas normatīvs	*European standart*
FFT	ātrais Furjē pārveides algoritms	*Fast furier transform*
GEM	galīgo elementu metode	*Finite element method*
IK	ietekmes koeficients	*Impact factor*
IRI	starptautiskais seguma nelīdzenuma indekss	*International roughness index*
ISO	Starptautiskā standartizācijas organizācija	*International Organization for Standardization*
LBS	Latvijas būvniecības standarts (vairs nav)	*Previous Latvian standart*
LM	slodzes modelis	*Load model*
LVS	Latvijas Valsts standarts	*Latvian standart*
MEMS	mikroelektromehāniskās sistēmas	*Micromechanical systems*
MDB	materiālu dinamiskās īpašības	*Material dynamic behaviour*
OHBDC	Ontario reģiona Autoceļu tiltu aprēķina standarts	*Ontario Highway Bridge Design Code*
OMA	ekspluatācijas modālā analīze	*Operational modal analysis*
PSD	spēka spektrālais blīvums	*Power spectral density*

RILEM	Starptautiskā Būvmateriālu, sistēmu un konstrukciju laboratoriju un ekspertu savienība	*The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures* (saīsinājums no franču valodas – *Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux*)
SHM	konstrukcijas veselības monitorings	*Structural helth monitoring*
SNIP	Krievijas būvniecības standarts	*Russian standart*
VSIA	valsts sabiedrība ar ierobežotu atbildību	*State Joint Stock Company*
WIM	svēršana kustībā	*Weight in motion*
Apzīmējumi (latīņu burti)		
A	svārstību amplitūda	*Oscillation amplitude*
A_j	Furjē j-tā harmoniskās komponentes amplitūda	*Amplitude of Furje harmonic components*
c	viskozās rimšanas koeficients	*Viscose damping coefficient*
c_{cr}	kritiskais viskozās rimšanas koeficients	*Critical viscose damping Coefficient*
C_s	svārstību rimšanas matrica	*Damping matrix*
D	attālums līdz deformācijas šuvei	*Distance to the deformation joint*
f_n un f_o	brīvo svārstību frekvence	*Natural frequency*
f_1	brīvo svārstību leņķiskā frekvence	*Natural angular requency*
F_s	spēka vektora matrica	*Force vector matrix*
G	brauktuves gabarīts	*Carriageway gauge*
h	laiduma konstrukcijas augstums	*Hight of the slab or beam*
k	konstrukcijas stingums	*Stifness*
K_s	stinguma matrica	*Stifness matrix*
$K1_{(Ai)}$	kritērija K1 vērtība diapazonā no 1 līdz 4	*Criteria K1 value form 1 to 4*
$K2_{(Ai)}$	kritērija K2 vērtība diapazonā no 1 līdz 4	*Criteria K2 value form 1 to 4*
$K3_{(Ai)}$	kritērija K3 vērtība diapazonā no 1 līdz 4	*Criteria K3 value form 1 to 4*

$K4_{(Ai)}$	kritērija K4 vērtība diapazonā no 1 līdz 4	*Criteria K4 value form 1 to 4*
$K5_{(Ai)}$	kritērija K5 vērtība diapazonā no 1 līdz 4	*Criteria K5 value form 1 to 4*
L	laiduma garums	*Span length*
L_{max}	maksimālais laiduma garums	*Max span length*
m	masa	*Mass*
$M_{g,i}$	konstruckijas pašsvara ierosinātā piepūle	*Selfweight caused stress in the structure*
$M_{Rd,i}$	konstrukcijas visvairāk noslogotā elementa vai šķēluma pieļaujamā lielākā piepūle vai spriegumi	*Maximum allowable stress on the most loaded element or section of the structure*
M_s	masas matrica	*Mass matrix*
$M_{p.i}$	konkrētās kustīgās slodzes statiskās iedarbības ierosinātā lielākā normatīvā piepūle vai spriegumi	*Maximum static stress due to the static effect of the specific moving load*
N	kustības brīvību skaits	*Number of degrees of freedom*
n_1	pirmās svārstību formas frekvence	*Frequency of first mode*
p_o	amplitūda vai uzspiesto svārstību frekvence	*Amplitude or forced vibration frequency*
p(t)	ārējais iesvārstošais spēks	*Oscilating force*
q_{ik}	vienmērīgi izkliedēta slodze	*Evenly distributed load*
q_{rk}	izkliedēta slodze atlikušajam laukumam	*Distributed load for remaining space on the bridge*
$Q_{ik\alpha}$ un Q_{ki}	tandēma slodze SM1	*Tandem load*
R_{dyn}	maksimālās dinamiskā reakcija	*Max dynamic reaction*
R_{stat}	maksimālā statiskā reakcijas	*Max static reaction*
R_{fil}	filtrētā dinamiskā reakcija	*Filtered dynamic reaction*
T	svārstību periods	*Oscillation period*
T_{01}	pirmās svārstību formas periods	*Period of first frequnency mode*
T_n	brīvo svārstību periods	*Oscilation Natural period*
U_j	dinamiskā palielinājuma faktors	*Dyanamic amplification factor* (*calculated*)

$u(t)$	pārvietojums laikā	*Displacement* (*in time*)
V	ātrums	*Velocity*
V_k	svārstību amplitūda uzspiestām svārstībām	*Oscillation amplitude for forced oscillations*
W	pārvietojuma vektora matrica	*Displacement vector matrix*
$\dot{W}$	ātruma vektora matrica	*Velocity vector matrix*
$\ddot{W}$	paātrinājuma vektora matrica	*Axxeleration vector matrix*
Apzīmējumi (grieķu burti)		
Φ	pašsvārstību frekvenču vektoru formu matricu	*Natrual frequency vector form matrix*
Ω	frekvenču spektrālā matrica	*Frequency spectral matrix*
α un α_{Qi}	slodzes drošības koeficients	*Load partial factor*
β_Q	slodzes koriģējošais koeficients	*Load correction factor*
δ	logaritmiskais dekrements	*Logarithmic decrement*
ξ	rimšanas koeficients	*Damping ratio*
λ	laiduma garums vai slogotais ietekmes līnijas garums	*Span length or loaded influence line length*
1+μ	dinamiskais koeficients (*SNIP* standartā)	*Dynamic coefficient* (*in SNIP standart*)
υ	pārvietojums	*Deformation*
ύ	ātrums	*Velosity*
ü	paātrinājums	*Acceleration*
$\Delta\varphi_{fat}$	dinamiskais palielinājums no deformācijas šuves iedarbes	*Dynamic amplification from deformation joint*
ϖ	cikliskā frekvence	*Circular frequency*
ω_n	brīvo svārstību leņķiskā frekvence	*Natural circular frequency*
ω_1	aprēķinātā aploces frekvence	*Calculated circular frequency*
ω_j	cikliskā frekvence j-ai slodzes komponente	*Circular frequency for load component j*

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 trīsasu mehāniskā transportlīdzekļa ar trīsasu piekabi svars nedrīkst pārsniegt 40 t, izņemot *ISO* 40 pēdu konteinervedējs – 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. Eirokodeksi 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 *LatBRUTUS* 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) pārbaudes 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 norāda uz 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, rāmjveida 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 50Hz).
- 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 un 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 modelī.

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. nodaļās 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, Saporo, 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. Riga, Latvia. (Stenda referāts).
3. RTU 57. starptautiskās zinātniskās konferences sekcija valsts pētījumu programma "Inovatīvi materiāli un viedās tehnoloģijas vides drošumam, IMATEH", "Transportlīdzekļu svara un kustības ātruma ietekmes novērtēšana uz konstrukcijas dinamiskajām īpašībām" 2016. gada 17. oktobrī, Rīga, Latvija. (Prezentācija).
4. 8tht 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. ICSCE 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. AUTOTRANSPORTA SLODZES DINAMISKĀS IEDARBES UZ AUTOCEĻU TILTU LAIDUMA KONSTRUKCIJU UN TO NOTEIKŠANAS METODES. 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. Pēc dažu dzelzceļa tiltu sabrukšanas Lielbritānijā 1849. gadā zinātnieks *Willis* [1] veica laboratorijas pārbaudes dzelzs sijas modeļiem, kas tika izmantoti sabrukušajiem tiltiem [2], un tika nolemts turpmāk izmantot kopnes konstrukcijas tiltus, kā arī vairāk izmantot tēraudu nevis dzelzi, jo tērauda stiprība ir lielāka par dzelzi un tas nav tik trausls.

Senākais pētījums par tiltu dinamisko reakciju uz automašīnas radīto slodzi ir zinātnieka *Jefcott* darbs, kas tapis 1929. gadā [3]. 20. gadsimta vidū tika radīti aptuveni risinājumi idealizētu siju dinamikas problēmai, ko veica zinātnieks *Ayre* [4]. Kopš 19. gadsimta tiltu dinamikas tēma ir interesējusi daudzus zinātniekus, piemēram, Timošenko [5] apskatīja pulsējošu slodzi, kas šķērso tiltu, savukārt *Inglis* [6] veica analīzi vilcienam, kas šķērso tiltu, un apskatīja vairākus svarīgus faktorus: kustīgās slodzes efektu, svārstību rimšanas ietekmi.

Dinamisko analīzi divbalstu sijai, pār kuru pārvietojas kustīga slodze, veica zinātnieki *Stanisic* un *Hardin* [7]. Zinātnieks Timošenko savukārt pētīja koncentrētas slodzes, kas pārvietojas ar noteiktu ātrumu pār siju, neņemot vērā svārstību rimšanu [8], un atrada izteiksmi, kā aprakstīt kustīgās masas kritisko ātrumu. Lielu ieguldījumu kustīgās slodzes radītās ietekmes uz tilta konstrukciju izpētē ir devis zinātnieks *Fryba* [9], kas pētīja dzelzceļa tiltu slodzes un konstrukcijas.

Pagājušā gadsimta 90. gadu sākumā zinātnieki *Hwang* [10], *Wang* [11], *Young* [12] sāka risināt tilta un automašīnas mijiedarbības problēmu. Tomēr lielākā daļa autoru – gan *Timošenko* [8], gan *Warburton* [13] – pievēršas pašas problēmas noteikšanai, nevis tās risināšanai. Ir noteikts, ka slodze, automašīnai pārvietojoties pār nelīdzenu tilta segumu, ir nejaušs process (angļu val. *stochastik*). To noteica jau zinātnieki *Dodd* [14] un *Inbanathan* [15], un tas ir atkarīgs no automašīnas raksturlielumiem, automašīnas pārvietošanās ātruma un seguma līdzenuma, ko savukārt noteica *Mannering* [16] un *Ullidtz* [17].

Zinātnieku *Fryba* un *Timošenko* [9], [8], [13] pētījumos kustīgas automašīnas slodze, kas pārvietojas pār tiltu, tiek modelēta kā kustīgs konstants spēks. Šajā pētījumā inerces spēks, kas veidojas no automašīnas masas vibrācijas, netika ņemts vērā. Šie pētījumi ir derīgi tikai tad, ja tilta segums ir ļoti līdzens. Gadījumos, kad tilta segums nav līdzens, inerces spēks no automašīnas ir nozīmīgs raksturlielums, un tas ir jāņem vērā aprēķinā. Šādos gadījumos var izmantot kustīgās masas modeli, ko sākotnēji izveidoja zinātnieki *Inbanathan* un *Wieland* [15]. Lai aprēķinā ņemtu vērā inerces spēku no slodzes, ir jāzina kustīgās automašīnas masas atrašanās vieta. Lielākā daļa zinātnieku ir koncentrējušies uz kustīgas slodzes vai kustīgas masas noteikšanu, un jēdziens par kustīgu svārstību ierosinātāju tiek apskatīts retāk. Ne kustīga masa, ne kustīgās slodzes aprēķini neatspoguļo reālu kustīga svārstību ierosinātāja iedarbi uz konstrukciju [18].

Pētījumi tiltu dinamikas nozarē turpinās, jo jaunas matemātiskās aprēķinu metodes un datorprogrammas ļauj analizēt un aprēķināt daudz sarežģītākas izteiksmes nekā senāk [19].

Pēdējos 20 gados, attīstoties mērierīcēm 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. Savukārt zinātnieks *Gonzalez* [23], [24] pētījis automašīnas modeļa un automašīnas un tilta mijiedarbības problēmu. *Gonzalez* kopā ar zinātniekiem *Mohammed* un *Cantero* veicis modelēšanu smagsvara daudzasu smagās automašīnas iedarbei uz tilta konstrukciju [25]. 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]. Modālās analīzes principus tiltiem plaši ir pētījis zinātnieks *Brincker* [30]. 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 norādītu uz tilta konstrukcijas bojājumiem.

Lai veiktu pārbaudi ar dinamisku slodzi, tiltu ne vienmēr ir iespējams slēgt, tāpēc, analizējot konstrukciju pie brīvas satiksmes apstākļiem un nosakot rezonanses frekvences formas – *Operational modal analysis* (*OMA*), izmanto signāla analīzes priekšrocības [31]. Šādas metodes ir sarežģīti interpretējamas, un ir nepieciešamas zināšanas, lai no apkopotajiem datiem iegūtu ticamus rezultātus.

Plaši tiek izstrādāti dažādi analītiski modeļi, lai pēc iespējas precīzāk aprakstītu automašīnu kā skaitlisku sistēmu [32] un tās mijiedarbību ar konstrukciju. Šāds modelis tiek meklēts, lai nebūtu jāveic reāla konstrukcijas pārbaude, bet pietiktu ar iespēju precīzi raksturot attiecīgo automašīnu un tās radīto slodzi [33].

Lai novērtētu konstrukcijas stāvokli, ir veikti pētījumi par dinamiskās ietekmes noteikšanu, izmantojot svārstību paātrinājuma akselerometrus un pārvietojumu mērītājus [34]. Akselerometri bieži tiek lietoti svārstību paātrinājuma mērīšanai dinamiski slogotām konstrukcijām. Gājēju tiltiem Eirokodekss 1990-2 nosaka gājēju komforta kritērijus maksimāli pieļaujamo svārstību paātrinājumu veidā: vertikālām svārstībām – 0,7 m/s^2, horizontālām svārstībām – 0,2 m/s^2, pūlim – 0,4 m/s^2 [35].

Attiecībā uz autoceļu tiltiem Eirokodekss 1990 nosaka, ka pasūtītājam ir jānorāda prasības un kritēriji attiecībā uz svārstībām, kur tas 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. Tiltu dinamikas problēmai veltītie starptautiskie projekti

Tiltu pārbaudes ar kustīgu slodzi ir svarīgs rīks, lai noteiktu jauna tilta būtiskākos raksturlielumus, pirms tiek atvērta satiksme. Statiska un dinamiska pārbaude ir daļa no pieņemšanas ekspluatācijā procedūras Latvijā un daudzās citās pasaules valstīs, piemēram, Īrijā [37] Šveicē [38], Zviedrijā [39], Ķīnā [40], kā arī Slovākijā [41]. Ir realizēti vairāki starptautiski projekti, lai pētītu tiltu dinamiku – *DIVINE 1995* [42], *SAMARIS 2006* [43], *ARCHES 2009* [44], no kuriem *SAMARIS* un *ARCHES* finansēja Eiropas Savienības ietvarprogrammas.

Tiltu pārbaudes ar dinamisku slodzi ar dažādas precizitātes instrumentiem tiek veiktas jau 80 gadu. Jau 1961. gadā Amerikā tika veikts pētījums par nepārtrauktas konstrukcijas viena un trīs laidumu tiltiem. Šo pētījumu veica pētnieki *Fleming* un *Romualdi* [45]. Lai pārbaudītu aprēķina rezultātu patiesumu, tiltam tika izveidots sijas modelis. Tika noteikts, ka nelieliem laidumiem (mazāk nekā 13 m) dinamiskais koeficients (DK) ir augstāks nekā rekomendēts *AASHTO*, savukārt vidēja laiduma tiltiem (lielākiem par 13 m) DK atbilst *AASHTO*. Tika noteikts, ka, izmainot slodzes masu, mainās ātrums, kādā rodas maksimālais dinamiskais palielinājums, kā arī tas, ka liels dinamiskais palielinājums var rasties tiltā no sākotnējās automašīnas vibrācijas, kas radusies nelīdzena pievadceļa dēļ.

Amerikā būvniecības standartizācijas organizācija *AASHTO* 1962. gadā pasūtīja apjomīgu pētījumu, kurā tika apskatīti 18 vienlaiduma tilti, kas tika uzcelti tieši šim pētījumam. 10 no tiem bija tēraudbetona tilti ar savienojumu un bez savienojuma starp plātni un sijām. Četri – saspriegtas konstrukcijas tilti, un četriem laidumu veidoja uz vietas betonētas T veida sijas. Kā pārbaudes auto tika izmantotas divu asu kravas automašīnas un trīs asu traktora un pustreilera kombinācija, kas veica aptuveni 1900 braucienu pār 15 tiltiem ar ātrumu 12–32 km/h. Iegūtie rezultāti parādīja, ka maksimālo DK vērtību svara koeficients (attiecība starp automašīnas svaru un pret kopējo tilta svaru) neietekmē. DK normālas satiksmes apstākļos pieauga, palielinoties pārbraucienu skaitam tikai tiltiem bez savienojuma starp plātni un sijām un pasliktinoties pievadceļu līdzenumam. DK samazinājums tika novērots tiltiem, kuriem garenprofils bija gandrīz taisns, kā arī tad, kad bija labāks pievadceļu līdzenums.

1963. gadā zinātnieki *Wright* un *Green* veica tilta un automašīnas mijiedarbības pētījumu uz 52 autoceļu tiltiem Ontario. Katram tiltam tika noteikts laiduma garums un izvietojums, pašsvars, stingums, aprēķinātā pašsvārstību frekvence un pašsvārstību frekvences no kustīgās slodzes. Tiltiem eksperimentā tika noteikts reālais stingums, pašsvārstību frekvence, dinamiskais koeficients un rimšanas koeficients. Pētījumā tika noskaidrots, ka eksperimentāli noteiktās stinguma vērtības vienmēr ir lielākas nekā aprēķinātās, jo daudzus parametrus nevar izvērtēt aprēķinā: kompozīta konstrukciju, savienojumu stingumu, citu elementu kopdarbību. Pašsvārstību frekvences varēja noteikt ar salīdzinoši lielu precizitāti, lai arī dažas izmērītās vērtības bija lielākas nekā aprēķinātās. Lielākajā daļā gadījumu DK vērtībām tika novērots 30 % palielinājums, savukārt lielākais bija 75 %. DK stipri ietekmēja piebraucamo ceļu seguma stāvoklis (līdzenums, deformācijas šuves), kā arī bremzēšanas laikā radītā slodze. Tiltiem ar zemu stingumu DK bija lielāki [55].

Zinātnieks *Csagoly* 1972. gadā veica otro tiltu pētījumu Ontario reģionā, salīdzinot pašsvārstību frekvences, kas iegūtas analītiski ar datorprogrammas palīdzību, ar reālajām tiltu pašsvārstību frekvencēm. Pētījumā tika noskaidrots, ka, lai samazinātu tilta svārstības, pirmās un otrās svārstību formas frekvencēm jābūt zem 2 Hz vai augstākām par 5 Hz. Šis secinājums ir svarīgs, jo šis svārstību diapazons ir tipisku automašīnu pašsvārstību frekvenču diapazons. Tika noteikts, ka dinamiskais palielinājums ir funkcija no seguma līdzenuma un tilta laiduma konstrukcijas stāvokļa [56].

Zinātnieks *Cantieni* [42] jau 1983. gadā sāka pētīt Šveices tiltu dinamiku, veicot 226 tiltu pārbaudes. Lielākā daļa šajā pētījumā analizēto objektu bija saspriegtas konstrukcijas tilti. Viņa veiktajos pētījumos un rekomendācijās ir balstīts Šveices nacionālais standarts (1989). Šajā pētījumā dinamiskā slodze tika noteikta kā funkcija no pirmās pašsvārstību frekvences formas.

Zinātnieki *Kato* un *Shimada* [57] 1986. gadā vadīja pārbaudi ar dinamisku slodzi ekspluatācijā esošam tiltam tā sagraušanas testa laikā, mērot dinamisko īpašību izmaiņas. Tika novērots, ka, slodzei palielinoties līdz konstrukciju graujošai vērtībai, tilta pašsvārstību frekvence stipri samazinās, tajā pašā laikā tika novērotas tikai nelielas rimšanas koeficienta izmaiņas.

Zinātnieki *Bakht* un *Pinjarkar* [58] 1989. gadā veica pētījumu, kurā salīdzināja dažādas dinamiskā koeficienta (DK) aprēķina metodes, izmantojot pārbaudēs ar dinamisku slodzi iegūtos rezultātus. Autori parādīja, ka vienādojumu:

$$DK = R_{dyn}/R_{stat} \qquad (1.)$$

zinātnieki interpretē dažādos veidos, tāpēc ir grūti salīdzināt rezultātus. Tika noteikts, ka R_{dyn} un R_{stat} ir maksimālās dinamiskās un statiskās tilta deformācijas. Noteiktie faktori, kas var ietekmēt rezultātu dažādību:

- automašīnas tips: DK ir jāiegūst atkārtotās pārbaudēs ar dinamisku slodzi normālas satiksmes laikā;
- automašīnas svars: DK samazinās, palielinot automašīnas svaru, tāpēc dati, kas iegūti ar pārāk vieglām automašīnām, radīs pārāk lielus DK, kas neatbilst patiesībai;
- automašīnas atrašanās vieta: DK, kas mērīts tālu no automašīnas atrašanās vietas, ir lielāks nekā punktā tieši zem automašīnas;
- mērījumu veids: DK parasti aprēķina, ņemot vērā vertikālās deformācijas.

DK aprēķinā var izmantot arī sprieguma vērtības, taču ir novērots, ka šādā aprēķinā iegūtās DK vērtības ir mazākas nekā tad, kad tiek aprēķinātas deformācijas.

Zinātnieki *Hwang* un *Nowak* 1991. gadā prezentēja metodi, kā aprēķināt tilta dinamiskās slodzes statiskos parametrus. Šie parametri, kas tika noteikti, balstoties uz aptaujām un testiem, ietvēra automašīnas masu, piekares sistēmu, riepas un ceļa seguma līdzenumu. Līdzenums tika modelēts ar *Monte Carlo* simulāciju, lai parādītu satiksmes nejaušo dabu, ja ir mainīgi automašīnas parametri, kā arī tika noteikta statisko parametru ietekme uz dinamisko slodzi. Šo metodi izmantoja tērauda un saspriegtas konstrukcijas dzelzsbetona siju tiltiem situācijās ar vienu un divām līdzās braucošām automašīnām. Tika noteikts, ka DK samazinās, palielinoties automašīnas svaram. DK bija mazāks, ja divas automašīnas brauca līdzās viena otrai nevis pa vienai. Tika noteikts, ka dinamiskā slodze nekorelē ar statisko slodzi [10].

Projektā "Dinamiskā mijiedarbība starp automašīnu un transporta infrastruktūru" (*Dynamic interaction between vehicles and infrastructure experiment* (*DIVINE*)), kas tika īstenots no 1995. līdz 1997. gadam, tika pētīta tilta un automašīnas mijiedarbība. Tika noteikts, ka lielu ietekmi uz palielinātu tilta dinamiku rada vairāki faktori: pašsvārstību frekvence, frekvence, kas saistīta ar automašīnas ass palēcienu un automašīnas pašfrekvenci, tilta svārstību rimšanas koeficientu, autoceļa pieejas un tilta seguma līdzenumu, automašīnas ātrumu un automašīnas piekares svārstību rimšanas ātrumu. Tika noteikts, ka, palielinoties automašīnas svaram, dinamiskā koeficienta vērtība samazinās [46].

6.ietvarprogrammas projektā "Ilgtspējīgi un uzlaboti materiāli autoceļu infrastruktūrai – ieteikumi optimālam autoceļu infrastruktūras novērtējumam" (*Sustainable and advanced materialst for road infrasturcutre – guidance for optimal assesment of highway structures* (*SAMARIS*)) 2006. gadā tika veikts plašs pētījums par tiltu dinamiku.

Projektā tika apskatīti veidi, kā vislabāk novērtēt konstrukcijas stāvokli jau ekspluatācijā esošiem tiltiem. Par vislabāko metodi tika atzīta vieglā pārbaude ar slodzi (angļu val. *soft load testing*), kas tika izstrādāta šajā projektā. Pārbaudes metode ir paredzēta, lai pārbaudītu pieņēmumus, kas tika veikti tilta aprēķinos.

Šāda metode tika ieviesta, balstoties uz jaunu *WIM* sistēmu, kas izveidota tieši tiltu konstrukcijām – *Bridge-WIM*. Šīs metodes laikā tiek fiksēti automašīnas raksturlielumi, kas pārbrauc tiltu normālā ātrumā. Šī *WIM* sistēma papildus normālas satiksmes raksturlielumiem (asu attālums, ass svars, ātrums, automašīnas klase utt.) var sniegt informāciju par ietekmes līnijām, statistisko

slodzes sadalījumu un dinamisko ietekmes koeficientu (angļu. val. *impact factor)*. Ļoti svarīgs lielums ir ietekmes līnijas, jo, zinot to precīzu izvietojumu, var daudz precīzāk veikt konstrukcijas aprēķinu, un tas var stipri mainīt sākotnējo aprēķina modeli. Šādā gadījumā nav vajadzīgas automašīnas, kurām ir iepriekš noteikta masa, tilta pārbaudei nav nepieciešams slēgt satiksmi un nav riska, ka tiks bojāta vai pārslogota konstrukcija. Ir nepieciešama tikai viena iepriekš nosvērta automašīna, lai būtu iespējams kalibrēt *WIM* aparatūru.

Iegūto datu novērtēšanai var izmantot *Monte Carlo* simulāciju. Ar *WIM* metodi tiek noteikts sezonālais kravas automašīnu svara sadalījums, pēc tam šie dati tiek izmantoti *Monte Carlo* simulācijā, lai iegūtu raksturīgo kravas automašīnu svaru. Pēc tam tiek simulētas automašīnu pārvietošanās pa vienu vai abām tilta joslām un iegūtas ietekmes līnijas minētajām situācijām. Simulējot datus ilgākam laika periodam, var izveidot datubāzi.

SAMARIS projektā tika salīdzinātas reālas satiksmes slodzes ar simulācijā iegūtajām. Tika izveidots vienkāršots modelis, kas rada līdzīgas kritiskās slodzes tām, kas tika iegūtas reālos satiksmes mērījumos. Izpēte tika veikta tikai viena laiduma tiltiem. Mērījumi tika veikti vietās, kur konstrukcijā veidojas maksimālās momenta vērtības. Apskatīti tiltu laiduma garumi robežās no 15 līdz 35 m. Pētījumā izmantotajiem tiltiem ir divas braukšanas joslas – pa vienai joslai katrā virzienā. Šajā pētījumā tika noteikts, ka kritiskākajā situācijā (pār tiltu vienlaikus pārbraucot gan vienai, gan vairākām automašīnām) kopējā slodzes efekta dinamiskā komponente ir neliela un zemāka par projektēšanas standartā noteikto. Lai arī tika veikts plašs pētījums par automašīnas un tilta parametriem, kas nosaka paaugstinātu tilta iesvārstīšanas līmeni, netika izstrādāta metode, lai novērtētu šos iesvārstīšanas līmeņus, ņemot vērā tilta kalpošanas laiku. Tika atrastas likumsakarības, kas parāda, ka tilta dinamiskā veiktspēja samazinās, ja pieaug kustīgā slodze (transportlīdzekļa masa).

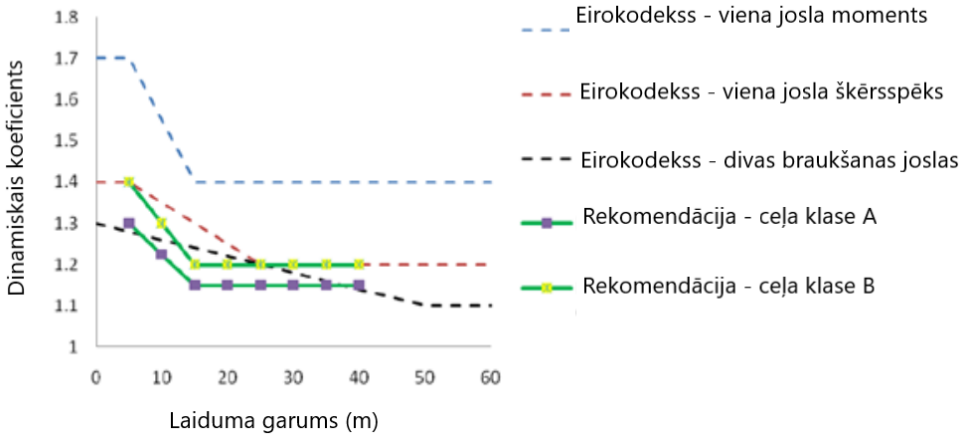
6. ietvarprogrammas projekta "Centrāleiropas autoceļu tiltu konstrukciju novērtēšana un atjaunošana" (*Assesment and Rehabilitation of Central European Highway Structures* (*ARCHES*)), kas tika realizēts no 2006. līdz 2009. gadam, mērķis bija noteikt reālāku satiksmes slodzes attēlojumu nekā ir pieņemts Eirokodeksā. Tika pētīts, kā precīzāk būtu jāievērtē statiskā slodze un dinamiskais koeficients, lai reālāk parādītu dinamisko efektu, ko automašīna rada uz tilta, izmantojot metodi, ko sauc par automašīnas svēršanu kustībā (*WIM*). Pētījumā tika novērots, ka, palielinoties statiskajam efektam, konstrukcijas dinamiskās veiktspējas tendence samazinās.

Pēc projektā *SAMARIS* (2006) izstrādātās konstrukciju pārbaudes metodes, projektā *ARCHES* veiktie tiltu GEM aprēķini parāda, ka ir tilti, kas, ja slogoti ar kritiski smagu kravas automašīnu vai kritisku kravas automašīnu novietojuma kombināciju, neatbilst precīzam automašīnas un tilta mijiedarbības aprēķinam. Šajā projektā tika apskatīti divi pieļaujamā dinamiskā efekta noteikšanas veidi – dinamiskais koeficients un jaunieviestais dinamiskā līmeņa novērtējuma koeficients (*Assesment dynamic ratio*; *ADR*). Dinamiskais koeficients tiek apskatīts kā maksimālā dinamiskā deformācijas attiecība pret maksimālo statisko deformāciju. *ADR* ir koeficients, ko izmanto raksturīgās slodzes radītās deformācijas aprēķinam konkrētajā tilta vietā, sareizinot raksturojamo statiskās slodzes radīto ielieci ar *ADR*.

Tika noskaidrots, ka ir nepārprotama atšķirība starp sarežģīto matemātisko modelēšanu un pārbaudēm, kas nepieciešamas, lai precīzi noteiktu tilta dinamiku un konservatīvās parametru vērtības, kas noteiktas tiltu projektēšanas standartos. Lai samazinātu šo plaisu, īpaši attiecībā uz ekspluatācijā esošajiem tiltiem, projektā *ARCHES* tiek piedāvāts risinājums, kas pamatojas uz lielu eksperimentālo pārbaužu un skaitlisko simulāciju apjomu.

Ceļa profila kvalitātei ir svarīga nozīme, īpaši neliela laiduma tiltiem, tāpēc projektā ceļa segums tika novērtēts pēc *ISO* klasifikācijas. Tika noteikts, ka ļoti līdzena ceļa seguma gadījumā (*ISO* A klase) pie kritiskas slodzes, kas rada maksimālo slodzes efektu, dinamiskais koeficients ir zem 1,1. Tomēr gadījumos, ja ir bojātas deformācijas šuves vai pirms tilta ir nelīdzens segums, īsiem tiltiem šī vērtība var būt augstāka. Tika pierādīts, ka ļoti smagiem transportlīdzekļiem, kas atbilst maksimāli pieļaujamajai slodzei, piemēram, celtņiem, ir stingra konfigurācija, kas savukārt rada mazāku dinamisko efektu nekā parastas piecu asu kravas automašīnas. Tātad, ja tilta profils ir līdzens, tad, salīdzinot ar Eirokodeksā noteiktajām slodzēm, dinamiskā koeficienta aprēķina vērtības var samazināt.

Tiltu novērtēšanai (gan momenta, gan bīdes spēku ietekme) tika dotas rekomendējamās dinamiskā koeficienta samazinātās vērtības tiltiem ar vienu braukšanas joslu un divām braukšanas joslām ar *ISO* A un B klases ceļa līdzenumu (1.1. attēls). Lai novērtētu vienas joslas un divu joslu tiltus ar *ISO* A ceļa klasi (gan momenta, gan bīdes spēku ietekme), *ARCHES* projektā tiek rekomendētas dinamiskā koeficienta vērtības, kas svārstās no 1,3 piecu metru garam tiltam līdz 1,15 – 15 m garam tiltam. Garāka laiduma tiltiem dinamiskais koeficients paliek nemainīgs – 1,15. *ISO* B ceļa klasei tiltu laidumiem no 5 m līdz 15 m dinamiskais koeficients mainās lineāri, attiecīgi no 1,4 m līdz 1,2 m. Garāka laiduma tiltiem dinamiskais koeficients paliek nemainīgs –1,2.



1.1 att. Projektā *ARCHES* rekomendētās dinamiskā koeficienta vērtības [47].

Ja salīdzina Eirokodeksa satiksmes slodzes modeli abām ceļa seguma klasēm, tad pētījumā ieteiktās vienas joslas tiltu dinamiskā koeficienta vērtības samazinās no 1,4 uz 1,2. Arī divu joslu tiltiem ieteicamās vērtības samazinās no 1,3 uz 1,15 un ir mazākas par Eirokodeksa satiksmes slodzes modeļa vērtībām, ja ceļa segumam ir ISO A klase. 1.1. attēlā redzamajā diagrammā parādītais dinamiskā koeficienta izmaiņu atainojums ļauj novērtēt tilta pieļaujamo dinamisko koeficientu, zinot tikai tilta garumu un ceļa seguma klasi.

1.2. 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 rekciju uz dinamisku slodzi, jo katra konstrukcija tiek projektēta, ņemot vērā aprēķina slodzes, taču ir dažādi ārēji faktori, kas var palielināt aprēķina slodzes lielumu.

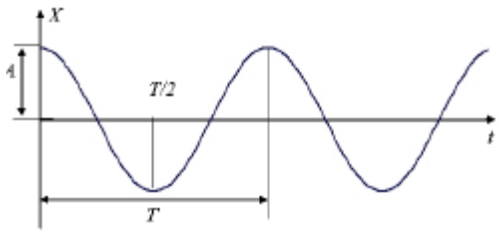
Automašīnu radītā slodze ir laikā mainīga stohastiska slodze, ko apraksta ar varbūtības teorijas principiem, izmantojot satiksmes datus, kas iegūti, izmantojot automašīnas parametru mērīšanu kustībā (biežāk tiek lietots apzīmējums angļu valodā *Weight in motion* (*WIM*) [49].

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].

Laikā mainīga slodze iesvārsta konstrukciju, radot tajā papildu spēkus, kas palielina konstrukcijai pielikto statisko slodzi. Galvenie lielumi, kas raksturo šos svārstību procesus, ir

1) cikliskā frekvence – skaitlis, kas parāda, cik izmaiņas ciklu 2π sekundēs ir periodiski mainīgiem lielumiem: pārvietojumam, ātrumam, spēkam, $\varpi = [s^{-1}]$;

2) amplitūda – periodiska, laikā mainīga lieluma (pārvietojuma, ātruma, paātrinājuma vai spēka) vislielākā vērtība – A (1.2. att.).



1.2.att. Svārstību diagramma [50].

Svārstību teorijā izšķir uzspiestās svārstības un pašsvārstības jeb brīvās svārstības [50].

1.2.1. Pašsvārstību frekvences un svārstību formas – modālā analīze

Brīvās svārstības jeb pašsvārstības rodas, kad konstrukcija tiek izkustināta no tās līdzsvara stāvokļa un brīvi svārstās. Šādas svārstības rodas konstrukcijā bez ārējas iedarbības. 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:

$$m\ddot{\upsilon} + c\dot{\upsilon} + k\upsilon = 0; \qquad (2.)$$

kur:

$\ddot{\upsilon}$ – paātrinājums;

$\dot{\upsilon}$ – ātrums;

υ – pārvietojums;

m – masa;

c – viskozās rimšanas koeficients;

k – konstrukcijas stingums;

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

Vienādojums parāda, 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 3. un 4. formulas:

$$f_n = \frac{1}{T_n}; \tag{3.}$$

$$T_n = 2\pi/\omega_n. \tag{4.}$$

Konstrukcija ar daudzām brīvības pakāpēm tiek aprakstīta ar tās fundamentālo pašsvārstību frekvenci f_1[Hz], kas ir pirmā aprēķinātā aploces frekvence ω_1 [rads/s]:

$$f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}. \tag{5.}$$

Konstrukcijas fundamentālais svārstību periods [50]:

$$T_1 = \frac{1}{f_1} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}\,. \tag{6.}$$

Dinamiskajai analīzei izmanto modālās analīzes principu jeb pašsvārstību frekvenču analīzi, kopā ar frekvencēm apskata arī svārstību formas. Tās ir nedziestošas brīvās svārstības, kas radušās, izkustinot konstrukciju no līdzsvara stāvokļa. To var noteikt, ja svārstību pamatvienādojumā (2. vienādojums) kā nulle tiek pieņemta svārstību rimšana un ārējo spēku iedarbība. Pašsvārstību frekvences vispārīgais vienādojums tādā gadījumā ir:

$$([k] - \lambda[m])\{A\} = \{0\}; \tag{7.}$$

kur:

λ – pašsvārstību frekvence, kas ir vienāda ar ω^2;

{A} – vektors, kas tiek noteikts attiecīgi katrai pašsvārstību frekvencei;

[m] – masas matrica;

[k] – konstrukcijas stinguma matrica.

Kopējais pašsvārstību frekvenču skaits ir vienāds ar konstrukcijas kustības brīvību skaitu. Katrai frekvences skaitliskajai vērtībai ir atbilstošs vektors jeb svārstību forma (moda). Ņemot vērā to, ka vektori nevar būt nulle, pamatvienādojuma (2. vienādojums) atrisinājums ir:

$$([K] - \lambda[M]) = \{0\}. \tag{8.}$$

Parasti apskata tikai vērtības pirmajām pāris svārstību formām, jo, ņemot vērā to, ka konstrukcijas aprēķina modelis ir aptuvens, augstākās pašsvārstību frekvences un formas būs neprecīzas [29].

1.2.2. 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, piemēram, starpsienas. Reālā konstrukcijā nav iespējams matemātiski aprakstīt enerģijas zudumus, kas rada svārstību rimšanu, tāpēc svārstību rimšana reālā konstrukcijā tiek aprakstīta ļoti vispārīgā veidā. To sauc par ekvivalento viskozo rimšanu (angļu val. *equivalent viscouse damping)* un to aprēķina:

$$c = Ft/L \qquad (9.)$$

kur:

F – spēks;

t– laiks;

L – elementa garums.

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].

Dinamiskais līdzsvars balstās uz jēdzienu par berzes inerces spēku. Tas ir spēks, kas vienāds ar konstrukcijas masas un paātrinājumu reizinājuma (mü), un tas darbojas pretēji paātrinājuma virzienam. Viskozi rimstošai sistēmai brīvās svārstības apzīmē kā:

$$\ddot{v} + 2\xi\omega_n\dot{v} + \omega_n 2v = 0; \qquad (10.)$$

kur $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ un $\xi = \frac{c}{2m\omega_n} = \frac{c}{c_{cr}}$.

Kritiskais rimšanas koeficients ir

$$c_{cr} = 2m\omega_n = 2k/\omega_n \qquad (11.)$$

kur:

c – rimšanas konstante ir vienība, kas parāda enerģijas izkliedi viena brīvo svārstību cikla laikā, vai viena uzspiesto svārstību cikla laikā;

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

c_{cr} ir kritiskā rimšanas konstante, jo tā ir mazākā vērtība, kas pilnībā nomāc svārstības.

Rimstošas svārstības konstrukcijā radītie kustību veidi ir šādi:

1) ja $c < c_{cr}$, tad $\xi < 1$ un sistēma svārstās ap līdzsvara pozīciju ar laika gaitā samazinošu amplitūdu;
2) ja $c = c_{cr}$, tad $\xi = 1$ un sistēma atgriežas sākotnējā līdzsvarā bez svārstīšanās;
3) ja $c > c_{cr}$, tad $\xi > 1$ un konstrukcija atgriežas līdzsvara stāvoklī, taču daudz lēnāk.

Visas konstrukcijas ir mazslāpētas (angļu val. *underdamped*). Rimšanas konstante $c < 0{,}10$ [51]. Mazslāpētai konstrukcijai pārvietojumus var aprakstīt funkcija: $u(t) = e^{-\xi\omega_n t}[u, \dots]$, kur slāpētas sistēmas pašsvārstību frekvenci nosaka kā: $\omega_D = \omega_n\sqrt{1-\xi^2} \approx \omega_l$, rimšanas koeficients $\xi = 0{,}05$ vai 5 %.

Rimstošas sistēmas svārstību periodu aprēķina pēc 12. formulas:

$$T_D = 2\pi/\omega_D = T_n/\sqrt{1-\xi^2} \qquad (12.)$$

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

$$\delta = \ln\frac{u_i}{u_{i+1}} = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \qquad (13.)$$

Ja 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: $\xi = \frac{\delta}{2\pi}$.

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

$$\xi = \frac{1}{2\pi j}\ln\frac{\ddot{u}_i}{\ddot{u}_{i+j}}. \qquad (14.)$$

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].

1.1. tabula

Raksturīgi svārstību rimšanas koeficienti materiāliem un konstrukcijām [53]

Konstrukcijas veids	Rimšanas koeficients ξ; %
Materiāla rimšanas koeficients:	
tērauds	0,03–0,15
dzelzsbetons	0,15–1,0
stieple	0,4–2,0
Tiltu konstrukcijas:	
tērauds	0,2–1,0
kompozītie tēraudbetona tilti	0,3–1,6
dzelzsbetona un spriegbetona tilti	0,3–1,6

1.1.tabulā parādītas vispārīgas rimšanas koeficientu vērtības konstrukcijām. Būvmateriālam ir zems rimšanas koeficients, tāpēc lielākā daļa svārstību rimšanas rodas savienojumu vietās un var būt atkarīgas no [53]:

- materiālu berzes un virsmu sagatavošanas;
- spēkiem sadurvietās;
- jebkuras plastiskās deformācijas savienojumu vietās;
- vaļīgām šuvēm.

Ņemot vērā visus faktorus, kas ietekmē svārstību rimšanas koeficientu un tā izmaiņas, to izmanto arī, lai noteiktu, vai konstrukcijai ir bojājumi. Visvairāk šis jautājums ir pētīts tieši dzelzsbetona konstrukcijām [54].

1.2.3. Uzspiestās svārstības

Tilta konstrukcijām uzspiestās svārstības ir svarīgs faktors, jo automašīnas, pārbraucot tilta konstrukcijai, rada tieši šāda veida svārstības.

Uzspiestās svārstības rodas konstrukcijā no laikā periodiski mainīgiem ārējiem spēkiem, kas iedarbojas uz konstrukcijas masu, tos pieņemts saukt par ierosinātājspēkiem. Uzspiestās svārstības kustību vienādojumā apzīmē ar periodiski mainīgu ārējo spēku funkciju *p(t)*:

$$m\ddot{v} + c\dot{v} + kv = p(t). \qquad (15.)$$

Ja konstrukcijai ir pielikts harmonisks spēks $p(t) = p_o sin(\omega t)$ vai $p_o cos(\omega t)$, kur p_o ir amplitūda, bet uzspiesto svārstību frekvence ir ω un $T = 2\pi/\omega$ ir iesvārstīšanas periods vai uzspiesto svārstību periods. Tad sistēmas svārstības apzīmē:

$$m\ddot{v} + kv = p_o sin(\omega t) \qquad (16.)$$

Ja uzspiesto svārstību frekvences ω attiecība pret pašsvārstību frekvenci ω_n ir $\omega/\omega_n<1$, tad u(t) – un p(t) ir vienāda virziena spēki.

Šajā gadījumā brīvās svārstības ir tikai viena daļa no svārstību vienādojuma, jo nāk klāt daļa, ko rada pielikts laikā mainīgs spēks. Vienādojums ir vienkāršs, ja uzspiestās svārstības ir harmoniskas jeb var aprakstīt ar funkciju (17. vienādojums):

$$m\ddot{v} + c\dot{v} + kv = p_o sin(\omega_o t). \qquad (17.)$$

Iedarbojoties ārējai harmoniskai dinamiskai slodzei, līdzsvara stāvokļa vibrācijas turpinās arī pēc brīvo svārstību slāpēšanas, tāpēc nehomogēnas svārstības vislabāk ir izteikt ar superpozīcijas principu, kur nehomogēnas svārstības veido daudzu harmonisku svārstību summa:

$$m\ddot{v} + c\dot{v} + kv = \sum_{j=0}^{\infty} A_j e^{-i\omega_j t}; \qquad (18.)$$

kur:

A_j – Furjē j-tā harmoniskās komponentes amplitūda;

ω_j – cikliskā frekvence j-ai slodzes komponentei.

Lai iegūtu kopējo funkciju, jāņem vērā visas uzspiesto svārstību funkcijas, ko saskaita kopā ar pašsvārstību funkciju. Amplitūda pozitīvai reālai komponentei A_j[50]:

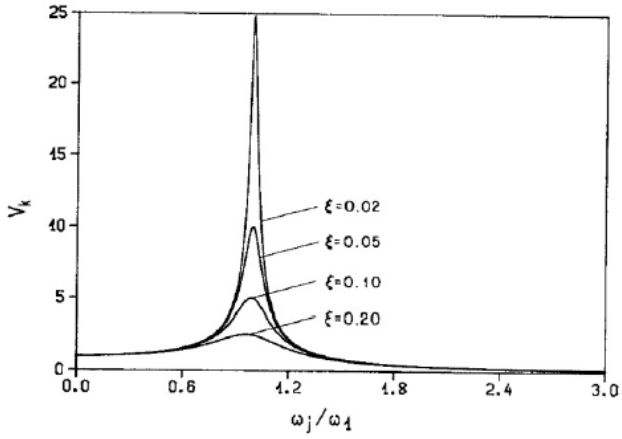
$$V_k(\omega_j) = \frac{|U_j|}{A_j/k} = \frac{1}{\sqrt{\left(1-\omega_j^2/\omega_l^2\right)^2 + \left(2\xi\bar{\omega}_j/\overline{\omega_l}\right)^2}}. \qquad (19.)$$

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.

Izvērtējot svārstību amplitūdu, var definēt dinamisko palielinājuma faktoru (angļu val. *dynamic magnification factor*) statiskam pārvietojumam, iedarbojoties slodzes komponentei Aj:

$$|U_j| = \frac{A_j}{k}\frac{1}{\sqrt{\left(1-\omega_j^2/\omega_l^2\right)^2 + \left(2\xi\bar{\omega}_j/\overline{\omega_l}\right)^2}}. \qquad (20.)$$

Svārstību dinamiskā palielinājuma koeficients norāda, cik reizes dinamiskais pārvietojums ir lielāks par atbilstošo statisko pārvietojumu. Dinamiskās un statiskās maksimālās nobīdes attiecība ir atkarīga no svārstību rimšanas koeficienta ξ un no uzspiestās un pašsvārstību frekvences attiecības, ϖ_j/ϖ_1.



1.3.att. Dinamiskais palielinājums relatīvo ierosmju frekvencei pie dažādiem svārstību rimšanas koeficientiem [50].

Attēlojot dinamiskā palielinājuma koeficienta attiecību pret ϖ_j/ϖ_1 pie dažādiem svārstību rimšanas koeficientiem ξ (1.3. att.), iegūst dažādas frekvenču diapazonu līknes. Tās ļauj ātri aprēķināt paredzamo pārvietojuma amplitūdu pie noteiktām uzspiesto svārstību frekvencēm.
Ja svārstību rimšanas koeficients ir neliels, dinamiskā palielinājuma faktors strauji pieaug un sasniedz savu maksimālo vērtību pie $\varpi_j = \varpi_1$. Šādu situāciju pieņemts saukt par rezonansi [50].

$$V_{k,max} = V_k\left(\bar{\omega}_j = \bar{\omega}_l\right) \cong \frac{1}{2\xi} \qquad (21.)$$

Daudzo nezināmo lielumu dēļ automašīnas slodzes radīto efektu uz tilta konstrukciju modelēt analītiski ir sarežģīti, tāpēc pārbaude ar dinamisku slodzi palīdz precīzāk raksturot tilta konstrukciju. Automašīnas radīto efektu nevar aprakstīt ar funkciju, tāpēc pārbaude ar kustīgu slodzi ļauj noteikt konstrukcijas rimšanas koeficientu, pašsvārstību un uzspiesto svārstību frekvences, kā arī svārstību dinamisko palielinājumu.

1.2.4. 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 (22. 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 22. formulu, lai arī ir vēl citas metodes.

$$DK = R_{dyn}/R_{stat} \tag{22.}$$

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.

Dinamiskais palielinājums (angļu val. *dynamic amplification; DA*), kas rodas no automašīnas pārvietošanās pār tiltu, tiek aprēķināts šādi:

$$DA = \frac{R_{dyn} - R_{stat}}{R_{stat}}; \tag{23.}$$

kur R_{dyn} un R_{stat} ir maksimālās dinamiskās un statiskās tilta reakcijas. Tāpēc

$$R_{dyn} = DA \;\; R_{stat}; \tag{24. a}$$

kur DK ir dinamiskais koeficients, ko nosaka kā:

$$DK = 1 + DA \tag{24. b}$$

DK vērtība 1,3 atbilst 30 % dinamiskajam palielinājumam. Ir vairāki veidi, kā, izmantojot pārbaužu datus, interpretēt šo tiešo dinamiskā koeficienta definīciju.

Zinātnieki *Bakhats* un *Pinjarkar* 1989. gadā veiktā pētījumā atrada astoņas dažādas formulas, kā aprēķināt DK, izmantojot iegūtos datus. Četras no šīm formulām zinātnieki izmanto vēl arvien. Pirmais variants ir:

$$DK = \frac{R_{dyn}}{R_{fil}^{dyn}}; \tag{25.}$$

kur R_{dyn} – maksimālā dinamiskā reakcija;

R_{fil}^{dyn} – statiskā reakcija, kas iegūta, filtrējot dinamiskos rezultātus, kas rodas maksimālās dinamiskās reakcijas laikā.

Izmantojot statisko reakciju R_{stat}^{dyn}, kas iegūta, pārbraucot ar ļoti mazu ātrumu, DK aprēķina

$$DK = \frac{R_{dyn}}{R_{stat}^{dyn}}. \tag{26.}$$

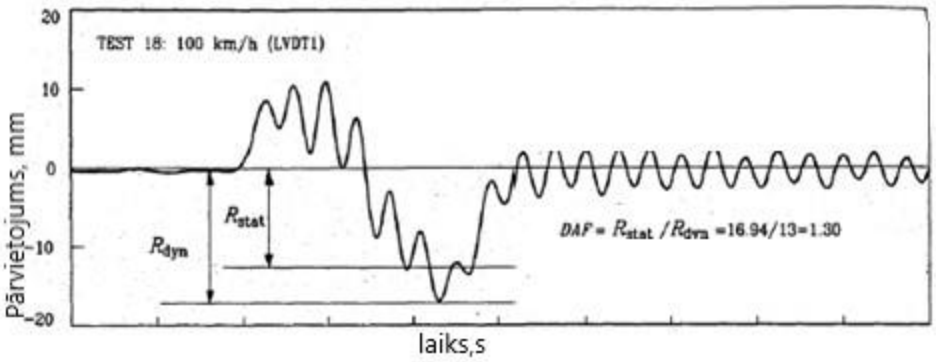
Izmantojot maksimālo statisko rekciju R_{fil}, kas iegūta filtrējot dinamisko reakciju, DK aprēķina

$$DK = \frac{R_{dyn}}{R_{fil}} . \quad (27.)$$

Izmantojot pārbaudēs iegūto maksimālo statisko reakciju R_{stat}, pie neliela automašīnas ātruma, DK aprēķina

$$DK = \frac{R_{dyn}}{R_{stat}} . \quad (28.)$$

Ja filtrētie rezultāti ir tuvu statiskajai reakcijai, kas iegūta, braucot ar lēnu ātrumu, 25. un 26. vienādojums ir vienādi (tāpat kā 27. un 28. vienādojums). 25. un 26. vienādojums tika izmantots pētījumā Šveicē, ko veica zinātnieks *Cantieni* 1983. gadā [56], 27. un 28. vienādojumu, kas atbilst 24. a vienādojumam, izmantoja Amerikas pētījumā Ontario zinātnieks *Billing* 1982. gadā [57]. 1.4.att. parādīta dinamiskā koeficienta aprēķināšana no deformācijām.



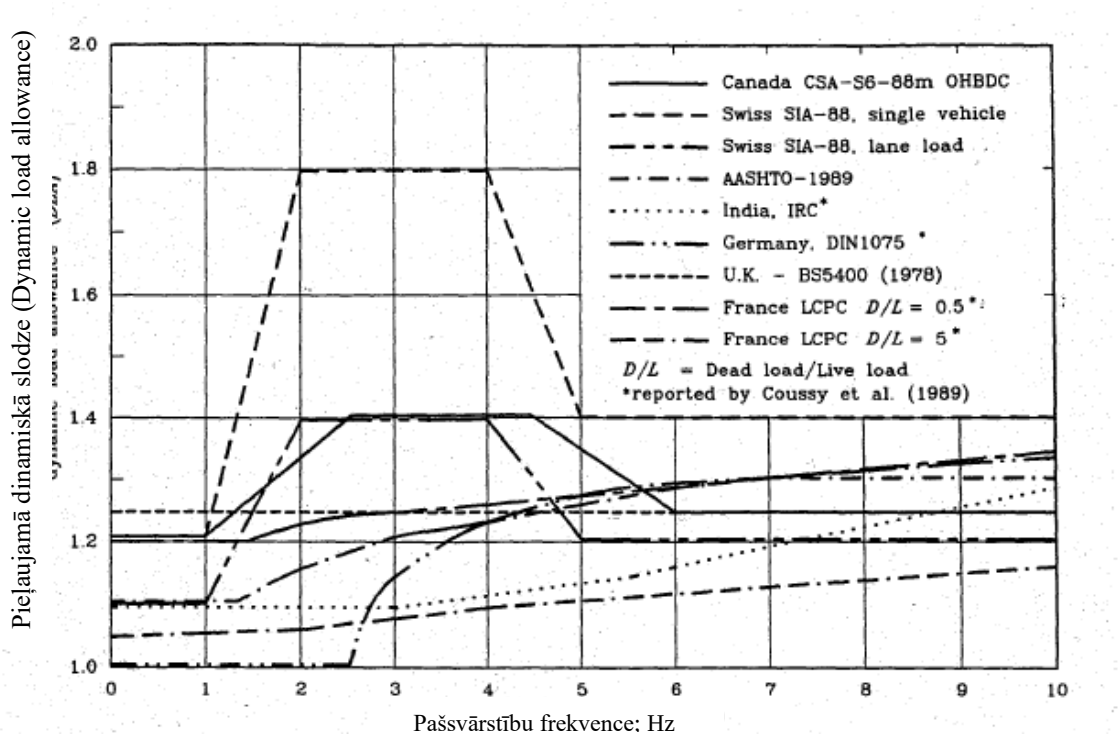
1.4.att. Dinamiskā koeficienta noteikšana no pārvietojumiem [58].

Pieļaujamā dinamiskā slodze *DLA* (angļu val. *dynamic load allowance*) un dinamiskā koeficienta vērtības dažādu valstu standartos atšķiras. 1.5. attēlā redzama dažādu valstu *DLA*, kas rekomendēta Amerikas [59], Šveices, Lielbritānijas un Kanādas standartos. Parādīti arī Indijas, Vācijas un Francijas dati, ko devis zinātnieks *Coussy* 1989. gadā. Šajā grafikā *DLA* parādīta attiecībā uz pašsvārstību frekvenci, ieskaitot tās attiecības, kas oriģināli dotas pret maksimālo laiduma garumu. Pašsvārstību frekvence f_o ir attiecināma pret maksimālo laiduma garumu L_{max} pēc šādas formulas [58]:

$$f_o = 82\, L_{max}^{-0,9} . \quad (29.)$$

Šī sakarība tika ņemta no *RILEM 65* Materiālu dinamisko īpašību (*MDB*) izpētes komitejas iegūtajiem datiem, kas ir balstīta uz pārbaudē ar dinamisku slodzi iegūtajiem rezultātiem, kas

veikti uz vairāk nekā 200 tiltiem Eiropā. Citas līdzīgas formulas attiecībā uz f_o un L_{max} ir atrodamas literatūrā [56] un [57].



1.5. att. Pieļaujamā dinamiskā slodze (*DLA*) vērtības atkarībā no pašsvārstību frekvences dažādu valstu standartos [60].

Ekspluatācijā esošu tiltu dinamiskie testi pie kontrolētas un nekontrolētas satiksmes nodrošina ātru un ekonomisku veidu, kā novērtēt šo tiltu īpašības. Šī metode ir efektīva, ja ir pieejami tiešsaistes datu ierakstītāji un signālu datu apstrādes programmas. Šie testi var noteikt arī bojājumu izraisītas izmaiņas konstrukcijas stingumā, ja testi tiek veikti atkārtoti [61].

Metodes, kas tiek izmantotas, lai iesvārstītu tilta konstrukciju:

1) triecienslodze;
2) ekscentriskas masas ietekme;
3) slogošanas automašīnas izmantošana (kontrolēta satiksme);
4) brīva satiksme;
5) vēja ierosinātas svārstības;
6) konstrukciju iesvārstīšana, tās atvelkot;
7) svārstības, ko rada bremzējošas automašīnas.

Izmantojot šīs metodes, var noteikt konstrukcijas dinamiskās īpašības (pašsvārstību un uzspiesto svārstību frekvences, svārstību formas un svārstību rimšanas koeficientu). Savukārt dinamisko koeficientu var noteikt kontrolētas vai nekontrolētas satiksmes apstākļos.
Eirokodekss *LVS EN 1991-2* nosaka, ka 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].

Pēdējos 20 gados ir veikti daudzi pētījumi, lai uzlabotu automašīnu skaitliskos modeļus, ceļa profila modeļus un modeļus, kas parāda tilta un automašīnas mijiedarbību. Šajos modeļos tiek izmantota galīgo elementu metode (GEM). Tā ļauj pārbaudīt dažādus slodzes novietojumus un kritiskos slodzes stāvokļus un noteikt daudz precīzāku dinamiskā koeficienta vērtību projektētajai konstrukcijai.

Parametri, kas ietekmē dinamiskā koeficienta vērtību:

- ar tiltu saistītie: tilta pašsvārstību frekvences un svārstību rimšana, ceļa profils pirms tilta un uz tilta, seguma līdzenuma, balstījuma veids u. c. [63];
- ar automašīnu saistītie: riepu stingums, riepu vibrāciju dzēšana, piekares stingums, piekares svārstību rimšana, automašīnas masa un gravitācijas centrs, pārvietošanās ātrums;
- citi parametri: tilta garums un ietekmes līnijas formas [23].

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.

1.3. Tilta dinamisko raksturlielumu analītiskās aprēķina metodes

1.3.1. Tilta nestspējas un dinamisko raksturlielumu aprēķina metodes

Pašsvārstību frekvenču un svārstību formu noteikšana ir lielumi, ko nosaka ar dinamiskajām aprēķina metodēm. Tiltu konstrukcijas var būt ļoti sarežģītas – ar gariem laidumiem un sarežģītām sistēmām, kurās ir daudz elementu, kas savstarpēji mijiedarbojas, piemēram, kopnes tilti, loka tilti, vanšu tilti –, tāpēc aprēķiniem var izmantot trīs dažādus aprēķina modeļus: diskrēto modeli; modeli ar vienmērīgi izkliedētu masu; galīgo elementu modeļus. Pašsvārstību frekvenču noteikšana ir sarežģīts aprēķins, tāpēc mūsdienās šim uzdevumam izmanto GEM datorprogrammas. Aprēķiniem var izmantot, piemēram, šādas programmas: *MIDAS Civil*, *RFEM Dynamic*, *Lira*, *ANSYS Civil FEM Bridge*, *BRASS*, *BRIDGADES* (*ABAQUS*), *ADINA*, *DYNSOLV*, *LUSAS* un citas galīgo elementu programmas.

Šajā pētījumā aprēķini tika veikti ar datorprogrammu *Lira* un *RFEM*, kas veic pašsvārstību, frekvenču noteikšanu, ievērojot Eirokodeksu prasības. Eirokodeksa aprēķinu metodes balstās uz robežstāvokļu metodes nestspējas aprēķinu.

1.3.2. Tilta un automašīnas mijiedarbības analītiskās aprēķina metodes

Viens no lielākajiem ārējiem spēkiem, kas iedarbojas uz tilta konstrukciju, ir kustīga transportlīdzekļa slodze. Slodzes lielums ir atkarīgs no transportlīdzekļa veida, asu skaita un masas. Šāda veida slodzes ir laikā mainīgas, to lielumu parasti nosaka ar varbūtības teorijas palīdzību. Reālo transportlīdzekļu masu un asu skaitu var noteikt ar automašīnas parametru mērīšanu kustībā jeb *Weight-in-motion* (*WIM*) sistēmu. Šādas iekārtas tiek iestrādātas ceļa segumā, un tās reģistrē automašīnas svaru, tai pārbraucot pār sensoriem [49].

Weight-in-motion mēriekārta Latvijā pirmo reizi tika iestrādāta ceļa segumā 2002. gadā autoceļu A4 un A6 krustojumā, tādā veidā tika iegūti dati par automašīnu veidiem un to parametriem uz šiem autoceļiem. Sistēma normāli darbojās sešus gadus, taču 2011. gadā satiksmes slodzes rezultātā tā tika pilnībā iznīcināta. Šos datus savā promocijas darbā [37] analizēja Andris Paeglītis. Dati parādīja, ka 79,82 % satiksmes bija divu asu automašīnas ar svaru zem 3,5 tonnām, bet otra lielākā grupa – 21 % – bija piecu asu automašīnas.

Ir noteikts, ka tilta dinamiskie raksturlielumi ir atkarīgi no tilta veida, automašīnas pārvietošanās ātruma, brauktuves seguma un citiem faktoriem. Tilta un automašīnas mijiedarbību var analizēt

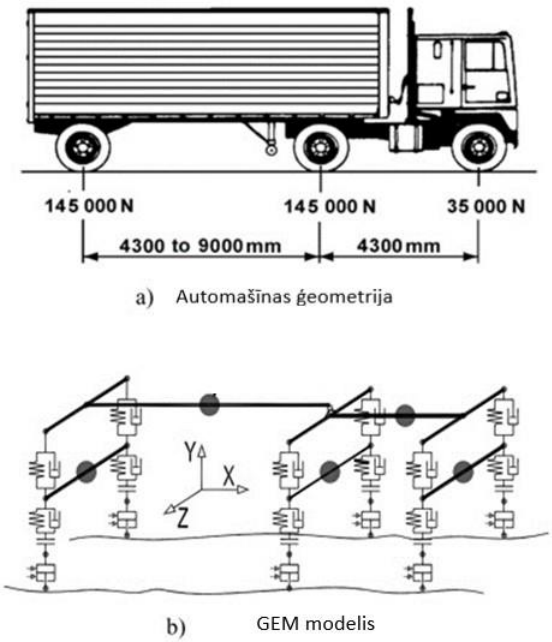
divos veidos: eksperimentāli vai analītiski. Eksperimentālā pieeja ir laikietilpīga, tai nepieciešamas speciālas iekārtas, lai noteiktu nepieciešamos raksturlielumus un tā ir salīdzinoši dārga. Savukārt analītiskā metode ir veids, kā novērtēt tilta un automašīnas mijiedarbību [64] [65], ja aprēķiniem izmantotā metode ir eksperimentāli pārbaudīta. [66]

Mijiedarbības modeļi, kuros tiek apskatīta enerģijas apmaiņa starp automašīnu un tilta konstrukciju, ietver šādus elementus:

- konstrukcijas laiduma konstrukcijas modeli;
- automašīnas ritošās daļas modeli;
- automašīnas un tilta mijiedarbības modeli;
- ceļa seguma stāvokļa aprakstu;
- katra modeļa matemātiskā risinājuma algoritmu.

Automašīnas modeļus, kas apskatīti literatūrā, var iedalīt trīs grupās ar pieaugošu sarežģītību:

- viendimensionāli (1D) modeļi, kur tiek ņemta vērā masa un asu vertikālais pārvietojums [67];
- divdimensionāli (2D) modeļi, kur tiek modelēta auto projekcija vertikālā garenvirziena plaknē un kustība apskatīta tajā pašā plaknē [68];



1.6. att. Automašīnas trīsdimensionāls aprēķina modelis un saskares punkti ar segumu [105].

- trīsdimensionāli (3D) modeļi, kur tiek modelēts visas automašīnas kustības un asis [69]. Šāda metode ļauj izvērtēt automašīnas riteņu nevienādu saskari ar tilta konstrukciju. Modelis redzams 1.6. attēlā [70].

Visbiežāk lietotā metode, lai simulētu automašīnas un tilta mijiedarbību: atsevišķi matemātiski aprakstīt tiltu un automašīnu, savukārt mijiedarbība tiek aprēķināta ar iteratīvu procedūru, kurā spēka pārvede un vertikālās deformācijas tiek noteiktas katram ritenim atsevišķi. Visbiežāk automašīnas vienādojumam tiek izmantota tiešā integrēšana, savukārt tilta konstrukcijai – modālā superpozīcijas metode [71].

Otra metode: uzreiz apskatīt pilnībā savienotu sistēmu, taču šādas metodes izmantošana prasa lielus aprēķinu resursus [72]. Apvienotās konstrukcijas matricā tiek ievietota tilta un automašīnas masa, rimšanas koeficients un stingums. Šāda aprēķinu sistēma neļauj ievērtēt tilta konstrukcijas

nelinearitātes, taču metode neievērtē jebkādu automašīnas un tilta nesaskaršanos, t. i., riteņi vienmēr ir pilnā saskarē ar segumu [70].

Šādam automašīnas un tilta mijiedarbības aprēķinam var izmantot kustības vienādojumu:

$$\boldsymbol{M_s\ddot{W} + C_s\dot{W} + K_sW = F_s,} \tag{30.}$$

kur M_s, C_s un K_s ir attiecīgi masas, svārstību rimšanas un stinguma matricas. Savukārt $\ddot{W}, \dot{W}, W\ un\ F_s$ attiecīgi ir sistēmas paātrinājums, ātrums, pārvietojums un spēka vektoru matricas [66].

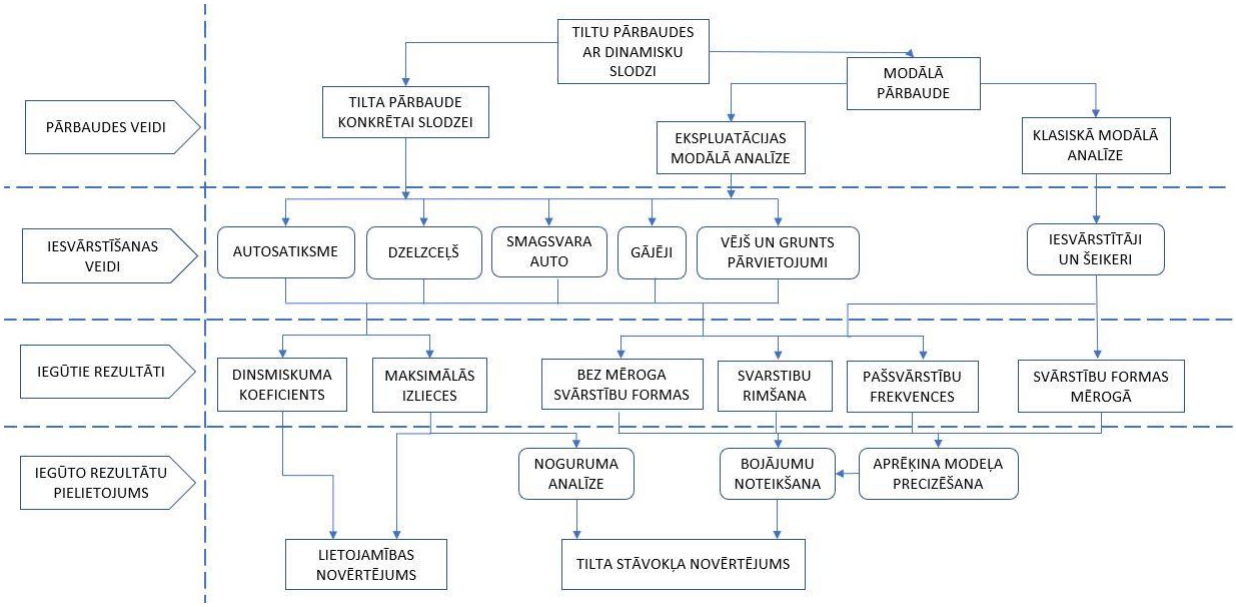
Tilta seguma nelīdzenums ir galvenais dinamiskās slodzes ierosinājuma avots konstrukcijā. Ir metodes, kas ļauj noteikt seguma raupjumu, un tas tiek iekļauts aprēķina modelī. Ja nav iespējams precīzi noteikt seguma raupjumu, tiek izmantota varbūtības teorija un pieņemts raupjuma profils, balstoties uz iepriekš veiktajiem mērījumiem [73].

Lai arī ir iespējams matemātiski modelēt tilta un automašīnas mijiedarbību, tas nedod nepieciešamo informāciju, lai novērtētu konstrukcijas darbību slodzes ietekmē. Daudz vairāk par konstrukciju ir iespējams pateikt, veicot pārbaudi ar dinamisku slodzi, kurā, automašīnai pārbraucot tiltam, ir iespējams noteikt svārstību dinamisko koeficientu, pašsvārstību frekvences un rimšanas koeficientu [74]. Šādi raksturlielumi visprecīzāk apraksta kustīgās slodzes jeb automašīnas ietekmi uz tilta konstrukcijas dinamiskajām īpašībām.

Lai arī pašsvārstību frekvence un rimšanas koeficients var tikt salīdzināts ar galīgo elementu aprēķina modeļa iegūtajiem dinamiskajiem raksturlielumiem, visprecīzāk dinamisko ietekmi uz tilta konstrukciju parāda tieši dinamiskais koeficients [63].

1.4. 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 koeficientu, savukārt paātrinājumu mērījumus izmanto tilta modālajai analīzei.



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

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 1.7. attēlā, redzamas metodes pārbaudei ar dinamisku slodzi. Attēlā var redzēt arī iesvārstīšanas metodes, iegūstamos rezultātus jeb parametrus un to lietojumu.

1.4.1. Tilta pārbaude ar slodzi

Tilta pārbaudē ar slodzei tiek izmantotas ikdienas satiksmes slodzes (automašīnas, vilcieni vai gājēji) vai apkārtējās vides slodzes (vējš, grunts svārstības). Mērījumi sniedz informāciju par svārstību parametriem visai konstrukcijai – 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. Pārbaudes procedūras apraksts publicēts 2.4. nodaļā.

Pārbaudes metodes ar konkrētu slodzi vai automašīnu ar konkrētu svaru plaši izmantoja, pirms parādījās digitālās datu ierakstīšanas un nolasīšanas metodes, jo rezultāti tika iegūti tikai svarīgākajos konstrukcijas punktos, kas raksturoja konstrukcijas dinamiskos raksturlielumus. 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.

1.4.2. Tilta modālās pārbaudes metodes

Modālās pārbaudes var veikt divos veidos: 1) kā iesvārstītāju izmantojot neizmērāmu spēku, ko rada satiksmes slodze vai vējš; šādu pārbaudes veidu sauc par ekspluatācijas modālo analīzi (angļu val. *operational modal analysis; OMA*) [76]; 2) izmantojot iesvārstītājus, kuriem ir iespējams izmērīt spēku, kas tiek pielikts konstrukcijai; šo metodi sauc par eksperimentālo modālo analīzi (angļu val. *experimantal modal analysis; EMA*) [31]. Ar *EMA* nevar veikt konstrukcijas ilgstošu novērošanu, jo ir nepieciešams izmērīt katra svārstību ierosinošā spēka stiprumu. Savukārt *OMA* nav nepieviešama speciāla konstrukcijas slogošana, jo rezultātā tiek iegūti parastas satiksmes apstākļos. Šo metodi izmanto arī konstrukciju veselības novērtēšanai (angļu val. *structural health monitoring* (*SHM*)), lai ilgstošā laika periodā salīdzinātu iegūtos datus un novērtētu izmaiņas iegūtajos dinamiskajos raksturlielumos [77].

Eksperimentālā modālā analīze (*EMA*)

Eksperimentālā modālā analīze tiek izmantota, ja ir zināms svārstību ierosinošais spēks. Tiltu konstrukcijām šādu spēku var radīt ar triecienslodzi, atvilkšanas metodi un konkrētu svārstību ierosinošām ierīcēm (šeikeriem). Tomēr lielām konstrukcijām šo metodi izmanto reti, jo nav iespējams iesvārstīt vienlaikus visu konstrukciju. Ar dažām no šīm ierīcēm – šeikeriem vai instrumentētiem āmuriem – konstrukcija tiek iesvārstīta ar konkrētu ierosinošu spēku.

EMA sniedz informāciju par pašsvārstību frekvencēm, svārstību formām un modālo svārstību rimšanas koeficientu. Iesvārstīšanas metodes neietekmē konstrukcijas masu un stingumu, tāpēc rezultāti parāda "tīras" konstrukcijas darbību un to izmanto, lai precizētu tilta aprēķina modeli. Iesvārstītājs jeb šeikeris ir iekārta, kas rada svārstības noteiktā frekvencē, un šādi var noteikt precīzu spēku, ar kādu konstrukcija tiek ievārstīta. Analīzes rezultātā tiek iegūti spēki un paātrinājumi, pēc kuriem tiek noteikta frekvences atbildes funkcija (angļu val. *frequency response function; FRF*), pēc kuras var noteikt svārstību formas, izmantojot līknes pielāgošanas metodi [78].

EMA rezultātus izmanto, lai noteiktu konstrukcijas tehnisko stāvokli, kā arī bojājumus [79], [80].

Ekspluatācijas modālā analīze (*OMA*)

OMA ir laba alternatīva *EMA* tādos gadījumos, kad ir ļoti lielas un garas tiltu konstrukcijas, ko nevar iesvārstīt ar vienu šeikeri. *OMA* izmanto, ja nav zināms konkrēts spēks, un konstrukcija tiek iesvārstīta svārstību diapazonā, kurā atrodamas lielākā daļa konstrukcijas svārstību formu [81]. Šādas svārstības rada satiksme, vējš un tilta elementi.

Izmantojot *OMA*, var noteikt pašsvārstību frekvences modālo svārstību rimšanas koeficientu, taču nevar noteikt svārstību formas, jo nav iespējams noteikt iesvārstīšanas spēku. *OMA* rezultāti ir uzticamāki, ja ievēro šādus noteikumus:

− iesvārstīšanai jānotiek pēc nejaušības principa attiecībā uz izvietojumu pa visu konstrukciju;

− iesvārstīšanai jābūt nejaušai attiecībā uz frekvenci; tai jābūt pieliktai visu pārbaudes laiku.

Salīdzinot ar *EMA*, *OMA* metode dod papildu informāciju, lai varētu noteikt dinamisko koeficientu, kā arī informāciju par maksimālajām pārvietojumu, spriegumiem, svārstību frekvenču amplitūdām un paātrinājumu. *OMA* izmanto, lai noteiktu slodzes lielumus un analizētu konstrukcijas nogurumu, kā arī tilta nolietojumu.

1.5. 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.

1.5.1. 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.

Pjezorezistīviem akselerometriem ir plašs mērījumu diapazons, tāpēc tos izmanto situācijās, kad nepieciešams liels frekvenču diapazons. Šie akselerometri var izmērīt līdz pat 0 Hz, tāpēc tos izmanto, kad no izmērītajiem datiem pārveidošanas rezultātā nepieciešams iegūt ātruma un pārvietojuma lielumus. Tomēr tiem ir zems datu ierakstīšanas jutīgums (angļu val. *sensitivity*), tāpēc tos neizmanto gadījumos, kad nepieciešams noteikt ļoti precīzas svārstības, kā arī tie ir jutīgi pret ārējās temperatūras izmaiņām. Pjezorezistīvie akselerometri ir dārgāki par MEMS akselerometriem, tāpēc tos retāk izmanto zemām frekvencēm un svārstību amplitūdu mērījumiem. Šādus akselerometrus vairāk izmanto triecienu modelēšanā automašīnu un militārajā industrijā.

Pjezoelektriskie akselerometrus plaši izmanto konstrukciju pārbaudēs. Šī veida akselerometriem ir plašs frekvenču un jutības diapazons. Tos plaši lieto arī tāpēc, ka tiem ir dažādas formas un svars, zems trokšņu līmenis un tos var lietot gan svārstību mērīšanai, gan triecienu eksperimentos. Šie akselerometri nav piemēroti, ja no paātrinājuma datiem plānots iegūt ātruma vai pārvietojuma datus, jo tie nemēra zemas vibrācijas (zem pāris herciem). Pjezoelektriskajiem akselerometriem svarīgi izmantot lielāka diapazona mērierīces, jo tie mēra tikai to frekvenču diapazonu, kādam tie ir izgatavoti.

Mikroelektromehāniskās sistēmas (MEMS) akselerometriem tiek pielietota speciāla mikrotehnoloģija, tāpēc to izmēri var būt ļoti nelieli. Šajā tehnoloģijā tiek izmantoti kondensatoru saturoši akselerometri, tomēr šo tehnoloģiju var izmantot arī pjezorezistīviem akselerometriem. MEMS akselerometri ir vislabāk piemēroti, lai mērītu zemas svārstību frekvences, pārvietojumus un paātrinājumus. Tomēr tiem ir nepietiekama signāla un trokšņa attiecība, ierobežots frekvenču spektrs, un tie ir piemēroti paātrinājumu līmeņiem zem 200 g. To nelielā izmēra, svara un bezvadu sistēmas dēļ tos plaši lieto modālās analīzes veikšanai tiltu konstrukcijās.

Jaunākās tehnoloģijas bezvadu akselerometri ir savienoti ar globālās pozicionēšanas sistēmu (GPS), kas savukārt ļauj noteikt konstrukcijas kustības globālā sistēmā [82].

Lai izvēlētos nepieciešamo akselerometru, svarīgi zināt paredzamo mērījumu diapazonu un mērīšanas biežumu jeb frekvenci. Akselerometru diapazonu var būt no ± 1 g līdz pat ± 250 g, kur g = 9,8 m/s^2. Mērījumu veikšanai izmanto vienas līdz trīs asu (x, y, and z) akselerometrus atkarībā no paātrinājuma kustības virziena un lielumiem, ko nepieciešams noteikt [83].

Katram akselerometram tiek iestatīts paraugu ņemšanas biežums (angļu val. *samplimg 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.

Akselerometru paraugu ņemšanas frekvenci izvēlas divreiz lielāku nekā paredzamās frekvences, parasti 25–50 Hz. No akselerometriem iegūtās vērtības pēc tam ir jāpārveido atbilstoši nepieciešamajiem datiem. Tiek veikta signāla analīze.

Lai noteiktu pašsvārstību frekvences formas, tiek izmantotas šādas signāla analīzes metodes:

1. Ātrā furjē pārveide *FFT* (angļu val. *fast furier transform*) no individuālajiem mērījumiem, lai noteiktu atbildes spektru (angļu val. *respons spectra*) katram mērījumam.

2. Spektra nogludināšana (angļu val. *smooth raw spectra*) tiek aprēķināta no vidējā normalizētā spēka spektrālā blīvuma *PSD* (angļu val. *power spectral density*), un no tā nolasa svārstību formu vērtības.

3. Svārstību rimšanas parametrus iegūst ar *RDT* (angļu val. *random decrement technique*) palīdzību [84].

Akselerometru datus daudzi pētnieki izmanto, lai no iegūtajiem datiem pēc divkāršās integrēšanas iegūtu pārvietojumu. Tomēr šādai procedūrai var izmantot ne visu ierīču datus . Tas atkarīgs no sensoru tehnoloģijas. Daudziem akselerometriem kļūdas var rasties signāla pārveidošanas procesā no analogā uz digitālo, kā arī to nosaka sensoru trokšņa līmenis [85].

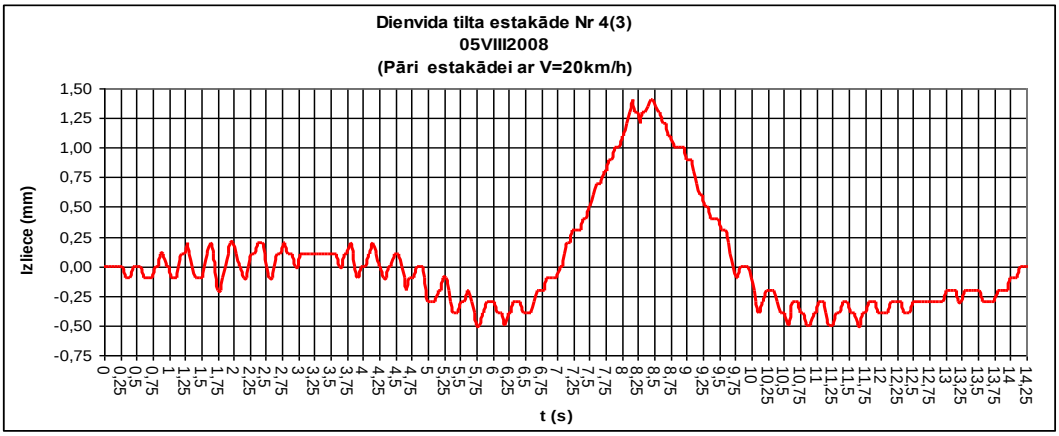
Šajā pētījumā tika izmantoti trīsasu digitālie akselerometri *X6-1a*. Akselerometra diapazons +/– 16 g ar 15 bitu izšķirtspēju. Akselerometru paraugu ņemšanai pieejamās frekvences 12 Hz, 25 Hz, 50 Hz, 100 Hz un 200 Hz. Mērījumos tika izmantota 50 Hz frekvence.

1.5.2. 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 var izmantot lokālas analogās un digitālās pārvietojumu noteikšanas metodes.

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

Lielu konstrukciju svārstību mērīšanai var izmantot *Noptel PSM-200* lāzeriekārtu. Tās darbības princips balstīts uz lāzera staru un uztvērēju, kas novietots uz konstrukcijas. Raidītājs veido atskaites līniju no raidītāja līdz mērķim, un uztvērējs nepārtraukti uzrauga optisko staru kūļa pozīcijas izmaiņas. Mērījumu attālums var būt līdz pat 350 metriem. *Noptel PSM-200* redzams 1.8. attēlā. Kad konstrukcija pārvietojas, notiek mērķa kustība, un uztvērēja optiskais detektors konstatē kustību. Pēc tam aprēķina un apstrādā kustības datus gan x, gan y koordinātās, un mērījumu dati tiek ierakstīti datorā. Mērījumi var tikt veikti pat 500 reizes sekundē.



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

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. Lāzera stara raidītājs tiek novietots uz stabila pamata un nomērķēts uz uztvērēju. Uztvērējs parasti tiek novietots laiduma vidū, lai iegūtu maksimālos pārvietojumus. Iegūtās diagrammas piemērs redzams 1.9. attēlā.

1.10. att. Attēlu apstrādes metode, izmantojot Maksimova tipa ielieču mērītāju.

Pašsvārstību frekvences diapazons autoceļu tiltiem visbiežāk ir no 0 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.

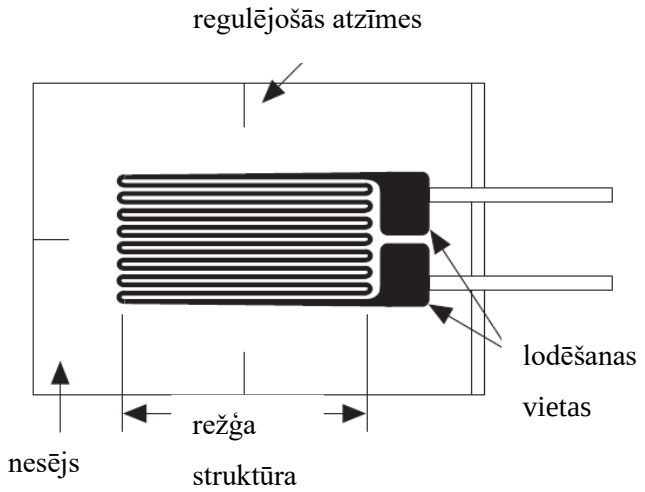
Pārvietojumu mērījumus var veikt, izmantojot arī attēlu apstrādes metodi. Šajā metodē tiek izmantota videokamera, kas novietota pie Maksimova tipa izlieču mērītāja (1.10. att.).

Maksimova tipa ielieču mērītājam tiek piestiprināta stieple, kas pievienota konstrukcijai punktā, kam paredzēts veikt mērījumus. Betona konstrukcijā tiek ieurbts āķis, pie kura piestiprina stiepli. Videokamerā tiek ierakstīti konstrukcijas pārvietojumi, un dati tiek apstrādāti manuāli. Lai arī datu apstrādes process ir laikietilpīgs, šāda metode dod iespēju ierakstīt precīzus pārvietojuma datus.

1.5.3. 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. Metāla deformācijas mērītājs sastāv no ļoti smalkas stieples vai biežāk metāla folijas, kas izvietota režģa rakstā. Režģa struktūra maksimāli palielina metāla stieples vai folijas daudzumu, kas pakļauts deformācijai paralēlā virzienā (1.11. att.).



1.11. att. Metāla tenzometrs [86].

Režģis ir piestiprināts pie plānas pamatnes, kas piestiprināts tieši pie testējamā parauga. Tāpēc testa parauga deformācijas tiek tieši pārnestas uz deformācijas mērinstrumentu, kas reaģē ar lineāru elektriskās strāvas maiņu. Tenzometri ir pieejami ar pretestības vērtību no 30 līdz 3000 Ω. Visbiežāk tiek izmantotas ierīces ar 120, 350, un 1000 Ω.

Ir ļoti svarīgi, lai tenzometrs būtu pareizi piestiprināts (1.12. att.), lai deformācija būtu precīzi pārnesta no testa parauga. Tenzometru ražotāji norāda, kā pareizi piestiprināt konkrēto tenzometru.

1.12. att. Piestiprināts tenzometrs (attēls pa labi) un *SPIDER* daudzkanālu sistēma, kurai piestiprināti tenzometri pirms pārbaudes ar dinamisku slodzi veikšanas.

Tenzometra pamatparametrs ir tā jutība pret deformāciju, kas izteikta kvantitatīvi kā mērierīces faktors *GF* (angļu val. *gauge factor*). Mērierīces faktors ir definēts kā elektriskās pretestības izmaiņas attiecība pret garuma izmaiņām [86].

Ja jāveic mērījumi lielām dzelzsbetona konstrukcijām, kurām materiāls var nebūt pietiekami blīvs, tad var izmantot arī palielinātas formas tenzometrus, kur pats tenzometrs ir uzlīmēts uz palielināta smilšu pulksteņa formas elementa. Šī elementa platākie gali tiek piestiprināti konstrukcijai virzienā, kur sagaidāmi stiepes spriegumi. Tenzometru piestiprina elementa šaurākajā daļā. Šāda veida metodi tiltu pārbaudēs ir izmantojuši zinātnieki *Careu* un *O`Brien* [87].

1.5.4. 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.

Iegūtos datus pēc tam apstrādā dažādas datorprogrammas. Šīs datorprogrammas ļauj apstrādāt un filtrēt datus, kas iegūti no mērierīcēm. Daudzām firmām, kas pārdod šādas ierīces, ir pašiem savas datorprogrammas, piemēram, *ARTeMIS Modal, Dewesoft X, ME'Scope*.

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].

Šādas iekārtas izmanto arī konstrukcijas monitoringam, kad konstrukcija tiek analizēta bez pārtraukuma. Iepriekš nosakot konstrukcijas kritiskos punktus, tajos tiek novietoti akselerometri vai tenzometri un saslēgti vienotā tīklā, kur pēc tam tiešsaistē var sekot līdzi konstrukcijas paātrinājumiem slodzes iedarbībā. Šādas sistēmas kļūst aizvien populārākas visā pasaulē, īpaši liela laiduma tiltiem ar elastīgu brauktuvi. Šādiem tiltiem jau projektēšanas stadijā tiek veikta dinamiskā analīze, lai nepieļautu pārāk lielus dinamiskos pārvietojumus, kas savukārt varētu ietekmēt konstrukcijas ilgmūžību un iedzīvotāju komforta līmeni.

1.5.5. Pārbaudēs izmantotās automašīnas

Slodzes radīšanai uz tilta konstrukcijas tika izmantotas automašīnas ar izmērītiem masas raksturojumiem. Pārbaudēm parasti izmanto automašīnu ar trīs līdz piecām asīm un masu ap 20–40 t. Pārbaudēs izmantotās trīs asu un piecu asu automašīnas redzamas 1.13. un 1.14. attēlā.

1.13. att. Trīs asu automašīna. Masa – 26 t.

1.14. att. Piecu asu automašīna. Masa – 31 t.

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

1.6. Dinamiskās slodzes ievērtējums slodžu aprēķina modelī

Eirokodeksā tiek lietota robežstāvokļu metode, ņemot vērā gan slodzes, gan materiāla drošības koeficientus. Robežstāvokļu metode apskata visus iespējamos 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 tiek aprēķināts, ņemot vērā konstrukcijas sabrukumu, savukārt lietojamības robežstāvoklis nosaka, vai konstrukcija atbilst noteiktiem lietošanas kritērijiem.

Saskaņā ar Latvijā spēkā esošo standartu *LVS EN 1991-2* "Satiksmes slodzes tiltiem" dinamiskās slodzes vērtība konstrukcijas aprēķina slodžu modelī ir konstanta. Tomēr citu valstu standartos dinamiskās slodze tiek izvērtēta citādi.

1.6.1. Lielbritānijas konstrukciju aprēķina standarts (*BS*)

Lielbritānijas konstrukciju standartā jau 1931. gadā tika ņemta vērā dinamiskās slodzes ietekme. To izvērtēja ar ietekmes koeficientu *IK*, kas palielināja statisko slodzi par 50 %. 1958. gadā jaunais standarts *BS 153* samazināja šo koeficientu līdz 25 % [44].

1978. gadā tika izdots pirmais Britu standarts (*BS*) *BS5400*, kurā tika izmantota robežstāvokļu metode. Satiksmes slodze sadalījās normālajā slodzē un smagsvara slodzē, attiecīgi *HA* un *HB* slodzes. *HA* sastāvēja no 120 kN līnijslodzes kopā ar vienmērīgi izkliedētu slodzi, ko apzīmēja ar W. Slogotam laidumam (L) ar garumu līdz 30 m W tika definēta kā 30 kN/m. Lielākam laidumam L > 30 m slodzes lielumu varēja aprēķināt, izmantojot formulu:

$$W = 151(L)^{-0.475}\ kN/m. \tag{31.}$$

Savukārt W vērtība bija ne mazāka par 9 kN/m. Visiem tiltiem bija jāiztur arī vismaz 25 vienības (1 vienība ir 1 tonnas ass slodze) smagsvara slodzes (*HB*). *HB* ir četru asu transportlīdzeklis ar attālumu starp divām vidējām asīm 6, 11, 16, 21 vai 26 m un ass slodzi 10 kN. Satiksmes joslas platums – 3,8 m. Vairāku joslu tiltam *HA* slodze tiek likta uz divām joslām, savukārt 1/3 *HA* slodzes – uz pārējām joslām.

Dinamiskie efekti ir iekļauti statisko slodžu drošības koeficientos. Drošības koeficienti 1,5 un 1,2 tiek lietoti *HA* slodzei, kas šādā veidā tiek apskatīta kopā ar pašsvaru, stiprības un lietojamības robežstāvokļiem, drošības koeficienti 1,33 un 1,1 – HB slodzei. Kopš pievienošanās Eiropas Savienībai Lielbritānijā tika lietots Eirokodekss [88]. Izstājoties no Eiropas Savienības Lielbritānija būvniecības standartu vēl nav mainījusi.

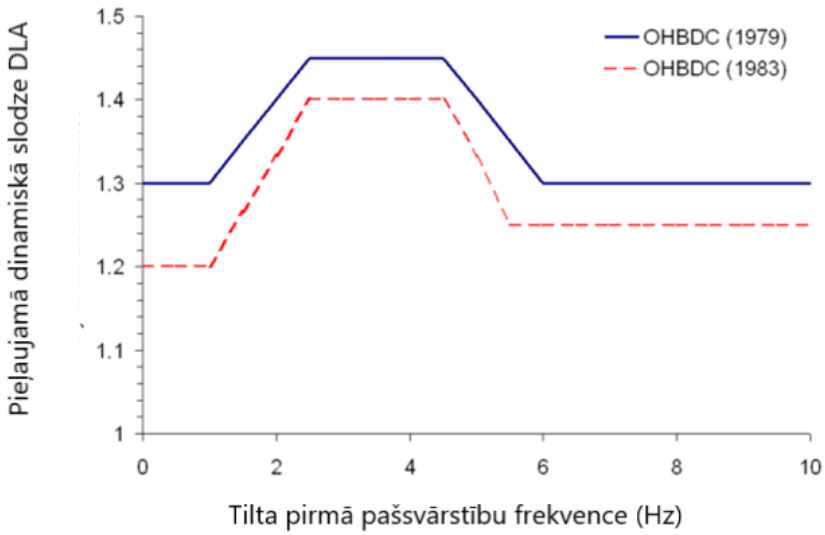
Salīdzinot abus standartus – *BS5400* un Eirokodeksu, var secināt, ka abos standartos tiek lietots gan normālas satiksmes modelis, gan paaugstinātas slodzes satiksmes modelis, kas *BS5400* ir *HA* un *HB*, Eirokodeksā attiecīgi – slodzes modelis *LM1* un *LM3*. Gan *LM1*, gan *HA* ir paredzēts blīvas satiksmes situācijai ar lielu smago automašīnu īpatsvaru satiksmes plūsmā. *LM1* izkliedēta slodze ir paredzēta uz garuma vienību jebkāda garuma tiltam, savukārt *HA* vērtība tiek aprēķināta atkarībā no aprēķina laiduma garuma. *HA* izkliedētas slodzes vērtība ir 5,5 kN/m^2, ar ko vienādi tiek slogotas visas braukšanas joslas. Ja slogotais garums ir lielāks par 30 m, slodzes vērtību samazina. Savukārt *LM1* slodze paliek konstanta neatkarīgi no noslogotā garuma, kas gara laiduma tiltiem kļūst par dominējošo slodzi.

Abos standartos ir slodzes vienība, kas parāda reālas automašīnas situāciju. Eirokodeksā tas ir tandēms, ko veido $2 \times \alpha_{Qi} \times Q_{ki}$, kur α_Q koeficients tiek sareizināts ar attiecīgo slodzi un paliek nemainīgs, un *BS* slodze *KEL*, kas ir viena 120 kN slodze, kas jānovieto katrā no braukšanas joslām [89]. Abas slodzes jānovieto visneizdevīgākajā pozīcijā uz laiduma.

Pēc abu standartu salīdzināšanas var secināt, ka standarta *BS5400* drošības koeficienti ir konservatīvāki.

1.6.2. Amerikas Savienoto Valstu konstrukciju aprēķina standarts (*AASHTO*)

Amerikas Savienoto Valstu standartā *AASHTO* [90] tiek izmantots koeficients – pieļaujamā dinamiskā slodze (*Dynamic Load Allowance*; DLA), kas tiek sareizināts ar statisko mainīgo slodzi. Pētījumā Šveicē un Ontario reģionā Amerikā noskaidrots, ka pieļaujamai dinamiskajai slodzei ir jābūt atkarīgai no tilta pašsvārstību frekvences. 1983. gadā tika izstrādāts Ontario reģiona Autoceļu tiltu aprēķina standarts (*OHBDC*) [91], kurā pieļaujamās *DLA* skaitliskās vērtības ir parādītas 1.15. attēlā.

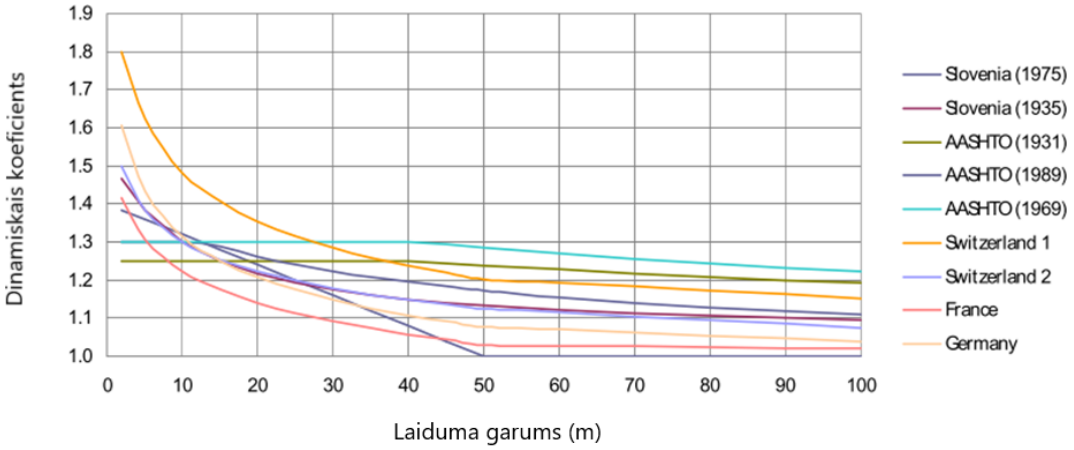


1.15. att. Dinamiskā koeficienta rekomendējamās vērtības, ņemot vērā pašsvārstību frekvenci pēc *OHBDC* standarta [44].

Tomēr *AASHTO* standartā dinamiskā ietekme tika apzīmēta ar ietekmes faktoru (angļu val. *influence factor*), kas atkarīgs no slogotā laiduma garuma. Ietekmes koeficientu *AASHTO* standartā lietoja vēl 1996. gadā (32):

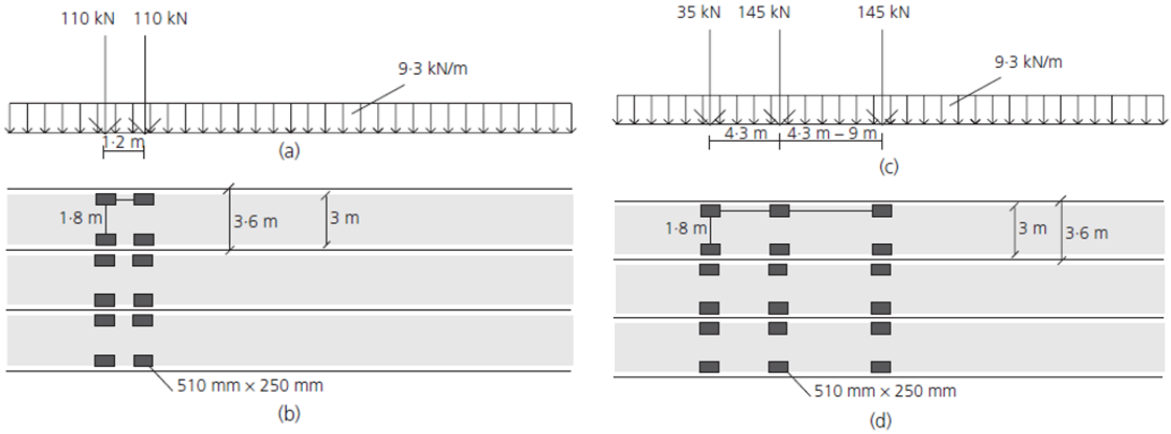
$$IF = \frac{50}{L+125} < 0{,}3. \qquad (32.)$$

1.16. attēlā parādītas dinamiskā koeficienta vērtības, kas tika izmantotas Amerikas un Centrāleiropas valstu standartos atkarībā laiduma garuma. Redzams, ka Eiropas valstu standartos dinamiskā koeficienta vērtības ir konservatīvākas nekā Amerikas standartā.



1.16. att. Dinamiskā koeficienta vērtību izmaiņas dažādu valstu standartos [44].

Standartā statiskās slodzes modelis sastāv no aprēķina kravas automašīnas vai tandēma slodzes atbilstoši kustības joslas slodzei. Aprēķina automašīna ar trīs asīm, starp kurām attālums ir 4,3 un 4,3 līdz 9 m un attiecīgi 35, 145 un 145 tonnu masu uz asi, atbilst *HS-20* slodzei. Aprēķina tandēma slodze sastāv no divām 110 kN ass slodzēm, kas tilta garenvirzienā izvietotas 1,2 m attālumā (1.17. att.). Riepu kontaktvirsmas noteikšanai gan aprēķina automašīnai, gan tandēmam izmanto ass slodzes skaitliskās vērtības ir attiecīgi 72,5 kN un 55 kN. Aprēķinā izmanto 50 % no ass slodzes skaitliskās vērtības, kas tiek palielināta, lai ņemtu vērā dinamisko koeficientu un slodzes palielinājumu, kas pielikts divām riepām.



1.17. att. Tandēma slodze ar ass slodzi 100 kN (pa kreisi) un kravas automašīnas slodze *HS-20* [92].

Riteņa riepas platums paralēli asij ir 510 mm, garums (paralēli kustības virzienam) ir l, kur l = 2,28 x slodze ar drošības koeficientu. Piemēram, 72.5 kN slodzei ar dinamisko koeficientu

1.33 un slodzes koeficientu 1.75, l=169 mm. Aprēķina joslas slodze ir 3 m plata 9,3 kN/m josla, savukārt aprēķina joslas platums ir 3,6 m. Šī ir galvenā *AASHTO* un Eirokodeksa atšķirība.

Jaunajā *AASHTO* standartā dinamiskās slodzes ievērtējums 1 + I ir vienāds visiem laidumu garumiem, t. i., 1,15 nogurumam un 1,33 – pārējiem robežstāvokļiem. Koeficients 1,75 ir jālieto deformācijas šuvju aprēķinam [88].

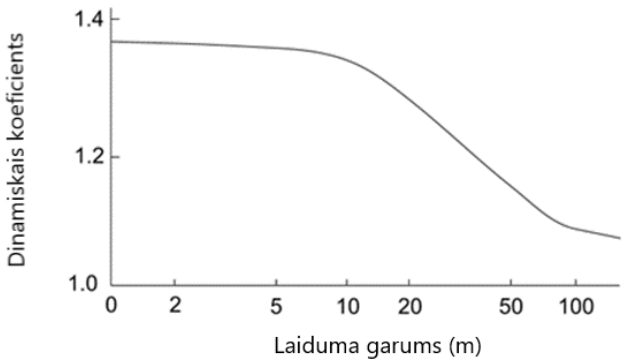
1.6.3. Krievijas konstrukciju aprēķina standarts (*SNIP*)

Tilti, kas Latvijā tika būvēti pirms Eirokodeksa ieviešanas, tika aprēķināti, izmantojot *SNIP* standartu [93], kur dinamiskais koeficients tika apzīmēts ar 1 + μ un tika aprēķināts pēc 33. formulas (33) tērauda un tēraudbetona autoceļu tiltiem un pēc 34. formulas dzelzsbetona autoceļu tiltiem:

$$(1+\mu) = 1 + \frac{15}{37.5+\lambda}; \qquad (33.)$$

$$(1+\mu) = 1 + \frac{45-\lambda}{135}; \qquad (34.)$$

kur λ – laiduma garums vai slogotais ietekmes līnijas garums. Formulas ļauj secināt, ka dinamiskais koeficients ir atkarīgs no laiduma vai slogotās ietekmes līnijas garuma.



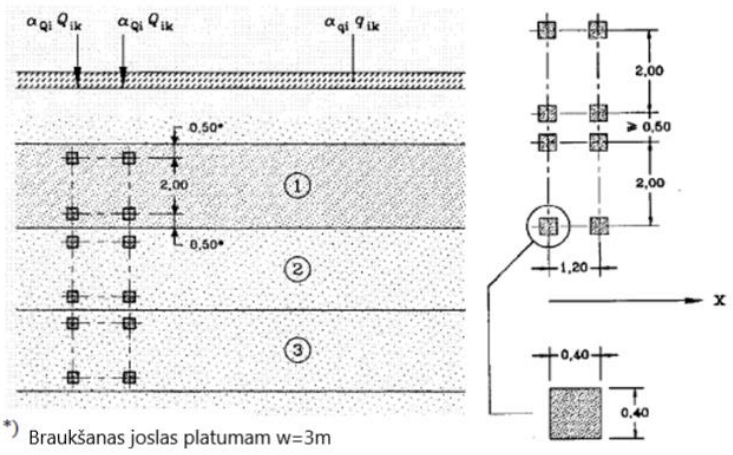
1.18. att. Dinamiskais koeficienta vērtības pēc *SNIP* [44].

Tas nozīmē, ka dinamiskais koeficients samazināsies, palielinoties laiduma garumam. 1.18. attēlā redzams dinamiskā koeficienta vērtības samazinājumu pēc *SNIP* normām.

1.6.4. Eiropas Savienības konstrukciju aprēķina standarts (*EUROCODE*)

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 centrbēdzes un šķērsvirziena slodze.

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.



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

Satiksmes slodzes Eirokodeksā tika noskaidrotas no statiskās satiksmes slodzes simulācijas, slodzes izvietojums redzams 1.19. attēlā, parametru vērtības – 1.2. tabulā.

1.2. tabula

Tandēma slodzes un izkliedētas slodzes aprēķinu vērtības [94]

Novietojums uz braucamās daļas	Tandēms	Vienmērīgi izkliedēta slodze
	ass slodze Q_{ik}(kN)	q_{ik} vai q_{rk} (kN/m^2)
1. josla	300	9
2. josla	200	2,5
3. josla	100	2,5
Pārējās joslas	0	2,5
Atlikušais laukums (q_{rk})	0	2,5

Slodzes modelī *LM2*, kur aprēķina slodze ir vienas ass slodze, šo slodzi aprēķina pēc 35. formulas:

$$\beta_Q Q_{ak} = \alpha_{Q1} Q_{ak}, \quad (35.)$$

kur slodzes rekomendējamā vērtība ir 400 kN. Koriģējošais koeficients β_Q ietver arī dinamisko palielinājumu. Ja netālu no aprēķina slodzes pielikšanas vietas atrodas deformācijas šuve, tad β_Q ir jāsareizina ar palielinājumu $\Delta\varphi_{fat}$:

$$\Delta\varphi_{fat} = 1{,}30\left(1 - \frac{D}{26}\right) \geq 1{,}0, \quad (36.)$$

kur D ir attālums metros no deformācijas šuves. Šāds aprēķins jāveic, ja aprēķina slodzes vieta atrodas tuvāk par 6 m no deformācijas šuves.

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 37. formulu:

$$\varphi = 1{,}40 - \frac{L}{500} \geq 1{,}0, \quad (37.)$$

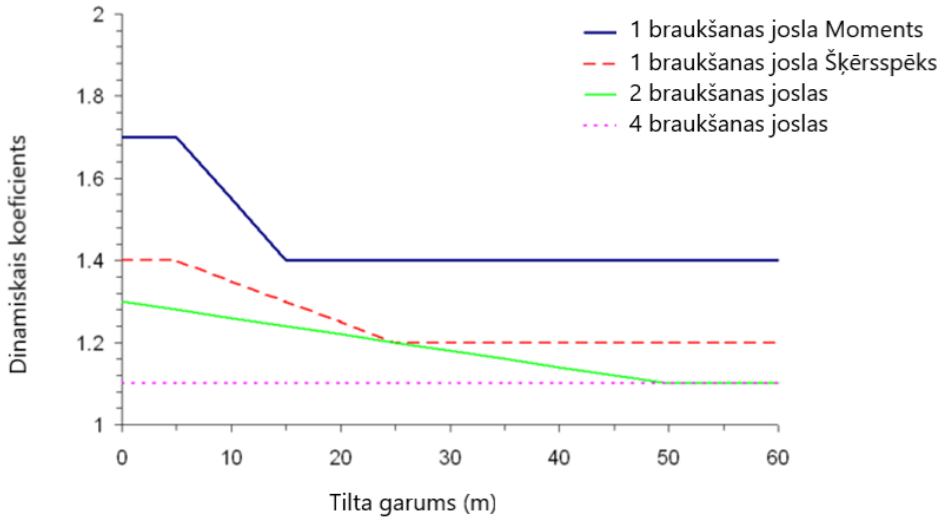
kur L ir ietekmes līnijas garums metros [95].

Slodzes modelī *LM4*, kas apraksta pūļa slodzi 5 kN/m^2 , dinamiskais koeficients jau ir ietverts.

LVS EN 1991-2 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 1.20. attēlā.



1.20. att. Dinamiskais koeficienta vērtības, kas tiek izmantotas Eirokodeksa aprēķina modelī [63].

Eirokodeksā *LVS EN 1991* 2. daļa "Satiksmes slodzes tiltiem" nav ietvertas dinamiskā koeficienta vērtības ekspluatācijā esošajiem tiltiem. Šādā gadījumā nav skaidrs, vai Eirokodeksā norādītās dinamiskā koeficienta vērtības nav pārāk augstas ekspluatācijā esošajiem tiltiem.

1.7. 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.

Standarta 7.3. nodaļā "Pārbaude ar dinamisku slodzi" ir doti vispārīgi norādījumi par pārbaudes veikšanai nepieciešamajiem instrumentiem un pārbaudes metodēm. Standartā teikts, ka:
"Dinamiskās slodzes radīšanai var izmantot piekrautu transportlīdzekli, kāds ikdienā varētu šķērsot tilta konstrukcijas un tajās radīt nelabvēlīgus dinamiskos efektus. Dinamiskās slodzes radīšanai var tikt izmantota transportlīdzekļa kustība pār mākslīgiem nelīdzenumiem (dēļiem) novietotiem šķērsām (automašīnas riteņu bāzes attālumā) uz brauktuves segas.
Tilta pārbaudes laikā transportlīdzeklim vairākas reizes jāpārbrauc laiduma konstrukcija ar dažādiem kustības ātrumiem. Transportlīdzekļa kustības ātrumu, kā arī pārbraucienu skaitu nosaka pārbaudes vadītājs. Lai noteiktu konstrukcijas dinamiskos raksturojumus, var izmantot kustīgās, trieciena, vibrāciju slodzes, kas var izraisīt noturīgu svārstību (tai skaitā brīvo svārstību) rašanos [96]".

Standarts nosaka, ka dinamisko slodzi var radīt piekrauta automašīna, kas pārbrauc tiltam ar dažādiem ātrumiem pie līdzena un nelīdzena seguma. Par pārbaudes procedūru ir atbildīgs pārbaudes vadītājs. Tomēr šīs procedūras nav detalizētas.

Attiecībā uz pārbaudē izmantojamajiem instrumentiem standartā teikts: "Svārstības radošo slodžu pielikšanas punktus, kā arī instrumentu izvietojumu svārstību pierakstīšanai, izvēlās tā, lai iegūtu radīto svārstību raksturojošās vērtības. Tilta pārbaudes laikā ir jāpieraksta svārstību raksturojumi (vibrogrammas), izmantojot speciālu aparatūru svārstību pierakstīšanai [96]". Standarts nekonkretizē, kādu informāciju būtu nepieciešams iegūt no dinamiskās pārbaudes, kā arī izmantojamajām mērierīcēm.

Standarta 7.4. nodaļā, "Konstrukcijas novērtēšana pēc pārbaudes rezultātiem" ir teikts, ka iegūtajiem rezultātiem ir jāsaskan ar aprēķinos iegūtajām vērtībām. Pārbaudes ar kustīgu slodzi rezultātiem to var veikt pašsvārstību frekvencēm, ja tās noteiktas arī eksperimentāli. Savukārt rekomendējamās dinamiskais koeficientu un svārstību rimšanas koeficientu vērtības standarts nepiemin.

Standarta 7.5. Nodaļā "Tehniskās atskaites un eksperta atzinuma sagatavošana", kas attiecas arī uz statiskās pārbaudes veikšanu, aprakstītas tikai atskaitē iekļaujamās nodaļas, taču nav dotas prasības un norādījumi to saturam: "Konstrukcijas apraksts, ieskaitot nepieciešamo informāciju par galveno nesošo elementu konstrukciju; īss remontdarbu tehnoloģijas apraksts, norādot atkāpes no projekta dokumentācijas, kā arī būvniecības laikā radušos defektu apraksts; konstrukcijas inspekcijas rezultāti ar konstatēto bojājumu apjomu un to ietekmes novērtējumu; konstrukcijas izmēru un augstuma atzīmju pārbaudes dati; pārbaudes laikā veikto mērījumu rezultāti un to salīdzinājums ar aprēķinātajām vērtībām; konstrukciju nestspējas aprēķins; atzinums par konstrukcijas tehnisko stāvokli un faktisko nestspēju (atbilstība spēkā esošo normatīvo slodžu uzņemšanai, kā arī MK 2004. gada 29. jūnija noteikumu Nr. 571 "Ceļu satiksmes noteikumi" 3. pielikumā dotām slodzēm) [96]".

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 slogošanas rezultātiem, kur precīzi var aprēķināt vertikālās deformācijas, ko paredzēts iegūt no konkrētās slodzes.

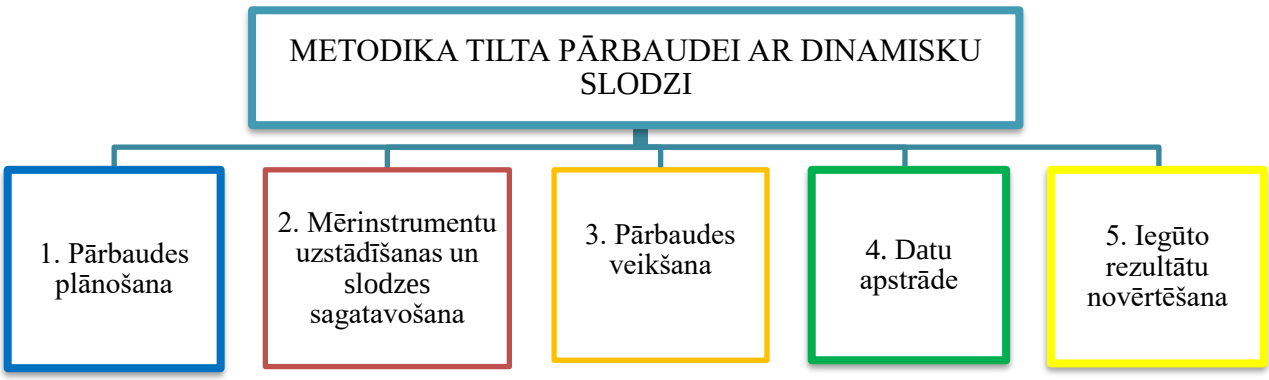
LVS 190-11 "Tiltu inspekcijas un pārbaudes" nekonkretizē, kāda pārbaudes metode tiltiem būtu jāizmanto, lai noteiktu konstrukcijas svārstības, tomēr visbiežāk tiek lietota tieši pārbaude, izmantojot konkrētu dinamisku slodzi.

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.

2.nodaļā izstrādātā metodika parāda Latvijā lietotās pārbaudes ar dinamisku slodzi veikšanas secību, lietoto instrumentu veidus un iegūstamos datus un to novērtējumu. 2.3. nodaļā "Pārbaudes veikšana" 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 seguma uzturēšana. Šāda augstuma un izvietojuma dēļi raksturo nelīdzenu brauktuves segumu ar seguma nelīdzenuma indeksa *IRI* vērtību 6 mm/m. Plašāk par starptautisko seguma nelīdzenuma indeksu *IRI* 3.1.5. apakšnodaļā.

Metodiku tilta pārbaudei ar dinamisku slodzi var iedalīt piecās daļās, kas grafiski parādītas 2.1. attēlā. Katrs metodikas etaps aprakstīts 2.1. līdz 2.5. apakšnodaļās. Metodikas praktiskais lietojums dzelzsbetona plātņu un spriegbetona plātņu tiltu pārbaudei ar dinamisku slodzi aprakstīts 2.6. apakšnodaļā.



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

2.1. Pārbaudes plānošana

Pirms jebkuras tilta pārbaudes – dinamiskās vai statiskās – ir jāveic uzmanīgi plānošanas darbi. Pirms pārbaudes ir svarīgi veikt tilta vizuālo apsekošanu, nosakot bojājumus, kas varētu ietekmēt pārbaudes veikšanas drošību, kā arī izveidot pārbaudes veikšanas programmu, nosakot nepieciešamās mērierīces un to izvietojumu. Izveidot pašas pārbaudes procedūru ar nepieciešamajām automašīnām, pārbraucienu ātrumu un skaitu. Pārbaudes plānošana ir ļoti svarīgs pārbaudes posms, jo tas nosaka ne tikai pārbaudes izmaksas, bet arī sagaidāmos rezultātus.

Pārbaudes plānošanas tiek iedalīta četros apakšpunktos, kas redzami 2.2. attēlā.

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.

2.2. att. Pārbaudes plānošana.

N2 – konstrukcijas GEM aprēķins un nestspējas novērtējums. Izmantojot iegūtos konstrukcijas rasējumus un materiālu stiprības norādījumus, veic GEM aprēķinu un nosaka tilta nestspēju

(vairāk par aprēķinu metodēm 1.3. apakšnodaļā.). 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 (vairāk par mērinstrumentiem promocijas darba 1.5. apakšnodaļā).

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.

2.2. Mērinstrumentu uzstādīšanas un slodzes sagatavošana

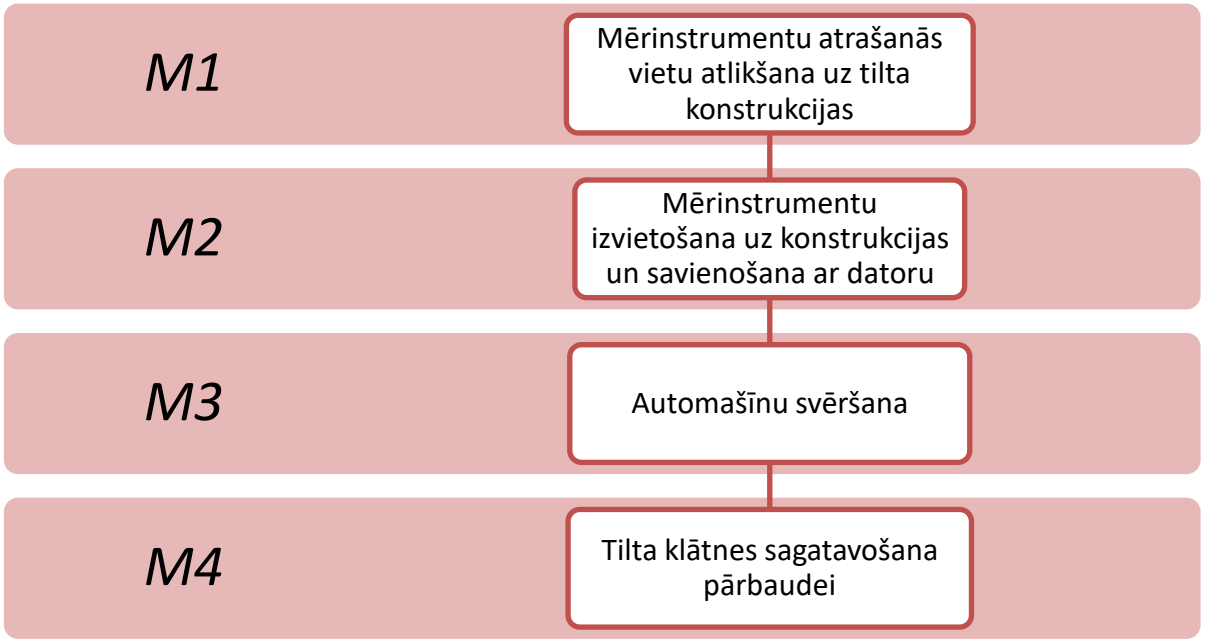
Lai iegūtu uzticamus un precīzus rezultātus, ļoti svarīgi ir pareizi izvietot un piestiprināt mērierīces. Katrai mērierīcei ražotājs norāda lietošanas un uzstādīšanas parametrus, tāpēc ļoti svarīgi ir ievērot šos norādījumus. Svarīgi pierakstīt konkrētās dienas laikapstākļus un katras mērierīces atrašanās vietu, jo tas var ietekmēt mērījumu precizitāti un to interpretāciju.

Mērinstrumentu uzstādīšana un automašīnu slodzes svēršanas process tiek iedalīts četros apakšpunktos, kā parādīts 2.3. attēlā.

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 (vairāk par mērinstrumentiem 1.5. apakšnodaļā). Ja mērinstruments jāsaslēdz ar datoru un vadiem, tad vadi jānovieto tā, lai tie netraucētu satiksmei.

M3 – automašīnu svēršana. Kravas automašīnas tiek nosvērtas, izmantojot speciālus auto svarus. Automašīnas šoferi, kuri veiks pārbraucienus, tiek instruēti, cik braucieni un kādā ātrumā būs jāveic (vairāk par pārbaudēs izmantotajiem auto 1.5.5. apakšnodaļā).



2.3. att. Mērinstrumentu uzstādīšana un automašīnu svēršana.

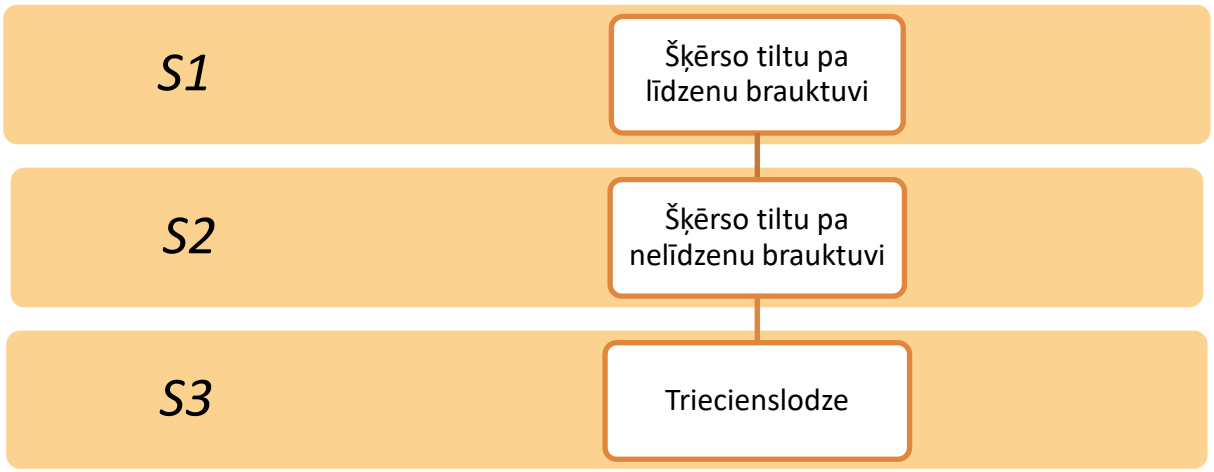
M4 – tilta klātnes sagatavošana pārbaudei. Jāpārliecinās, ka tilta brauktuve pārbaudes laikā ir tukša. Jāpārliecinās, ka automašīnai ir pietiekami daudz vietas, lai uzņemtu ātrumu, pirms tā uzbrauc uz tilta. Jāpārliecinās, ka pārbaudei nepieciešamie 4 cm augstie dēļi un 20 cm augstais tramplīns ir novietoti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

2.3. Pārbaužu veikšana

Pārbaudes procedūras laikā jāpārliecinās, 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. Pārbaudes veikšanas posmi parādīti 2.4. attēlā.

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.



2.4. att. Pārbaudes veikšana.

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. Automašīnas pārbraukšana pār koka dēļiem parādīta 2.5. attēlā.

2.5. att. Automašīnas, pārbraucot tiltu pa nelīdzenu segumu.

S3 – triecienslodze. Laiduma vidū novieto 20 cm augstu iepriekš izgatavotu tramplīnu. Automašīna priekšējo riteņu asi nobrauc no tramplīna, un ļauj konstrukcijai brīvi svārstīties, līdz svārstības norimst. Tramplīns redzams 2.6. attēlā.

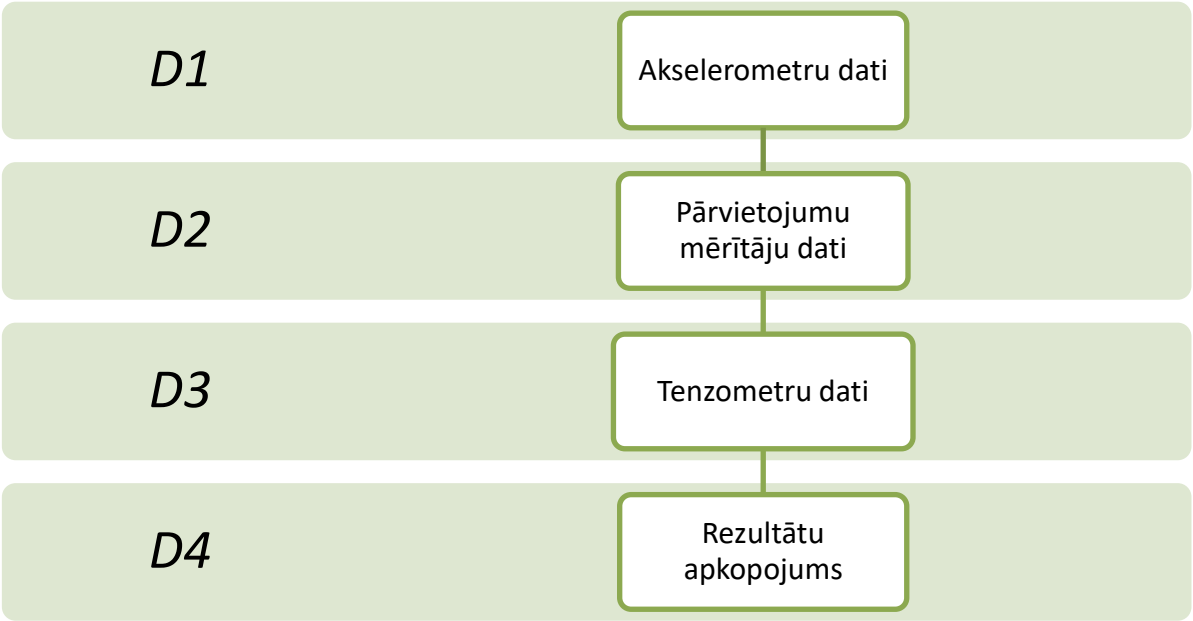
2.6. att. Triecienslodze, nobraucot no 20 cm augsta tramplīna.

Pēc pārbaudes no klātnes noņem visus šķēršļus un veic vēl vienu "nulles" ierakstu bez satiksmes.

2.4. Datu apstrāde

Atkarībā no pārbaudē izmantotajiem mērinstrumentiem datus apstrādā atbilstoši katras mērierīces specifikācijām. Datu apstrādes posmi parādīti 2.7. attēlā.

D1 – akselerometru dati. Akselerometru iegūtos datus ar *FFT* algoritma metodi pārveido par svārstību frekvencēm, tā iegūstot svārstību formas un frekvences. Vairāk informācijas par akselerometriem 1.5.1. apakšnodaļā.



2.7.att. Datu apstrāde.

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 (vairāk par dinamisko koeficientu 1.2.4. apakšnodaļā). No trieciensloodzes diagrammām nosaka svārstību rimšanas koeficientu (vairāk par pārvietojumu mērītājiem 1.5.2. apakšnodaļā).

D3 – tenzometru dati. Tenzometri ieraksta spriegumus, kas veidojas konstrukcijā no konkrētās slodzes (vairāk par tenzometriem 1.5.3. apakšnodaļā). 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.

2.5. Rezultātu novērtēšana

Pēc pārbaudes datu apstrādes ļoti svarīgi ir iegūtos datus pareizi interpretēt. 2.8. attēlā redzama rezultātu novērtēšanas posmi. Lai arī nepastāv konkrēti standarti rezultātu novērtēšanai, ir norādījumi, ko var ievērot, novērtējot iegūtos rezultātus.

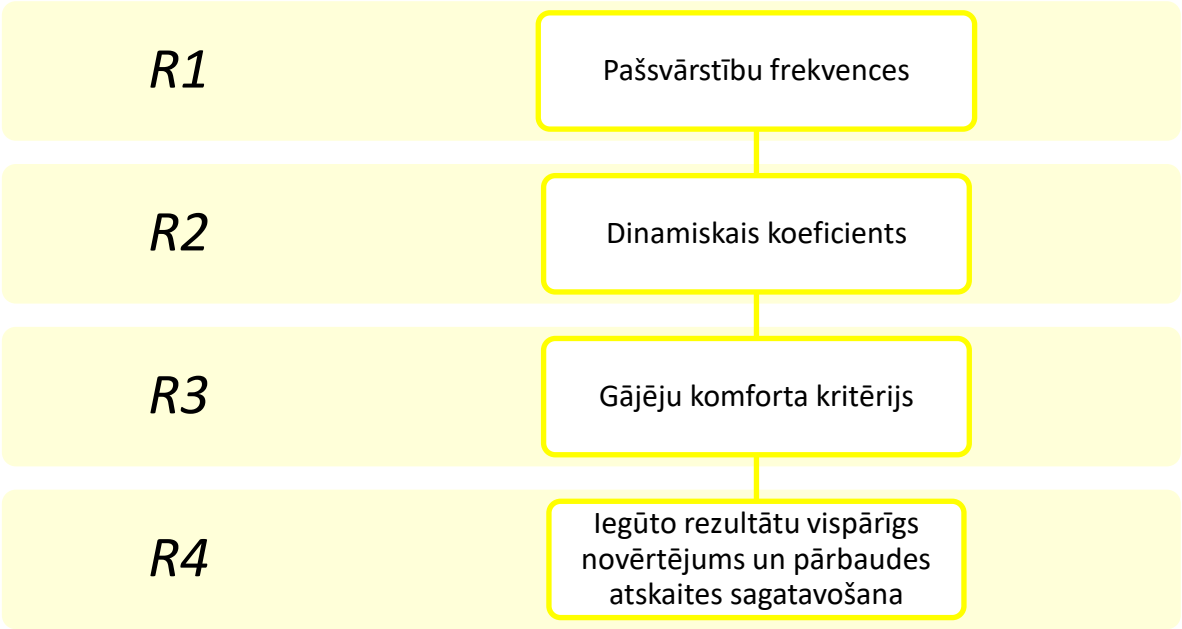
R1 – pašsvārstību frekvences. Iegūtās pašsvārstību frekvences un svārstību formas tiek salīdzinātas ar analītiski aprēķinātajām vērtībām, ja vērtības atšķiras par vairāk nekā 10 %, tad

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. Vairāk par Eirokodeksu un dinamiskā koeficienta ievērtējumu aprēķina modelī 1.6.4. apakšnodaļā.

Nosaka konstrukcijas dinamiskuma indeksu, tā novērtējot tilta dinamiskās veiktspējas līmeni. Jaunā dinamiskuma indeksa aprēķins aprakstīts 3.2. apakšnodaļā.

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 m/s^2, horizontālie paātrinājumi – līdz 0,2 m/s^2.



2.8. att. Rezultātu novērtējums.

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.

2.6. Tilta pārbaude ar dinamisku slodzi - Ceļa pārvads pār dzelzceļu Jelgava–Tukums autoceļa A9 Rīga–Liepāja 38,7km

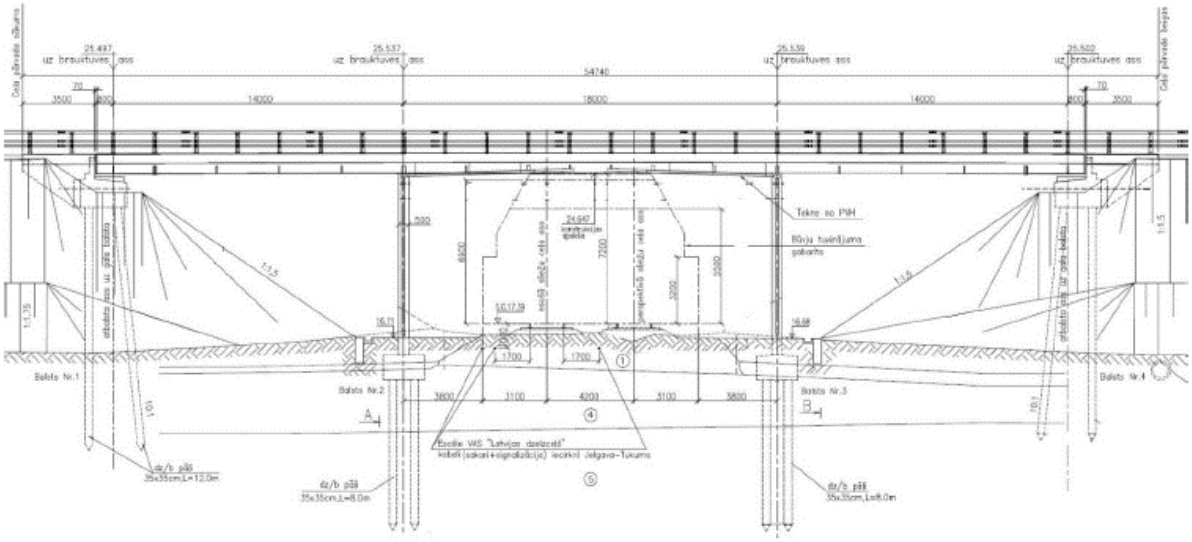
Šajā nodaļā parādīts, kā metodika lietota spriegbetona plātnes tiltu pārbaudei ar dinamisku slodzi.

Pārvada konstrukcijas apraksts

Pārvada nesošā konstrukcija ir nepārtrauktas sistēmas trīs laidumu spriegbetona plātne, kas stingi saistīta ar starpbalstiem (rāmis) (2.9. att.). Brauktuves gabarīts G - 10 (2.11. att.), statiskā shēma 14,0 m + 18,0 m + 14,0 m. Pārvads projektēts slodzēm pēc *LVS EN 1991-2:2004* standarta ar $\alpha = 1$.

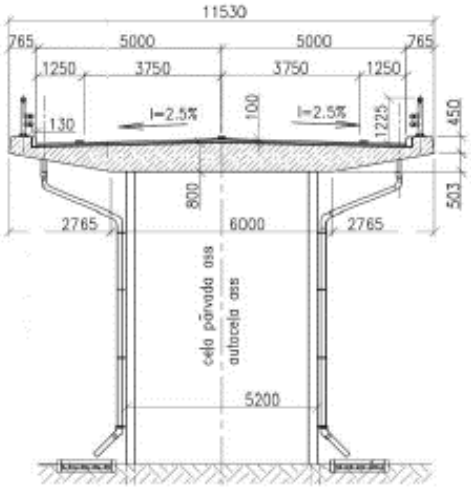
2.9. att. Tilta sānskats un brauktuve.

Pārvada balsti izgatavoti monolītā dzelzsbetona konstrukcijā. Starpbalsti veidoti no diviem plakanas formas statiem, stingi saistītiem ar laidumu konstrukciju (2.10. att.). Balstu pamati veidoti no divās rindās izvietotiem dzītiem pāļiem. Katrā rindā izvietoti deviņi pāļi. Pāļu šķērsgriezums 35 x 35 cm, starpbalstu garums 8,0 m, gala balstu – 12,0 m. Starpbalstiem pāļu augšgali apvienoti monolītā režģogā. Malējo balstu pāļu gali apvienoti monolītā betona rīģelī, uz kura izvietoti balstīklu laukumiņi, kā arī sānu spārniņi un gala atbalstsiena grunts spiediena uzņemšanai. Gala atbalstsienā izveidots plauktiņš pārejas plātņu balstīšanai.



2.10. Pārvada fasāde un balstu konstrukcija.

Laidumu konstrukcija veidota kā monolīta spriegbetona plātne ar mainīgu šķērsgriezumu. Šķērsgriezumā 6 m platā posmā plātnes biezums ir 0,8 m. 6 m platā zonā izvietoti astoņi spriegotu stiegru kūļi. Laidumam izmantots *C40/50* klases betons.



2.11. att. Pārvada balsta fasāde un laiduma konstrukcijas šķērsgriezums.

Brauktuves konstrukcija veidota no 10 m platas divjoslu brauktuves ar joslas platumu 3,75 m. Brauktuves malās izvietotas drošības barjeras ar noturības līmeni *H2* (2.11. att.). Brauktuves segums – asfaltbetons. Brauktuves šķērskritums – 2,5 %. Lietus ūdens novadīšanai uz brauktuves ierīkotas rīdziņas un zemsegas kapilārā ūdens novadsistēmas.

Pārbaudes plānošana

N1 – tilta tehniskā stāvokļa novērtējums

Pārvads ir jaunbūve, tāpēc pārvada vizuālās apskates laikā netika konstatēti bojājumi, kas ietekmētu tilta nestspēju.

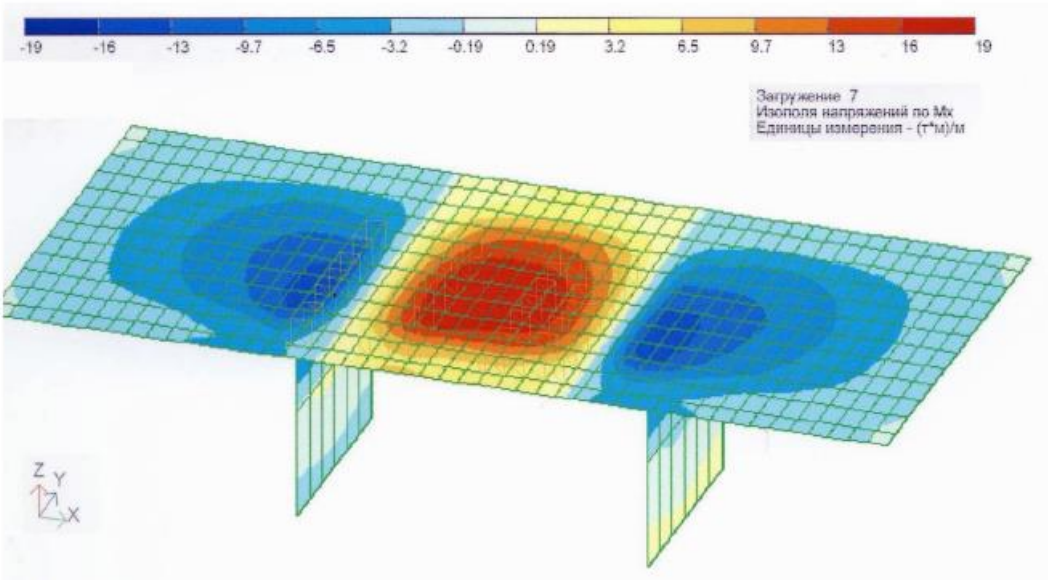
N2 – konstrukcijas GEM aprēķins un nestspējas novērtējums

Tika izpētīti materiālu sertifikāti un tehniskais projekts, lai veiktu konstrukcijas aprēķinu. Pārvads projektēts slodzes *LM1* ar α = 1,0 iedarbības uzņemšanai. Aprēķinā noteiktas pārbaudes slodžu un slodžu *K44* un *LM1* iedarbības ierosinātās piepūles un pārvietojumi. Pārvietojumu un piepūļu noteikšanai pieņemts plātņu telpisks modelis (2.12. att.).

Slodze *K44*

Lielākā ikdienas satiksmes slodze, kas noteikta 2004. gada 29. jūnija MK noteikumos Nr. 571 "Ceļu satiksmes notikumi" *ISO* 40 pēdu 6 asu konteinervedējs ar masu 44 t, slodzes drošuma un dinamiskās iedarbības koeficients 1,35.

Konkrētā pārvada aprēķinam pieņemtas divas blakus braucošas automašīnas *K44* (2.12. att).



2.12. att. Aprēķina slodzes, 2xK44 atrodoties otrajā laidumā, ierosināto M_x piepūļu sadalījums, tm/m.

Slodze *LM1* ar α = 1,0

Lielākā kustīgā slodze pēc Latvijas standarta *LVS EN 1991-2:2004* "Satiksmes slodzes tiltiem": pirmās joslas ratiņu aprēķina slodze 810 kN, otrajai joslai – 540 kN, trešajai joslai – 270 kN, izkliedētās slodzes intensitāte pirmajai joslai – 12,15 kN/m^2, pārējai brauktuves virsmai – 3,375 kN/m^2.

***N3* – tilta dinamiskās analīzes veikšana un instrumentu izvietojuma noteikšana**

Analītiski aprēķināta laiduma konstrukcijas pašsvārstību frekvence n, Hz, un pašsvārstību periods T_0, sek. pirmajai svārstību formai n_1 = 5,2 Hz un T_{o1} = 0,19 sek. Aprēķinu rezultāti redzami 2.1. tabulā.

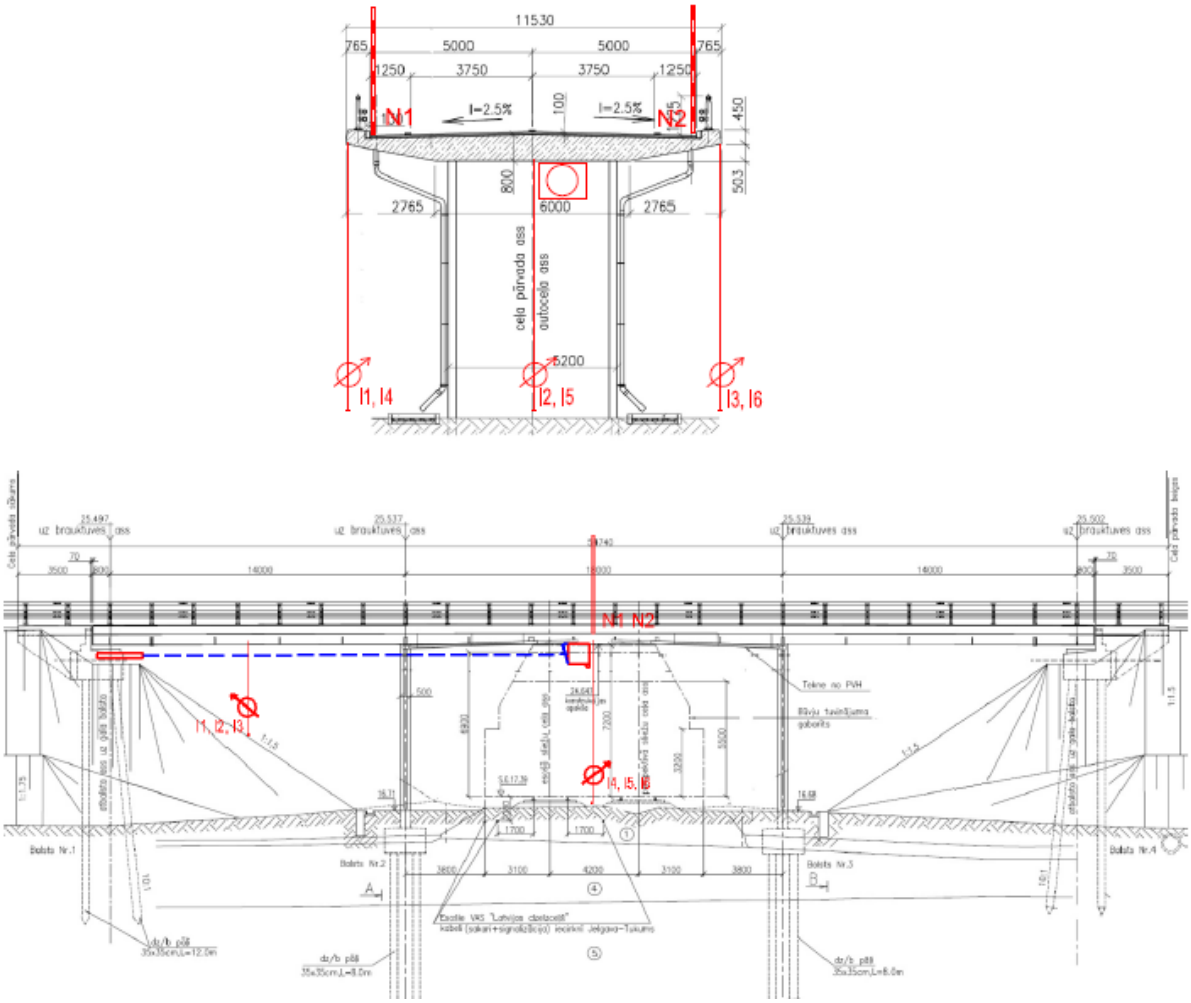
2.1. tabula

Laiduma konstrukcijas aprēķinātie pašsvārstību dinamiskie raksturotāji – frekvence n un svārstību periods T_0, Hz, un sek.

Slodze	Svārstību forma	Frekvence n, Hz.	Periods. T_o, sek.
1	1	5,228	0,191
1	2	7,508	0,133
1	3	8,934	0,112
1	4	9,693	0,103
1	5	12,079	0,083
1	6	12,079	0,083
1	7	17,389	0,058

Laidumu slogošanas laikā tiks mērītas plātnes vertikālās deformācijas laidumu vidū un laiduma konstrukcijas svārstības.

Ielieču mērīšanai tika izmantoti Maksimova tipa ielieču mērītāji. Svārstību pierakstīšanai – videokamera un optiskais lāzera deflektometrs *Noptel*. Mērinstrumentu izvietojuma shēma redzama 2.13. attēlā.



2.13. Mērinstrumentu izvietojuma shēma. I – Maksimova tipa izlieču mērītājs. Sarkanais kvadrāts – *Noptel* optiskais lāzera deflektometrs.

N4 – pārbaudes programmas ar dinamisku slodzi izstrāde

Izstrādāto pārbaudes programmas paraugs publicēts 1. pielikumā.

Mērinstrumentu uzstādīšana un automašīnu svēršana

M1 – mērinstrumentu atrašanās vietu atlikšana uz tilta konstrukcijas

Pirms mērinstrumentu uzstādīšanas uz konstrukcijas tika marķētas vietas, kur jāpiestiprina mērinstrumenti atbilstoši attēlā 2.13. redzamajai shēmai.

M2 – mērinstrumentu izvietošana uz konstrukcijas

Mērinstrumenti tika izvietoti, balstoties uz 2.13. attēlā parādīto shēmu.

Lāzera deflektometrs tika novietots stabilā vietā uz tilta balsta, uztvērējs piestiprināts laiduma plātnes apakšējās daļas vidū (2.14. att.)

2.14. att. Optiskais lāzera deflektometrs *Noptel*.

Maksimova tipa ielieču mērītāji novietoti zem konstrukcijas. Tērauda stieples piestiprinātas pie laiduma konstrukcijas norādītajās vietās (2.15. att.).

2.15. att. Maksimova tipa ielieču mērītājs.

***M3* – automašīnas un to svēršana**

Tilta pārbaudē ar dinamisku slodzi izmantota automašīna *MAN* ar trīs asīm un masu 26,5 t.

***M4* – tilta klātnes sagatavošana pārbaudei**

Pirms pārbaudes par būvprojektu atbildīgajai personai ir jānodrošina, lai:

- tilta klātne būtu tīra no būvgružiem un tehnikas;
- pievadceļiem pie tilta jābūt pieejamiem, lai automašīna varētu uzņemt ātrumu;
- pārbaudei nepieciešamie 4 cm augstie dēļi un 20 cm augstais tramplīns ir novietoti pieejamā attālumā.

Pārbaude ar dinamisku slodzi

***S1* – automašīna šķērso tiltu pa līdzenu brauktuvi**

Automašīna šķērsoja tiltu ar ātrumu 30 km/h un 60 km/h pa līdzenu brauktuvi.

***S2* – automašīna šķērso tiltu pa nelīdzenu brauktuvi**

2.16. att. Automašīna pārbrauc pār dēļiem.

Automašīna šķērsoja tiltu pār koka latām ar 20 km/h un 30 km/h (2.16. att.).

***S3* – triecienslodze**

Automašīnas priekšējie riteņi nobrauca no tramplīna.

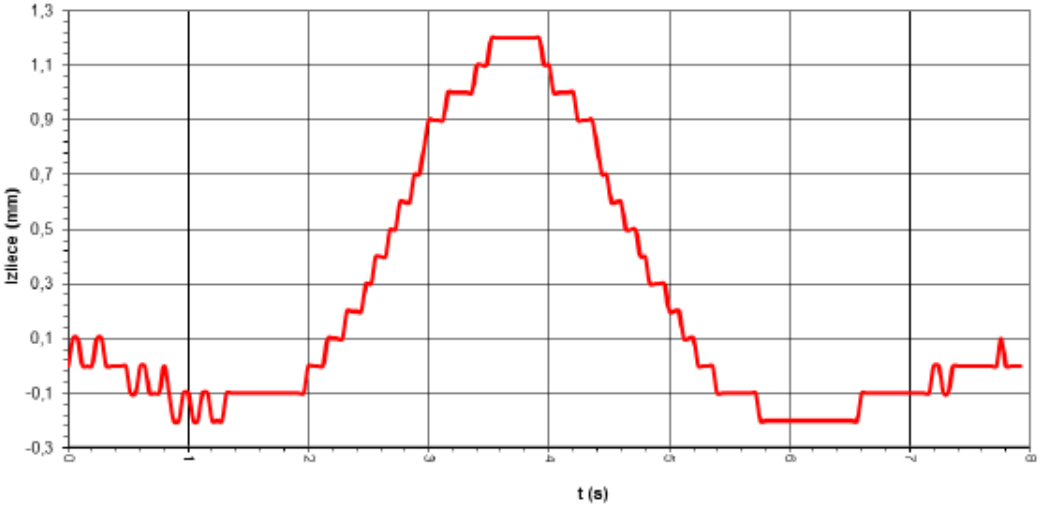
Datu apstrāde

***D1* – akselerometru dati**

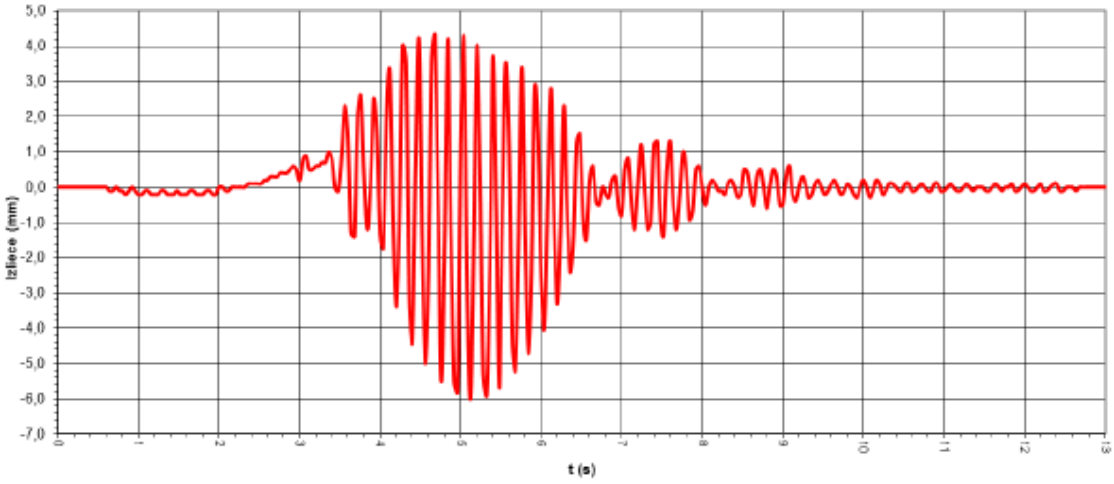
Šis tilts gājējiem nav paredzēts, tāpēc paātrinājumu mērījumi netika veikti.

***D2* – pārvietojumu mērītāju dati**

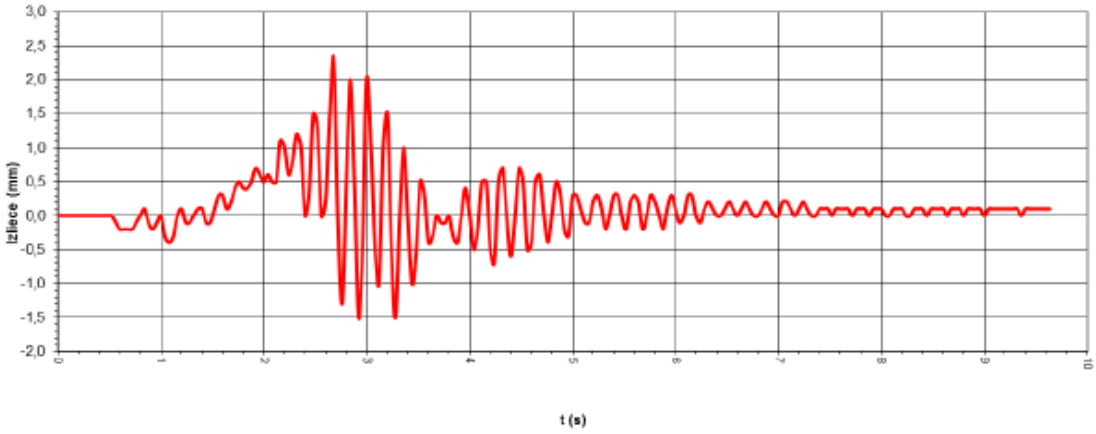
Maksimova tipa ielieču mērītāju izmērītās un attēlu apstrādes metodes rezultātā iegūtās vibrogrammas redzamas 2.17.–2.19. attēlā.



2.17. att. Dinamisko svārstību vibrogramma – līdzena brauktuve.

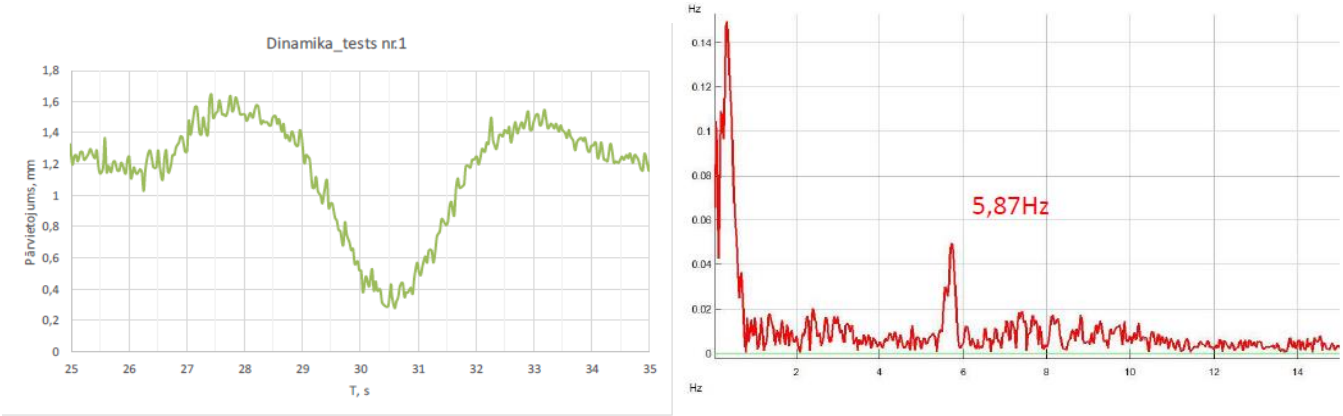


2.18. att. Dinamisko svārstību vibrogramma – nelīdzena brauktuve. Ātrums 20 km/h.



2.19. att. Dinamisko svārstību vibrogramma – nelīdzena brauktuve. Ātrums 30 km/h.

Lāzera deflektometra *Noptel* mērījumu vibrogramma redzama 2.20. attēlā.



2.20. att. Dinamisko svārstību vibrogramma – nelīdzena brauktuve. Ātrums 30 km/h.

***D3* – tenzometru dati**

Šajā pārbaudē tenzometrus izmantot nebija nepieciešams.

***D4* – rezultātu apkopojums**

Pārbaudes laikā iegūto dinamisko raksturojumu apkopojums dots 2.2. tabulā.

2.2. tabula

Tilta dinamisko raksturojumu apkopojums

Dinamiskie raksturojumi	Mēr-vie-nība	Automašīnai pārbraucot pa gludu brauktuvi	Automašīnai pārbraucot pa nelīdzenu brauktuvi 20 km/h.	Automašīnai pārbraucot pa nelīdzenu brauktuvi 30 km/h.
Statiskā deformācija	mm	1,1	1,2	1,0
Dinamiskā deformācija	mm	1,15	2,3	2,4
Lielākā svārstību amplitūda vertikālās deformācijas laikā	mm	0,1	2	3,5
Dinamiskais koeficients		1,05	1,9	2,4
Brīvo svārstību frekvence	Hz	7,5	6	6
Uzspiesto svārstību frekvence pirmajai formai	Hz	–	5,5	5,87
Brīvo svārstību periods	Sek.	0,13	0,17	0,17
Uzspiesto svārstību periods pirmajai formai	Sek.	–	0,18	0,18

Rezultātu novērtēšana

***R1* – pašsvārstību frekvences**

Analītiski aprēķināta laiduma konstrukcijas pašsvārstību frekvence un pašsvārstību periods pirmajai svārstību formai n_1 = 5,2 Hz un T_{o1} = 0,19 sek. Pārbaudē noteiktā pirmās formas frekvence ir 5,87 Hz un periods 0,18 sek., tātad ļoti tuvu aprēķinātajiem lielumiem. Tas norāda, ka aprēķina modelis atbilst reālajai situācijai.

***R2* – dinamiskais koeficients**

Līdzenas brauktuves gadījumā dinamiskais koeficients ir 1,15, kas ir mazāks par Eirokodeksa slodzē *LM1* iekļauto vērtību 1,4. Nelīdzenas brauktuves gadījumā dinamiskais koeficients pārsniedz rekomendēto vērtību un ir attiecīgi 1,9 un 2,4. Tas norāda, ka šādai konstrukcijai jāveic regulāri uzturēšanas darbi, lai nepieļautu nelīdzenu ceļa segumu.

***R3* – gājēju komforta kritērijs**

Šim tiltam nav paredzēta gājēju plūsma, tāpēc šo kritēriju pārbaudīt nebija nepieciešams.

***R4* – iegūto rezultātu vispārējs novērtējums un pārbaudes atskaites sagatavošana**

Pārbaudes laikā izmērītie un aprēķinātie dinamiskie raksturojumi parāda, ka līdzenas brauktuves gadījumā konstrukcijas dinamiskie raksturlielumi ir rekomendēto vērtību robežās. Tiek rekomendēts veikt tilta regulāru uzturēšanu, lai nerastos situācija ar nelīdzenu ceļa segumu.

Konstrukcijai noteiktais dinamiskuma indekss 15 (no 20) norāda, ka nelīdzena ceļa seguma gadījumā tilta dinamiskās veiktspēja ir augsta (dinamiskuma indeksa aprēķins publicēts 3.2. apakšnodaļā).

Pārvada pārbaudē iegūtie rezultāti tiek apvienoti atskaitē.

2.7. Secinājumi

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 norāda uz 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 dekrements un svārstību rimšanas 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 rimšana, vertikālā deformācija un pašsvārstību frekvence. Dinamisko koeficientu nav iespējams noteikt konstrukcijai, neveicot pārbaudi ar dinamisku slodzi, tāpēc izstrādātajā metodē tas netiek izmantots.

Lai noskaidrotu parametrus, ko iespējams noteikt konstrukcijas projektēšanas stadijā, tika apskatīts brīvo svārstību kustības vienādojums:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0. \tag{38.}$$

Vienādojumā parādīti spēki, kas darbojas uz brīvi svārstītu konstrukciju. Tie ir: inerces spēks ($m\ddot{u}$); viskozā rimšana ($c\dot{u}$); elastīgais atsperes spēks, ko raksturo konstrukcijas stingums (ku) [50]. Jaunai konstrukcijai no šiem parametriem ir iespējams noteikt stingumu, ko raksturo izmantotais materiāls, un ģeometriju. Rimšanas koeficientu jaunai konstrukcijai ir iespējams izmērīt, taču, ja šis lielums vēl nav zināms, tad var izmantot vērtību, zinot raksturīgo rimšanas koeficientu diapazonu pētāmajām konstrukcijām. Pārvietojumu nosaka pēc mērījumu rezultātiem vai konstrukcijas aprēķina modeļa.

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 rimšanas koeficients,

paātrinājumus un svārstību amplitūdu. No tiem svarīgākie ir rimšanas koeficients un svārstību amplitūda, kas raksturo arī konstrukcijas stingumu.

Dažādiem tiltu veidiem parametru vērtības var atšķirties, tāpēc 3.1.2, 3.1.3. un 3.1.4 apakšnodaļās 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 noteikti četras 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 3.1. apakšnodaļas 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 , ņemot vērā aprēķina modeli, tad svārstību rimšanas koeficientu, neveicot pārbaudi, noteikt nav iespējams. Tāpēc svarīgi bija noteikt šī parametra vērtību diapazonu no eksperimentāli iegūto pārbaužu ar dinamisku slodzi rezultātiem.
Pēdējais kritērijs ir starptautiskais nelīdzenuma indekss *IRI*, kura vērtības dažādiem ceļa segas stāvokļiem ir publicētas 3.1.5. apakšnodaļā.

3.1. Eksperimentāli iegūto dzelzsbetona tiltu dinamisko raksturlielumu analīze

Dati no pārbaudēm ar dinamisku slodzi ir analizēti 3.1.1. apakšnodaļā. Analīzē noteiktas vidējās dinamiskā koeficienta vērtības dzelzsbetona tiltiem ar līdzenu un nelīdzenu segumu, transportlīdzeklim pārbraucot tiltu ar 40 km/h ātrumu.

Visu tiltu dati tika izvērtēti, un no tiem atlasītas līdzīgas konstrukcijas dzelzsbetona plātnes, spriegbetona siju, ribotas spriegbetona plātnes ar vienu un vairākām ribām, lai veiktu to dinamisko raksturlielumu izvērtējumu. Datu analīzes rezultāti publicēti 3.1.2., 3.1.3. un 3.1.4. apakšnodaļās. Analīze tika veikta, izmantojot šādus tiltu ģeometriskos parametrus:

- tilta sistēma: divbalstu sija / plātne vai rāmis;
- pārtraukta vai nepārtraukta sistēma;
- laiduma garums;
- laiduma konstrukcijas augstums;
- tilta garenass slīpums;
- tilta garums,
- laidumu skaits,
- tilta platums;
- laiduma konstrukcijas garuma un augstuma attiecība.

Tika izmantoti arī dinamiskie parametri:

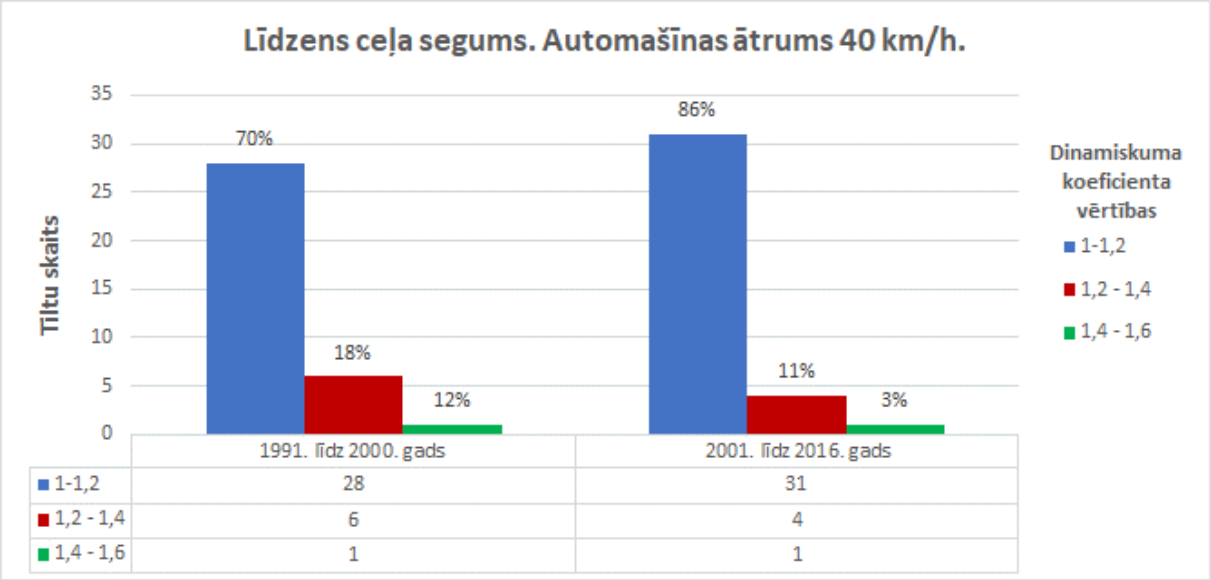
- lielākais dinamiskais koeficients (nelīdzena brauktuve);
- logaritmiskais dekrements;
- svārstību rimšanas koeficients;
- relatīvā vertikālā deformācija (laiduma garums / statisko vertikālo deformāciju);
- pašsvārstību frekvence (pirmā forma);
- aprēķinātā pirmās formas pašsvārstību frekvence.

Tika noteikti kritēriju diapazoni, kas norāda uz augstu dinamiskā koeficienta iespējamību, kā arī apskatīts, vai ir korelācija starp pašsvārstību frekvenci, dinamisko koeficientu, līdzenai un nelīdzenai brauktuvei, kā arī laiduma garumu un laiduma garuma / augstuma attiecību.

3.1.1. Dinamiskie koeficienti tiltiem, kas pārbaudīti no 1991. līdz 2016. gadam

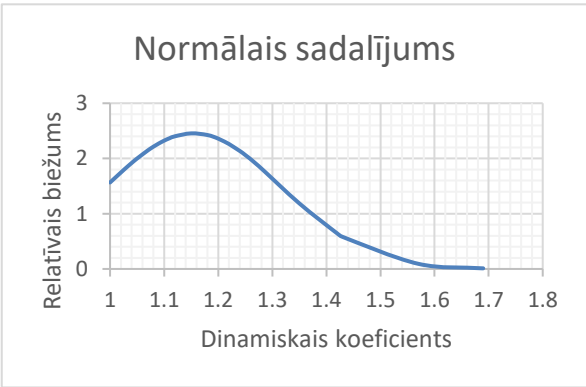
Šajā pētījuma daļā izmantoti 69 tiltu pārbaužu rezultāti. Rezultāti tika iegūti no 1991. līdz 2016. gadam. Tilti ir iedalīti divās grupās: 34 tilti, kas pārbaudīti no 1991. līdz 2000. gadam un projektēti atbilstoši *LVS* un *SNIP* standartiem, un 35 tilti, kas projektēti no 2001. līdz 2016. gadam atbilstoši *LVS EN 1991-2* un citiem Eirokodeksiem. Abās grupās ir dzelzsbetona siju un plātņu, spriegbetona siju un plātņu tilti, kā arī tēraudbetona tilti. Analīze tika veikta, salīdzinot dinamiskā koeficienta vērtības tiltiem, kas projektēti pirms un pēc 2000. gada, kad tiltus Latvijā sāka projektēt pēc Eirokodeksa standartiem. Lai noteiktu statistiski visbiežāk izmērīto dinamiskā koeficienta vērtību, tika izmantota varbūtības teorija. Tika noteikts dinamiskā koeficienta normālais sadalījums un vidējā dinamiskā koeficienta vērība.

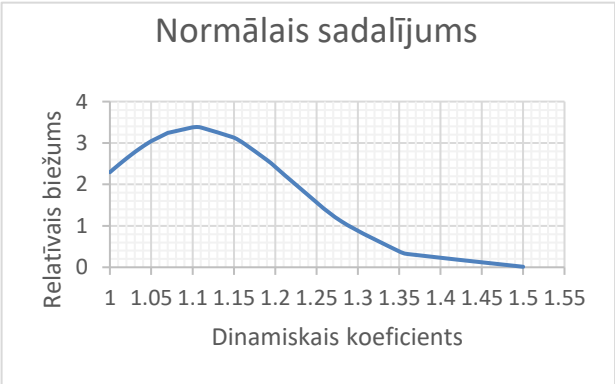
Diagrammā, kas parādīta 3.1. attēlā, redzams visu 69 tiltu dinamiskā koeficienta vērtību procentuālais sadalījums līdzena ceļa seguma apstākļos, automašīnai pārvietojoties ar ātrumu 40 km/h, tiltiem, kas būvēti no 1991. līdz 2000. gadam un no 2001. līdz 2016. gadam. Diagramma ļauj secināt, ka 70 % no iegūtajiem rezultātiem dinamiskais koeficients ir robežās no 1 līdz 1,2 un tikai 18 % ir ar vērtību intervālā no 1,2 līdz 1,4. Savukārt tikai viens rezultāts uzrāda dinamisko koeficientu, kas ir augstāks par 1,4. 3.1. attēlā redzamajā diagrammā parādīts arī tas, ka no tiltiem, kas būvēti no 2001. līdz 2016. gadam, 86 % tiltu dinamiskais koeficients ir robežās no 1 līdz 1,2. Tikai 11 % tiltu dinamiskais koeficients ir robežās no 1,2 līdz 1,4, savukārt 3 % ir fiksētas dinamiskā koeficienta vērtības, kas pārsniedz Eirokodeksā paredzēto vērtību – 1,4.



3.1.att. Dinamiskā koeficienta diagramma dzelzsbetona, spriegbetona un tēraudbetona tiltiem ar līdzenu segumu. Automašīnas ātrums 40 km/h.

Normālā sadalījuma līknes redzamas 3.2. attēlā. Vidējā dinamiskā koeficienta vērtība tiltiem ar līdzenu segumu, kas uzbūvēti līdz 2000. gadam, ir 1,15, savukārt tiltiem, kas uzbūvēti pēc 2000. gada, vidējā dinamiskā vērtība ir 1,10. Tātad vidēji šī vērtība nepārsniedz būvnormatīvos norādītās vērtības.

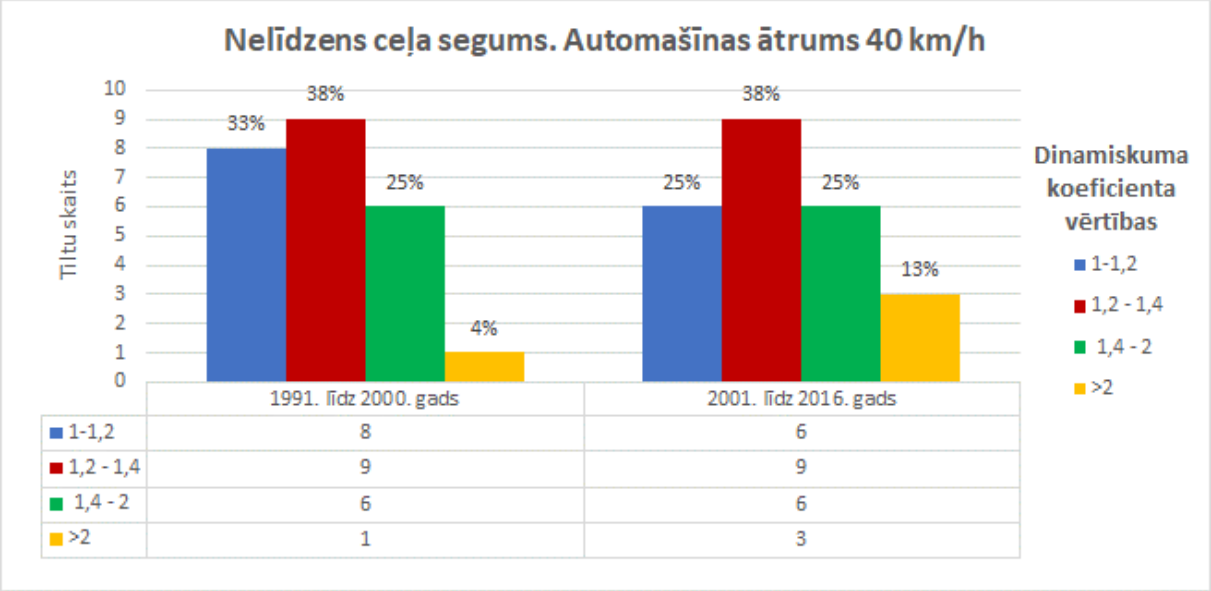




3.2.att. Dinamiskā koeficienta normālais sadalījums visiem 69 tiltiem ar līdzenu segumu. Automašīnas ātrums 40 km/h. Pa kreisi – no 1991. līdz 2000. gadam. Pa labi – no 2001. līdz 2016. gadam.

Visu 69 tiltu dinamiskā koeficienta vērtības, kas redzamas 3.3. attēlā, nelīdzenai brauktuvei ar automašīnas ātrumu 40 km/h ir lielākas nekā līdzenai brauktuvei. Visizteiktāk palielinājies tiltu skaits, kuru dinamiskā koeficienta vērtības ir robežās no 1,2 līdz 1,4, tātad dinamiskā koeficienta vērtības pieaug nelīdzenam autoceļa segumam.

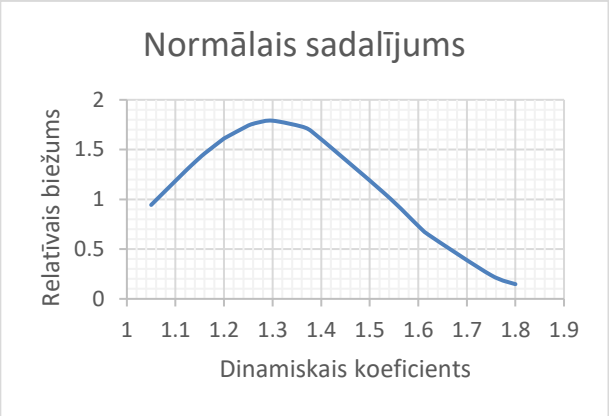
Rezultāti rāda, ka, salīdzinot ar līdzena seguma situāciju (3.1. att.), kur dinamiskā koeficienta vērtības tikai diviem tiltiem ir virs 1,4, nelīdzena seguma gadījumā attiecīgi septiņu un deviņu tiltu dinamiskā koeficienta vērtības pārsniedz 1,4, kas ir 29 % un 38 % no visiem analīzē iekļautajiem tiltiem. Tas liecina arī par to, ka tiltiem, kas būvēti pēc 2000. gada, nelīdzens segums biežāk var radīt dinamisko koeficientu virs 1,4.

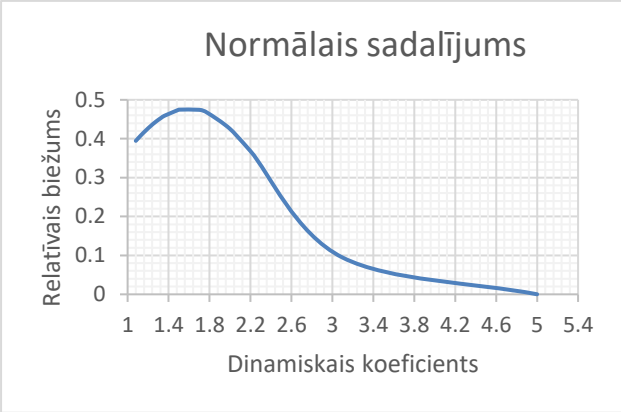


	1991. līdz 2000. gads	2001. līdz 2016. gads
1-1,2	8	6
1,2 - 1,4	9	9
1,4 - 2	6	6
>2	1	3

3.3.att. Dinamiskā koeficienta diagramma visiem 69 tiltiem ar nelīdzenu segumu. Automašīnas ātrums 40 km/h.

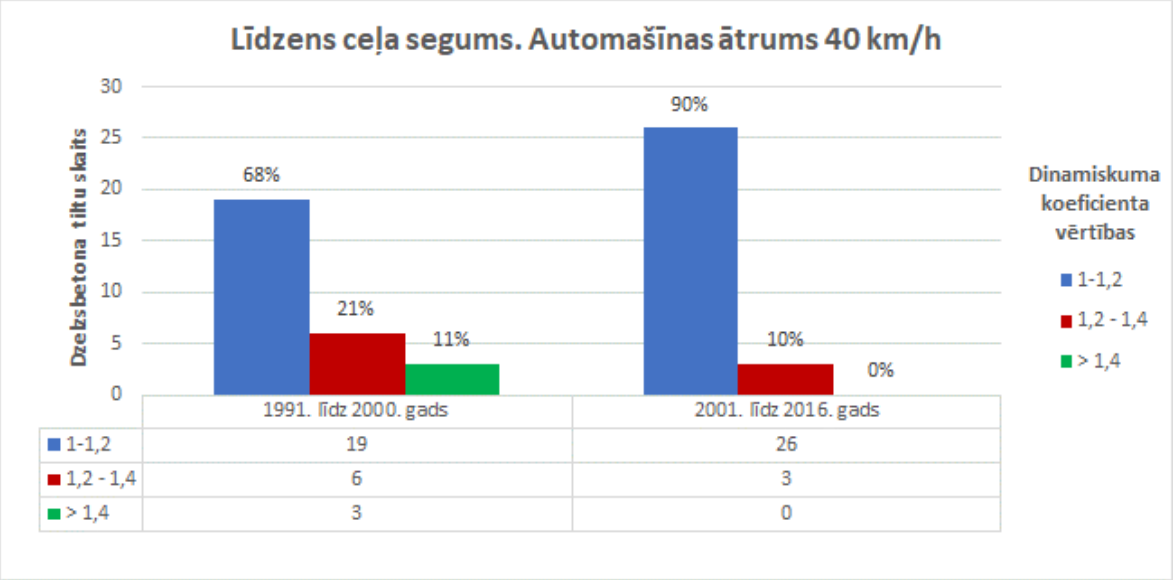
Normālā sadalījuma līknes nelīdzenam segumam parādītas 3.4. attēlā. Vidējā dinamiskā koeficienta vērtība tiltiem ar nelīdzenu segumu, kas būvēti līdz 2000. gadam, ir 1,3, savukārt pēc 2000. gada vidējā dinamiskā koeficienta vērtība ir 1,6. Tas liecina par to, ka pirms 2000. gada tika būvēti stingāki tilti , taču, sākot no 2000. gada, nelīdzens segums konstrukcijai daudz biežāk rada dinamiku, kas pārsniedz Eirokodeksā dotās rekomendācijas.





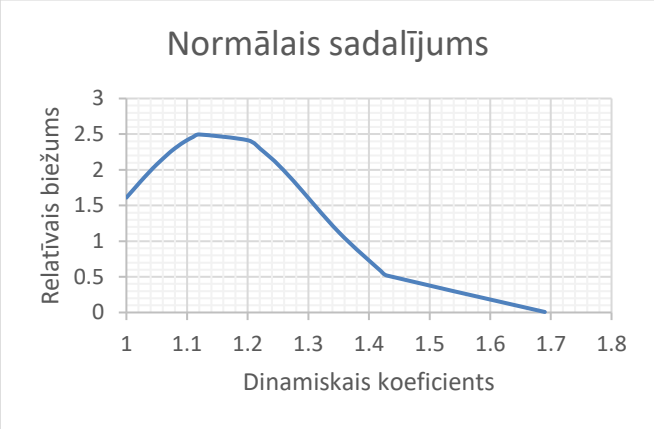
3.4. att. Dinamiskā koeficienta normālais sadalījums visiem 69 tiltiem ar nelīdzenu segumu. Automašīnas ātrums 40 km/h. Pa kreisi – no 1991. līdz 2000. gadam. Pa labi – no 2001. līdz 2016. gadam.

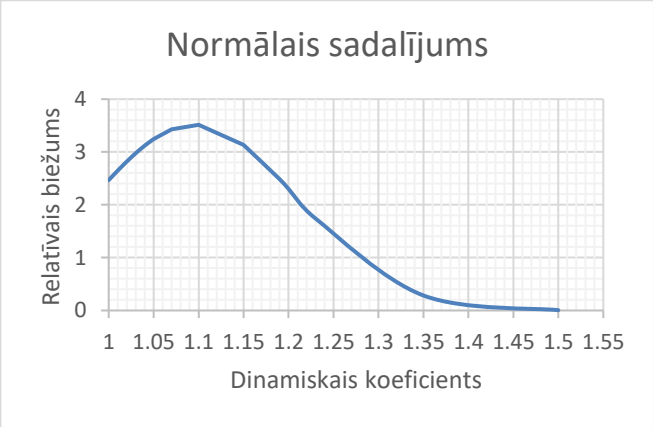
Šajā pētījumā tiek apskatīti dzelzsbetona un spriegbetona tilti, tāpēc tika apskatītas arī dinamiskā koeficienta vērtības tieši dzelzsbetona un spriegbetona tiltiem. Dzelzsbetona un spriegbetona tiltu skaitā ir gan siju, gan plātņu tilti. Dzelzsbetona un spriegbetona tiltu dinamiskā koeficienta vērtības ar līdzenu ceļa segumu un automašīnas ātrumu 40 km/h ir redzamas 3.5. attēlā. Diagramma parāda, ka dinamiskā koeficientu vērtības visiem tiltiem ir robežās starp 1 un 1,4, izņemot trīs tiltus, kas būvēti no 1991. līdz 2000. gadam un ir dzelzsbetona siju tilti.



3.5. att. Dinamiskā koeficienta diagramma dzelzsbetona un spriegbetona tiltiem ar līdzenu segumu. Automašīnas ātrums 40 km/h.

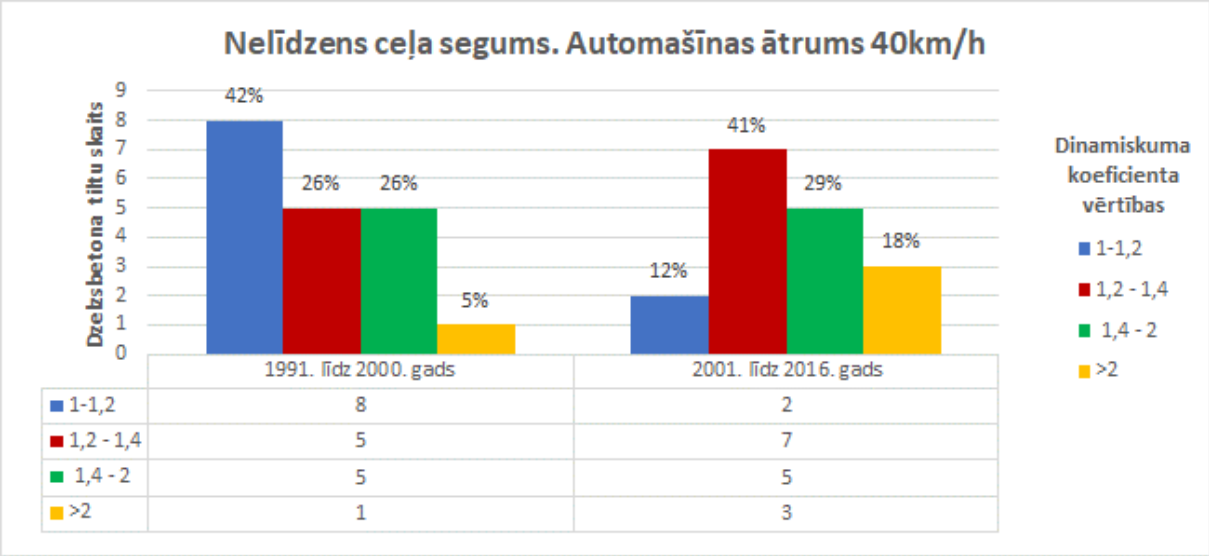
Normālā sadalījuma līknes redzamas 3.6. attēlā. Vidējā dinamiskā koeficienta vērtība tiltiem ar līdzenu segumu, kas būvēti līdz 2000. gadam ir 1,15, savukārt pēc 2000. gada vidējā dinamiskā koeficienta vērtība ir 1,10. Tātad vidēji šī vērtība nepārsniedz aprēķinos pieļaujamās vērtības.





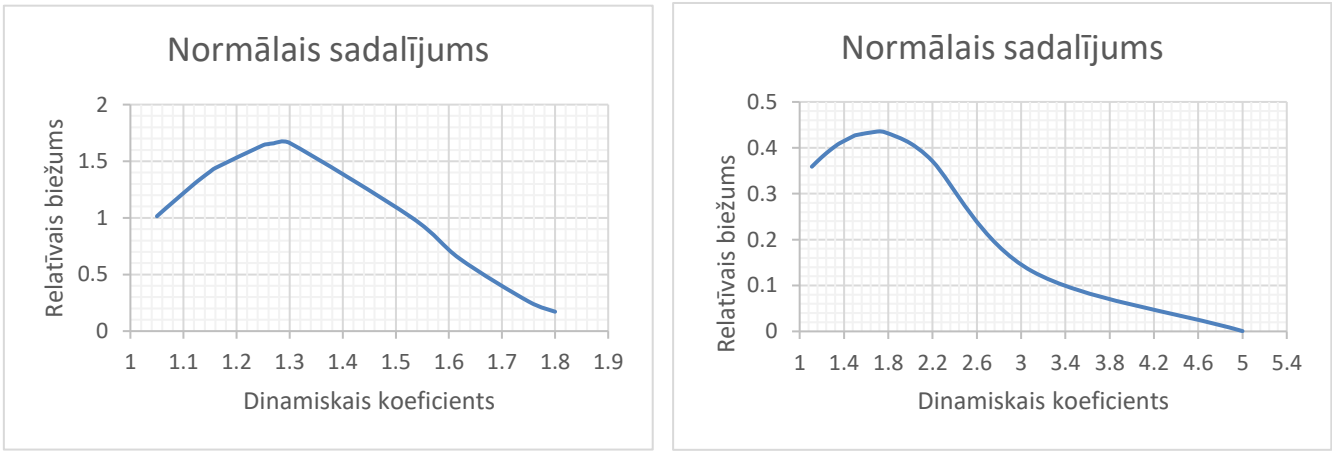
3.6.att. Dinamiskā koeficienta normālais sadalījums dzelzsbetona un spriegbetona tiltiem ar līdzenu segumu. Automašīnas ātrums 40 km/h. Pa kreisi – no 1991. līdz 2000. gadam. Pa labi – no 2001. līdz 2016. gadam.

Dzelzsbetona un spriegbetona tiltu dinamiskā koeficienta histogramma tiltiem ar nelīdzenu segumu un automašīnas ātrumu 40 km/h parādīta 3.7. attēlā. Redzams, ka dinamiskā koeficienta vērtības pieaugušas attiecīgi par par 5 % un 30 % – 1 un 1,4, savukārt tiltiem, kas būvēti no 2001. līdz 2016. gadam, vērtība izmainījusies no 1,4 līdz 2,0, t. i., pieaugusi par 29 %. Tas liecina, ka atbilstoši Eirokodeksiem konstrukcijas tiek projektētas slaidākas, līdz ar to dinamiskās slodzes konstrukciju ietekmē daudz vairāk.



3.7. att. Dinamiskā koeficienta diagramma dzelzsbetona un spriegbetona tiltiem ar nelīdzenu segumu. Automašīnas ātrums 40 km/h.

Normālā sadalījuma līknes dzelzsbetona un spriegbetona tiltiem nelīdzenam segumam redzamas 3.8. attēlā.



3.8. att. Dinamiskā koeficienta normālais sadalījums dzelzsbetona un spriegbetona tiltiem ar nelīdzenu segumu. Automašīnas ātrums 40 km/h. Pa kreisi – no 1991. līdz 2000. gadam. Pa labi – no 2001. līdz 2016. gadam.

Vidējā dinamiskā koeficienta vērtība tiltiem ar nelīdzenu segumu, kas būvēti līdz 2000. gadam, ir 1,29, savukārt tiltiem, kas būvēti pēc 2000. gada, vidējā dinamiskā koeficienta vērtība ir 1,68, kas stipri pārsniedz Eirokodeksa slodzes aprēķinā iekļauto vērtību 1,4. Tas liecina arī par to, ka pēc Eirokodeksa projektētās konstrukcijas ir slaidākas, tātad – daudz vairāk pakļautas dinamiskai slodzei, īpaši, ja ir nelīdzens ceļa segums.

Kopumā iegūtie rezultāti parāda, ka tiltiem, kas būvēti no 2000. gada līdz 2016. gadam, 97 % gadījumu pie līdzena brauktuves seguma apstākļiem dinamiskā koeficienta skaitliskās vērtības ir

starp 1,0 un 1,4, tātad tās ir zemākas vai atbilst Eirokodeksā pieņemtajam. Tomēr 63 % gadījumu dinamiskā koeficienta vērtības nelīdzenam ceļa segumam ir tuvu Eirokodeksā pieņemtajai vērtībai, savukārt 38 % gadījumu tās pārsniedz Eirokodeksā pieņemto vērtību – 1,4. Tātad var konstatēt, ka Eirokodeksā pieņemtās dinamiskā koeficienta vērtības ir konservatīvas. Konservatīva dinamiskā koeficienta iekļaušana aprēķinos, no vienas puses, nodrošina papildu drošību, kā arī iespējamu tilta nestspējas samazināšanos bojājumu gadījumā. No otras puses, ja šīs vērtības lieto vecāku tiltu nestspējas analīzei, tad tas var dot nereāli augstus slodzes efektus, kas var radīt nepamatoti lielas prasības tilta nestspējai un attiecīgi nepamatoti augstas rekonstrukcijas izmaksas.

Dinamiskā koeficienta skaitliskās vērtības tiltiem ar līdzenu brauktuves segumu, kas būvēti līdz 2000. gadam, , 88 % gadījumu nepārsniedz 1,4. Nelīdzenas brauktuves segas gadījumā 71 % gadījumu dinamiskā koeficienta skaitliskā vērtība nepārsniedz 1,4.

Iegūtie dati liecina par būtisku brauktuves seguma līdzenuma ietekmi uz dinamisko koeficientu. Tiltiem, kas būvēti pēc 2000. gada, dinamiskā koeficienta skaitliskās vērtības > 2,0 nelīdzena brauktuves seguma gadījumā ir fiksētas par 9 % biežāk nekā tiltiem, kas būvēti līdz 2000. gadam.

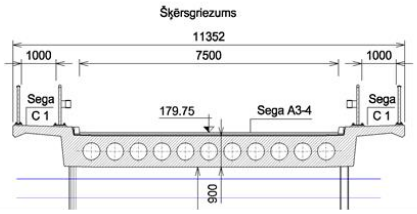
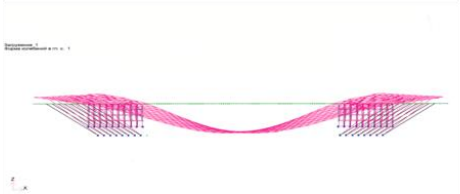
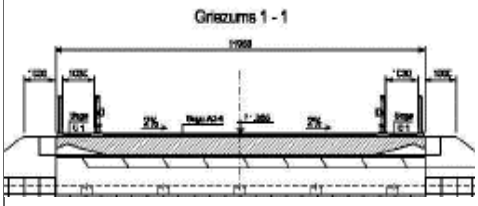
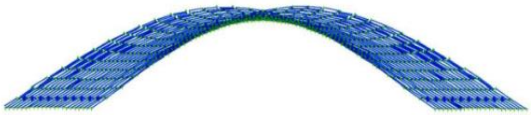
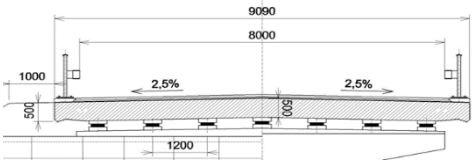
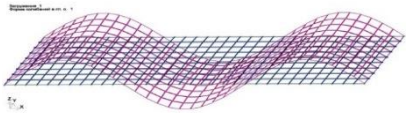
3.1.2. Dzelzsbetona plātņu tilti

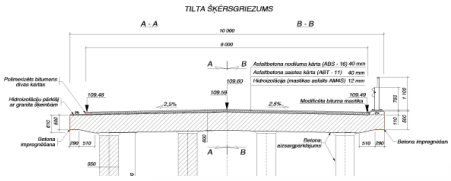
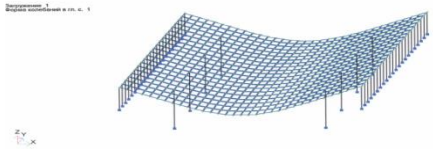
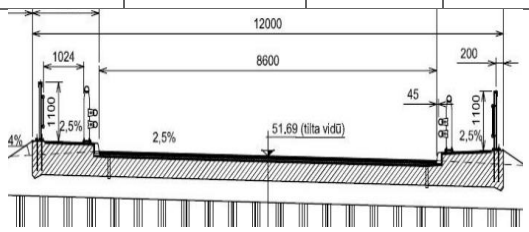
Dzelzsbetona plātņu tiltu raksturojums

Šajā pētījumā tiek analizēti piecu dzelzsbetona plātņu rāmja sistēmas tiltu dati, kas projektēti pēc 2000. gada saskaņā ar Eirokodeksu prasībām. Pētījumā apskatīto dzelzsbetona plātņu tiltu laidumu garumi ir robežās no 7 līdz 31 m. Visiem tiltiem ir nepārtraukta laidumu sistēma. Tiltu aprēķini veikti, izmantojot datorprogrammu *LIRA*, kas izmanto GEM. GEM modelis veidots kā plātņu-stieņu trīsdimensionāla sistēma. Aprēķini veikti tiltiem ar betona klasi *C40/50*. Apskatīto plātņu tiltu parametri doti 3.1. tabulā, dinamiskie raksturlielumi – 3.2. tabulā.

3.1.tabula

Dzelzsbetona plātņu tiltu parametri un pirmās svārstību formas diagramma

Nosaukums	**Tilta sistēma: vienkārši balstīts (VB) / rāmis (R)**	**Pārtraukta (P) vai nepārtraukta (N) sistēma**	**Laiduma garums; m**	**Novietojums pret garenasi**	**Tilta garums**	**Laidumu skaits**	**Tilta platums; m**
Tilts pār Gauju uz AC V235	 						
Raksturojumi	Rāmis	N	31,00	Slīpi	44,90	3	11,35
Tilts pār Seceni uz AC P76 Aizkraukle– Jēkabpils	 						
Raksturojumi	Rāmis	N	12,90	Slīpi	14,00	1	11,95
Tilts pār Lauces upi uz AC P87 Bauska– Aizkraukle	 						
Raksturojumi	VB	N	11,41	Taisni	33,78	3	8,00

Nosaukums	Tilta sistēma: vienkārši balstīts (VB)/rāmis (R)	Pārtraukta (P) vai nepārtraukta (N) sistēma	Laiduma garums; m	Novietojums pret garenasi	Tilta garums	Laidumu skaits	Tilta platums; m
Tilts pār Dzirlas upi uz AC P035 Gulbene–Balvi	 						
Raksturojumi	Rāmis	N	10,00	Taisni	17,00	3	10,00
Tilts pār Līčupi uz AC A3							
Raksturojumi	Rāmis	N	7,23	Taisni	7,23	1	12,00

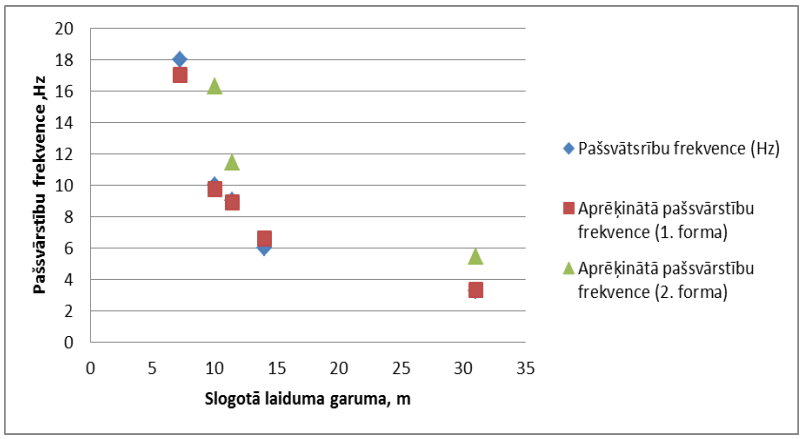
3.2.tabula

Dzelzsbetona plātņu tiltu dinamiskie raksturlielumi

Nosaukums	Lielākais dinamiskais koeficients (nelīdzena brauktuve)	Laiduma konstrukcijas augstums; m	Laiduma garuma / augstuma (L/H) attiecība	Logaritmiskais dekrements	Svārstību rimšanas koeficients	Relatīvā vertikālā deformācija (Laiduma garums / statiskā deformācija)	Pašsvārstību frekvence (pirmā forma; sk/sek (Hz)	Aprēķinātā pirmās formas pašsvārstību frekvence, Hz
Tilts pār Gauju uz AC V235	2,40	0,90	34	0,29	0,046	1/1900	3,25	3.36
Tilts pār Seceni uz AC P76 Aizkraukle–Jēkabpils	2,70	0,55	25	0,15	0,023	1/1500	6	6.6
Tilts pār Lauces upi uz AC P87 Bauska–Aizkraukle	2,00	0,50	23	0,29	0,046	1/2030	9	8.88
Tilts pār Dzirlas upi uz AC P035 Gulbene–Balvi	2,04	0,61	16	0,46	0,073	1/3200	10	9.78
Tilts pār Līčupi uz AC A3	1,30	0,36	20	0,41	0,065	1/3400	18	17

Dzelzsbetona plātņu tiltu dinamisko raksturlielumu izvērtējums

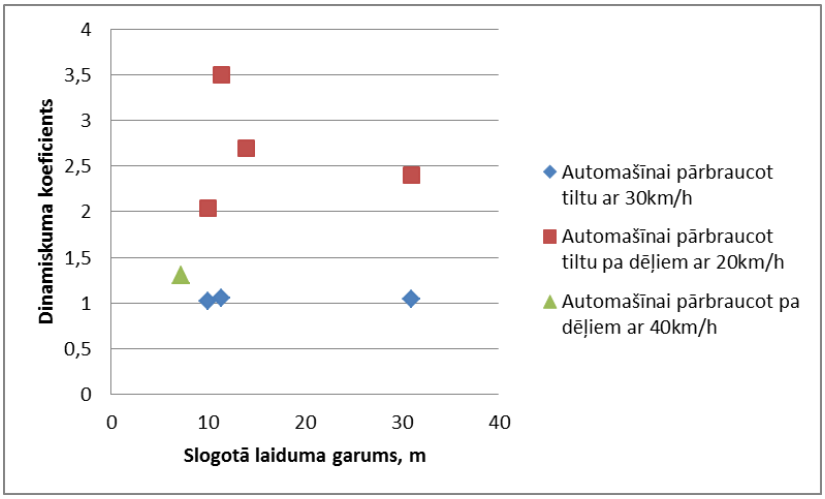
Tiltu dinamiskie raksturlielumi ir atkarīgi no laiduma garuma un citiem parametriem.



3.9. att. Pašsvārstību frekvence atkarībā no laiduma garuma.

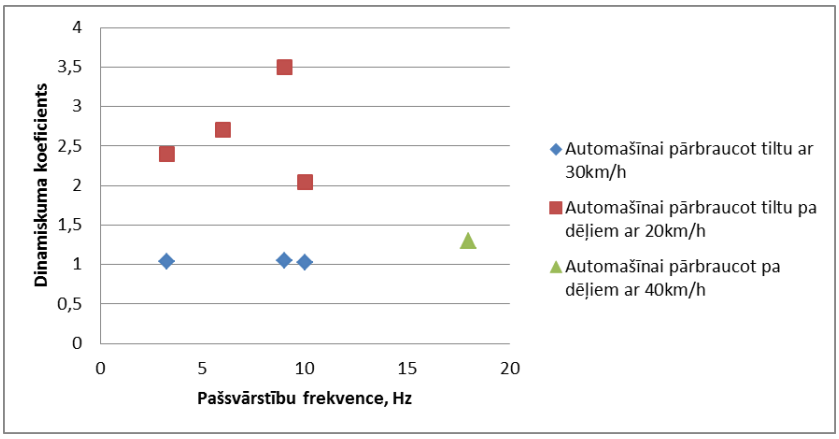
Analizējot pašsvārstību frekvences, ir konstatēts, ka tiltam ar laiduma garumu 7,23 m pašsvārstību frekvence ir 18 Hz, 31 m garam laidumam 3,25 Hz (3.9. att.). Korelācijas koeficients sakarībai starp laiduma garumu un pašsvārstību frekvenci ir -0,76, kas norāda, ka pieaugot laiduma garumam plātņu tiltiem pašsvārstību frekvence samazinās.

Divu tiltu ar laiduma garumiem 31 m un 12,9 m pašsvārstību frekvences pārsniedz pirmās kārtas frekvences, taču ir mazākas par otrās kārtas formas frekvencēm. Korelācijas koeficients sakarībai starp aprēķināto un izmērīto pašsvārstību frekvenci plātņu tiltiem ir 0.999, kas norāda uz aprēķinātās un izmērītās pašsvārstību frekvences korelāciju un ir pamatojams dinamiskā indeksa metodē izmantot aprēķināto pirmās formas pašsvārstību frekvenci.



3.10. att. Dinamiskā koeficients atkarībā no laiduma garuma.

Dinamiskā koeficienta atkarība no slogotā laiduma garuma parādīta 3.10. attēlā. Var redzēt, ka tilta dinamiskais koeficients ir atkarīgs ne tikai no laiduma garuma, bet citiem faktoriem, piemēram, braukšanas ātruma. Nelīdzenas brauktuves seguma gadījumā un ar mazāko braukšanas ātrumu dinamiskais koeficients pieaug 2–3 reizes.



3.11. att. Dinamiskais koeficients atkarībā no pašsvārstību frekvences.

Pieaugot pašsvārstību frekvencei un pārbraucot pār tiltu ar mazāko braukšanas ātrumu, šajā gadījumā 20 km/h, pa nelīdzenu brauktuvi pieaug arī dinamiskais koeficients (3.11. att.). Iegūtie rezultāti liecina, ka nelīdzenai brauktuvei dinamiskais koeficienta vērtības pieaug līdz pat trīs

reizēm (3.10. un 3.11. att.). Izņēmums ir tilts pār Dzirlas upi, kam dinamiskais koeficients pieaug tikai divas reizes, jo laiduma garuma attiecība ir tikai 16. Tas liecina par daudz stingāku konstrukciju.

Kopumā pētījuma rezultāti par plātņu tiltiem rāda, ka pie zemāka braukšanas ātrumam dinamiskais koeficients pieaug, tātad daudz vairāk ietekmē tilta konstrukcijas nolietošanos, tomēr tendence nav tik izteikta, kā tas ir saspriegtas konstrukcijas tiltiem, kas apskatīti 3.1.3. un 3.1.4. apakšnodaļās.

Iegūtie rezultāti rāda, ka dinamiskais koeficienta vērtības dzelzsbetona plātņu tiltiem nav atkarīgas tikai no laiduma garuma, bet arī no citiem faktoriem, piemēram, svarīgs faktors ir arī autoceļa segas līdzenums. Ja uz autoceļa segas ir ledus un sniega sanesumi vai bedres, tad smagās automašīnas, kas brauc pa tiltu ar nelielu braukšanas ātrumu, radīs dinamisko slodzi, kas var būt pat trīs reizes lielāka nekā statiskā slodze, un tas savukārt ļoti paātrina tilta laiduma konstrukciju nolietošanos.

Rezultāti rāda, ka tilta pašsvārstību frekvencei ir tendence samazināties, palielinoties laiduma garumam. Dinamiskais koeficients pie augstākām frekvencēm, sākot ar 9 Hz, korelē ar pašsvārstību frekvenci– lielākas pašsvārstību frekvences rada zemākas dinamiskā koeficienta vērtības. Korelācijas koeficients sasniedz -0,82.

Kopumā dinamiskā koeficienta vērtības līdzenam segumam dzelzsbetona plātņu tiltiem ir diapazonā no 1,0 līdz 1,4 un nepārsniedz Eirokodeksā ievērtēto vērtību. Tātad šīs vērtības ir pieļaujamas līdzenam ceļa segumam.

3.3.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

Tilta dinamiskās veiktspējas un stingumu raksturojošo parametru diapazoni redzami 3.3. tabulā. Datu diapazons noteikts ņemot vērā visus pētījumā iekļautos tiltus.

Vērtību diapazona daļa, kas norāda uz lielāku dinamisko veiktspēju tika noteikta salīdzinot pētījumā iekļautos tiltu parametrus 3.2. tabulā. Diapazona vērtības tika ņemtas no tiltiem, kuriem dinamiskuma koeficients pie nelīdzena seguma ir virs 2, šajā gadījumā dinamiskuma koeficienta vērtības ir no 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 koeficients un pirmās formas pašsvārstību frekvences vērtību, norāda uz lielāku konstrukcijas dinamisko veiktspēju.

Rezultāti, kas apkopoti 3.3. tabulā, tālāk tiek izmantoti dinamiskuma indeksa aprēķina metodē, kas aprakstīta 3.2. apakšnodaļā.

3.1.3. Spriegbetona siju tilti (rekonstrukcijas)

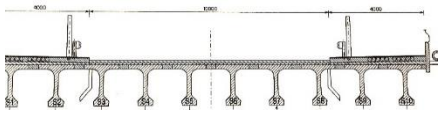
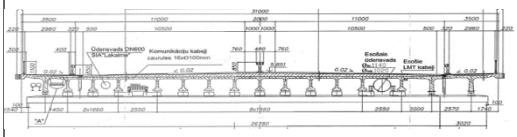
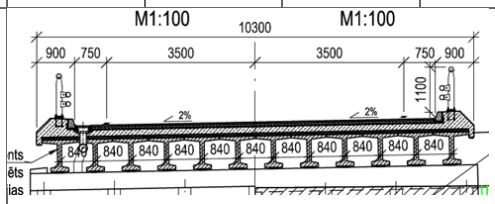
Spriegbetona siju tiltu raksturojums

Latvijā 14 % no visu tiltu skaita ir spriegbetona siju tilti. Šāda tipa tilti tika būvēti, sākot no 20. gadsimta 60. gadiem, jo sijas bija vienkārši izgatavojamas, pārvadājamas un saliekamas būvlaukumā. Galvenokārt tika būvētas saliekamas sistēmas divbalstu sijas. Šajā pētījumā apskatīti trīs spriegbetona siju tilti.

Pētījumā analizēto siju tiltu parametri norādīti 3.4. tabulā, dinamiskie raksturlielumi – 3.5. tabulā.

3.4.tabula

Vienkārši balstītu spriegbetona siju tiltu parametri

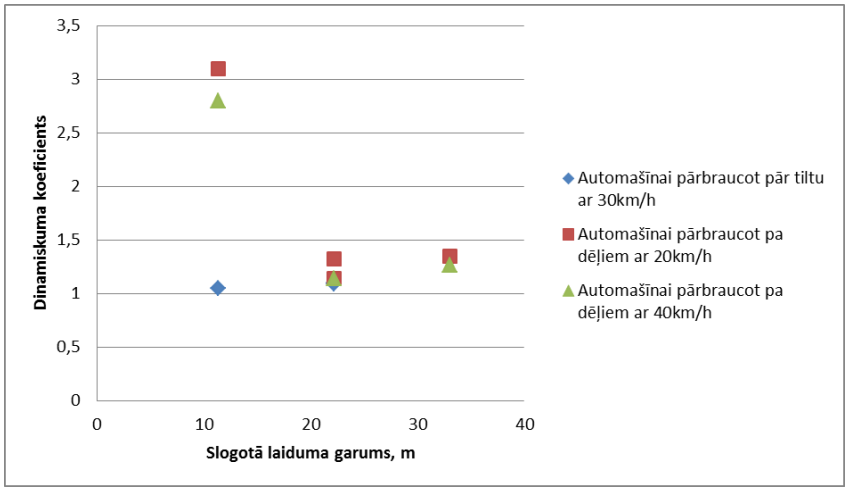
Nosaukums	Tilta sistēma: vienkārši balstīts (VB)/ rāmis (R)	Pārtraukta (P) vai nepārtraukta (N) sistēma	Laiduma garums; m	Tilta garums	Laidumu skaits	Tilta platums; m	Auto slodze (t) / laiduma garums (m)
Tilts pār Buļļupi Rīgā (spriegotie kūļi)							
Raksturojumi	VB	P	33,00	185,8	5	18,00	0,73
Tilts pār Juglas upi uz Brīvības ielas (spriegotie kūļi)							
Raksturojumi	VB	P	22,16	52,64	2	31,00	0,93
Tilts pār Iecavu (stīgbetona sijas)							
Raksturojumi	VB	P	11,36	34,20	3	8,50	3,14

3.5.tabula Spriegbetona siju tiltu dinamiskie raksturlielumi

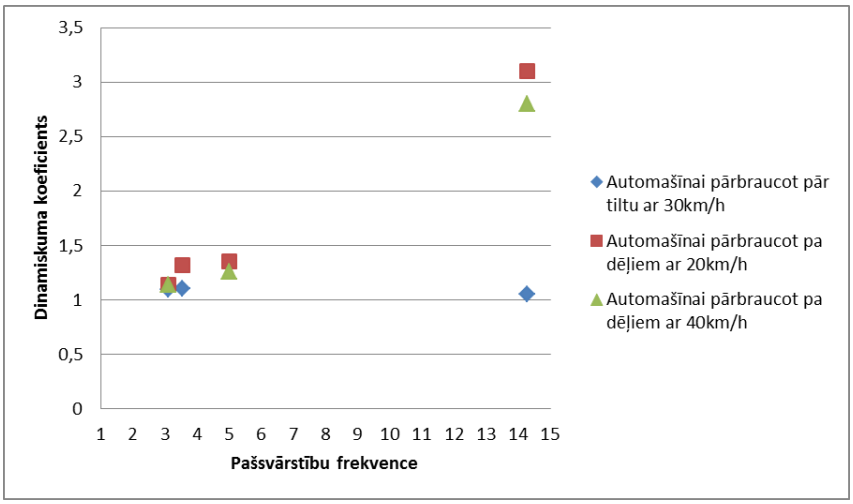
Nosaukums	Lielākais dinamiskais koeficients	Laiduma konstrukcijas augstums h; m	Laiduma garuma / Augstuma (L/H) attiecība	Logaritmiskais dekrements	Svārstību rimšanas koeficients	Relatīvā vertikālā deformācija (Laiduma garums/ statiskā deformācija)	Pašsvārstību frekvence (pirmā forma); sk/sek (Hz)	Aprēķinātā pirmās formas pašsvārstību frekvence (Hz)
Tilts pār Buļļupi Rīgā	1,35	1,80	18	0,12	0,02	1/2010	5,0	Nav datu
Tilts pār Juglas upi uz Brīvības ielas	1,32	1,20	18	0,07	0,01	1/1700	3,5	3,53
Tilts pār Iecavu	3,10	0,60	19	0,285	0,05	1/3070	14,3	14,28

Spriegbetona siju tiltu dinamisko raksturlielumu izvērtējums

Korelācija starp dinamiskā koeficienta vērtībām un laiduma garumu (līdzenam un nelīdzenam tilta brauktuves segumam) redzama 3.12. attēlā. Spriegbetona siju tiltiem ar nelīdzenu brauktuvi dinamiskais koeficients palielinās pat trīs reizes. Līdzenam segumam dinamiskais koeficients visiem tiltiem ir zemāks par 1,4, kas ir Eirokodeksā *LVS EN 1991-2* noteiktā vērtība.



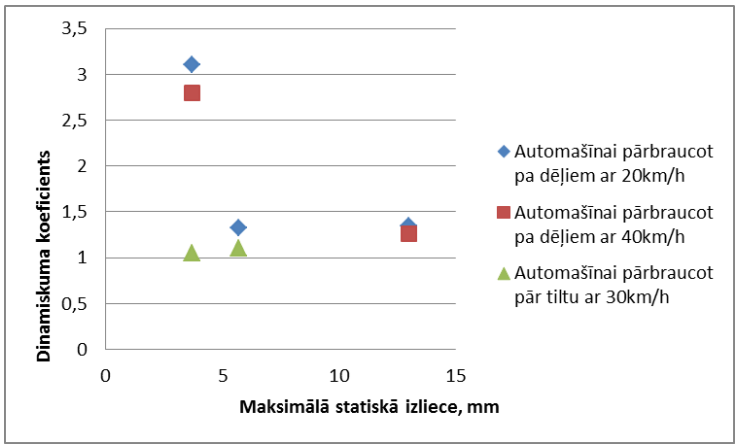
3.12. att. Dinamiskā koeficienta vērtības atkarībā no slogotā laiduma garuma.



3.13. att. Dinamiskā koeficienta vērtības atkarībā no pašsvārstību frekvences.

Iegūtie rezultāti (3.13. att.) rāda, ka tiltam ar laiduma garumu 11,36 m ir lielākā pašsvārstību frekvence, kas dod arī augstāku dinamisko koeficientu, kas šajā gadījumā pie nelīdzena brauktuves klātnes seguma ir 3,10. Tiltiem ar laiduma garumiem 22,16–33,00 m pašsvārstību frekvence ir robežās no 3,5 līdz 6 Hz, dinamiskais koeficients pie nelīdzena brauktuves seguma ir robežās no 1,32 līdz 1,35, kas ir mazāks par 1,4 (Eirokodeksā *LVS EN 1991-2* noteiktā vērtība).

Dinamiskā koeficienta korelācija ar pašsvārstību frekvenci redzama 3.13. attēlā.



3.14. att. Dinamiskā koeficienta vērtība atkarībā no maksimālās statiskās vertikālās deformācijas.

Dinamiskā koeficienta korelācija ar maksimālo statisko deformāciju redzama 3.14. attēlā. Redzams, ka, samazinoties statiskajai vertikālajai deformācijai, dinamiskais koeficients samazinās - korelācijas koeficients sakarībai ir -0,66. Šāda sakarība norāda, ka neliela vertikālā deformācija liecina par stingu tilta konstrukciju.

Spriegbetona siju tiltu dinamiskās veiktspējas un stingumu raksturojošo parametru diapazoni redzami 3.6. tabulā. Datu diapazons noteikts ņemot vērā visus pētījumā iekļautos tiltus.

Vērtību diapazona daļa, kas norāda uz lielāku dinamisko veiktspēju tika noteikta salīdzinot pētījumā iekļautos tiltu parametrus 3.5. tabulā. Diapazona vērtības tika ņemtas no tiltiem, kuriem dinamiskuma koeficients pie nelīdzena seguma ir virs 2, šajā gadījumā dinamiskuma koeficienta vērtības 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 norāda uz paaugstinātu dinamisko veiktspēju.

3.6.tabula

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

Iegūtie rezultāti parāda, ka seguma līdzenums un automašīnas ātrums ietekmē dinamiskā koeficients vērtības. Pētījuma rezultāti parāda, ka siju tiltu dinamiskais koeficients nelīdzenai brauktuvei var pieaugt pat trīs reizes. Tipveida projektos spriegbetona siju tiltiem laiduma garuma / augstuma attiecība ir fiksēta, tāpēc tas nav kritērijs tilta dinamiskās veiktspējas pieaugumam. Lielāka pašsvārstību frekvence norāda uz lielāku konstrukcijas dinamisko veiktspēju, ko norāda korelācijas koeficients 0,99 starp pašsvārstību frekvenci un dinamisko koeficientu nelīdzenam ceļa segumam. Līdzeniem seguma apstākļiem dinamiskais koeficients ir mazāks par 1,4.

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.

3.1.4. Uz vietas betonēti spriegbetona tilti

Monolīta spriegbetona tilti pēdējos 10 gados bieži tiek izmantoti ceļu pārvadu konstrukcijās autoceļu krustojumos, kur laiduma konstrukcijas augstums un zemtilta gabarīts ir ierobežots autoceļa uzbēruma augstuma dēļ. Ņemot vērā tehnoloģiju attīstību, šis tiltu veids ir kļuvis daudz ekonomiskāks, vienkārši un ātri uzbūvējams [97].

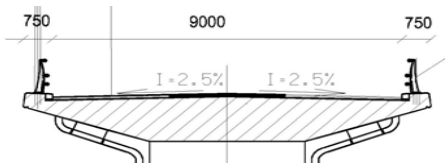
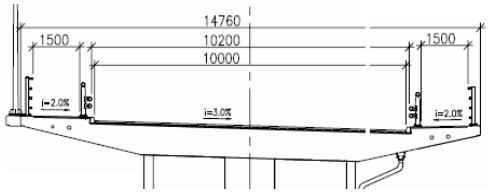
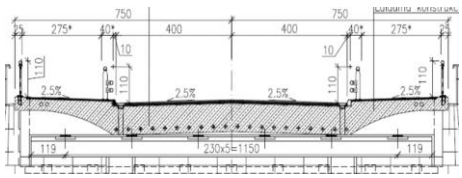
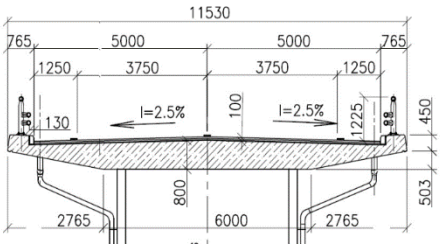
Pētījumā analizēti astoņu spriegbetona plātņu tiltu pārbaudes ar dinamisku slodzi rezultāti. Pārbaudes veiktas no 2008. līdz 2015. gadam.

Spriegbetona plātņu tiltu raksturojums

Spriegbetona plātņu tilti ir ļoti populāra konstrukcija dažādiem ceļu pārvadiem, jo ir iespējams veidot ļoti slaidas konstrukcijas. Tomēr šādas slaidas konstrukcijas ir daudz dinamiskākas nekā jebkura sija vai dzelzsbetona plātne. Pētījumā analizēto spriegbetona plātņu tiltu parametri norādīti 3.7. tabulā, dinamiskie raksturlielumi – 3.8. tabulā.

3.7.tabula

Spriegbetona plātņu tiltu parametri

Nosaukums	**Tilta sistēma: vienkārši balstīts/ rāmis**	**Pārtraukta (P) vai nepārtrau-kta (N) sistēma**	**Lai-duma ga-rums; m**	**Brauktuve uz konsoles Jā/Nē**	**Tilta ga-rums**	**Laidumu skaits**	**Tilta platums; m**
Tilts uz AC A12 pār dzelzceļu Rīga–Rēzekne							
Raksturojumi	Vienkārši balstīts	N	34,00	Jā	85,00	3	10,50
Ceļa pārvads pār dzelzceļu Rīga–Krustpils km 95,214							
Raksturojumi	Rāmis	N	22,50	Jā	58,50	3	13,00
Tilts pār Pedeles upi Valkā							
Raksturojumi	Rāmis	N	19,00	Nē	19,00	1	15,00
Tilts pār Dzelzceļu Jelgava – Tukums uz AC A9 Rīga-Liepāja							
Raksturojumi	Rāmis	N	18,00	Jā	46,00	3	11,53

3.8.tabula

Spriegbetona plātņu tiltu dinamiskie raksturlielumi

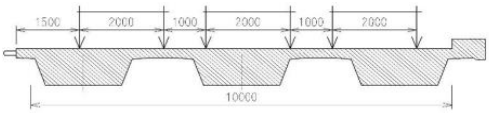
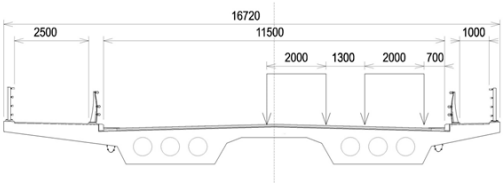
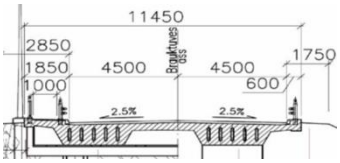
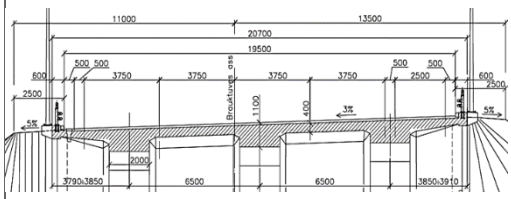
Nosaukums	**Lielākais dinamiskais koeficients**	**Laiduma konstrukcijas augstums; m**	**Laiduma garuma / augstuma (*L/H*) attiecība**	**Svārstību rimšanas koeficients**	**Relatīvā vertikālā deformācija (laiduma garums / statiskā deformācija)**	**Pašsvārstību frekvence (pirmā forma; sk/sek (Hz)**	**Aprēķinātā pirmās formas pašsvārstību frekvence (Hz)**
Tilts uz AC A12 pār dzelzceļu Rīga–Rēzekne	1,5	1,41	24	0,02	1/1900	2,45	3,0
Ceļa pārvads pār dzelzceļu Rīga–Krustpils km 95,214	3,5	0,90	25	0,03	1/2500	4,3	5
Tilts pār Pedeles upi Valkā	2,1	0,85	22	0,04	1/2090	4,5	4,47
Tilts pār Dzelzceļu Jelgava–Tukums uz AC A9 Rīga–Liepāja	1,9	0,70	26	0,03	1/2020	5,23	5,5

Spriegbetona ribotu plātņu tiltu raksturojums

Spriegbetona ribotu plātņu tiltiem ir līdzīga konstrukcija kā spriegbetona plātņu tiltam, tikai, lai samazinātu pašsvaru, zem relatīvi plānas klāja plātnes tiek veidotas platas ribas. Pētījumā analizētie spriegbetona ribotu plātņu tiltu parametri norādīti 3.9. tabulā, dinamiskie raksturlielumi – 3.10. tabulā.

3.9.tabula

Spriegbetona ribotu plātņu tiltu parametri

Nosaukums	Tilta sistēma: vienkārši balstīts (VB) / rāmis (R)	Pārtraukta (P) vai nepārtraukta (N) sistēma	Laidума garums; m	Brauktuve uz konsoles J/N	Tilta garums	Laidumu skaits	Tilta platums; m	Tilta novietojums pret garenasi
Ceļa pārvads uz AC A6 Rīga–Baltkrievijas robeža								
Raksturojums	Rāmis	N	19,50	Nē	63,00	4	11,30	Taisns
Tilts pār Dīvājas upi uz AC A6								
Raksturojums	VB	N	25,50	Nē	57,40	3	15,00	Slīps
Ceļa pārvads uz AC P8 pār AC E22 (R = 6000 m)								
Raksturojums	Rāmis	N	27,40	Nē	88,80	4	11,45	Taisns
Ceļa pārvads uz AC E22 pār AC V920								
Raksturojums	Rāmis	N	30,00	Jā	30,00	1	19,50	Taisns

3.10. tabula

Spriegbetona ribotu plātņu tiltu dinamiskie raksturlielumi

Nosaukums	Lielākais dinamiskais koeficients	Laiduma konstrukcijas augstums; m	Laiduma garuma / augstuma (*L/H*) attiecība	Auto slodze (t)/ laiduma garums (m)	Svārstību rimšanas koeficients	Relatīvā vertikālā deformācija (laiduma garums / statiskā deformācija)	Pašsvārstību frekvence (pirmā forma; sk/sek (Hz)	Aprēķinātā pirmās formas pašsvārstību frekvence (Hz)
Ceļa pārvads uz AC A6 Rīga– Baltkrievijas robeža	1,7	1,00	20	1,59	0,02	1/2500	5,6	6,0
Tilts pār upi Dīvaja uz AC A6	2,0	1,35	19	1,51	0,03	1/4550	5,68	7,3
Ceļa pārvads uz AC P8 pār AC E22 (R = 6000 m)	5,6	1,10	25	1,01	0,06	1/3470	3,9	4,0
Ceļa pārvads uz AC E22 pār AC V920	4,1	1,10	27	0,93	0,06	1/5080	4,8	4,9

Spriegbetona tiltu ģeometrisko un dinamisko parametru salīdzinājums

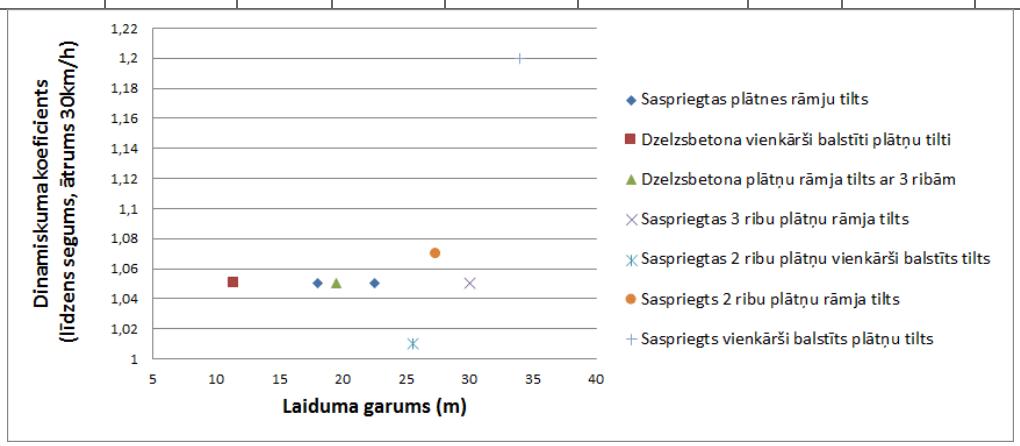
Salīdzinājums veikts septiņiem dzelzsbetona un spriegbetona tiltiem, kuru ģeometriskie un dinamiskie parametri tika izvērtēti atkarībā no tilta laiduma garuma, laiduma garuma / augstuma attiecības un pašsvārstību frekvences. Pētījumā analizēto tiltu dimensijas, pašsvārstību frekvences un dinamiskā koeficienta vērtības norādītas 3.11. tabulā.

Pētījumā tika salīdzināti dinamiskie koeficienti pie attiecīgā laiduma garuma un laiduma garuma / augstuma attiecības. Tāds pats salīdzinājums tika veikts pašsvārstību frekvencei un rimšanas koeficientam. Tika analizēts arī tas, vai pastāv korelācija starp dinamisko koeficientu līdzenai un nelīdzenai brauktuvei atkarībā no laiduma garuma un laiduma garuma / augstuma attiecības. Rezultāti apkopoti diagrammās 3.15. –3.22. attēlā.

3.11. tabula

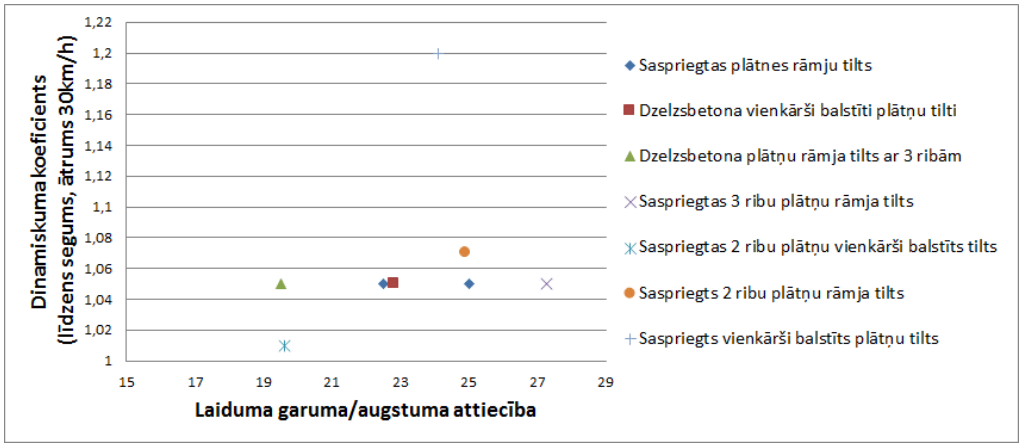
Tiltu dimensijas, pašsvārstību frekvences un dinamiskā koeficienta vērtības

Tilta nosaukums	Slogotā laiduma garums (m)	Tilta platums (m)	Laiduma konstrukcijas augstums (m)	Laiduma garuma/ augstuma attiecība	Laiduma konstrukcijas veids	Ribu skaits	Aprēķinātā pirmās pašsvārstību frekvences forma, Hz	Izmērītā pašsvārstību frekvence, Hz	Lielākais dinamiskais koeficients
Tilts pār Lauces upi	11,41	8	0,5	23	Vienkārši balstīta dzelzsbetona plātne	1	8,88	9	2
Tilts uz AC A12	34	10,5	1,4	24	Vienkārši balstīta spriegbetona plātne	1	2,45	3	1,5
Tilts pār dzelzceļu Jelgava–Tukums	18	11,53	0,8	23	Spriegbetona plātne, rāmis	1	5,23	5,5	1,9
Ceļa pārvads pār dzelzceļu Rīga–Krustpils	22,5	13	0,9	25	Spriegbetona plātne, rāmis	1	4,3	5	3,5
Tilts pār Dīvajas upi	25,5	15	1,3	20	Vienkārši balstīta spriegbetona ribota plātne	2	5,68	7,3	2
Ceļa pārvads uz AC A6	19,5	11,3	1,0	20	Dzelzsbetona ribota plātne, rāmis	3	5,56	6	2
Ceļa pārvads uz AC P8	27,4	11,45	1,1	25	Spriegbetona ribota plātne, rāmis	2	3,93	4	1,3
Ceļa pārvads uz AC E22	30	19,5	1,1	27	Spriegbetona ribota plātne, rāmis	3	4,8	4,9	5



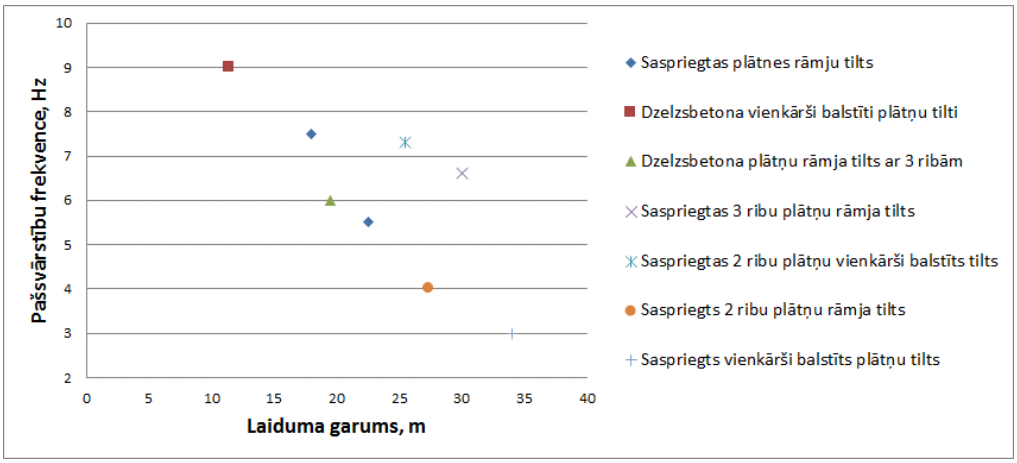
3.15. att. Korelācija starp dinamiskais koeficientu (līdzenam segumam) un laiduma garumu.

Korelācija starp dinamisko koeficientu līdzenam tilta segumam un laiduma garumu redzama 3.15. attēlā. Līdzena seguma gadījumā lielāko dinamisko koeficientu uzrāda saspriegtas konstrukcijas plātņu tilts. Augsts dinamiskais koeficients var tikt izskaidrots ar platām konsolēm abās plātnes šķērsgriezuma pusēs. Līdzenam segumam dinamiskais koeficients ir zem 1,4, kas ir ir LVS EN 1991-2 pieļaujamā vērtība.



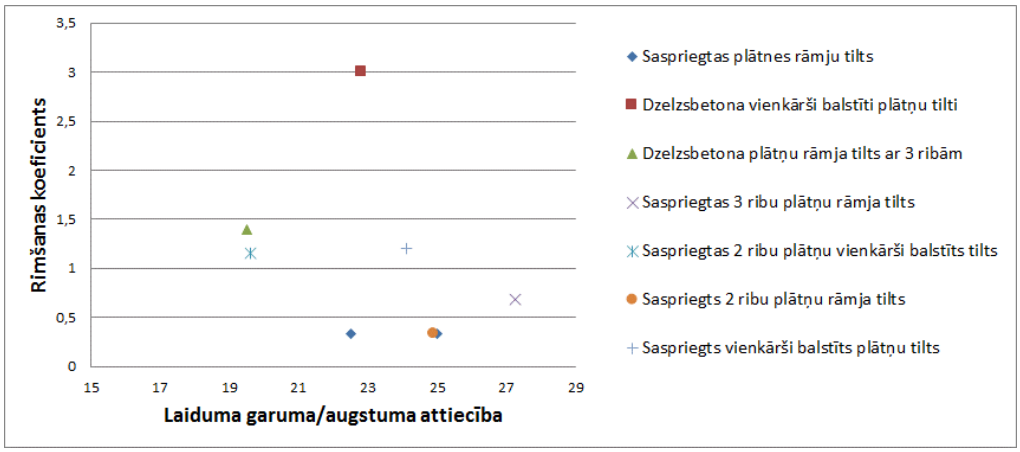
3.16. att. Korelācija starp dinamisko koeficientu (līdzenam segumam) un laiduma garuma / augstuma attiecību.

Dinamiskā koeficienta korelācija ar laiduma garuma / augstuma attiecību redzama 3.16. attēlā. Pie līdzena ceļa seguma laiduma garuma / augstuma attiecība neietekmē dinamisko koeficientu. Lielākā dinamiskā koeficienta vērtība ir saspriegtas konstrukcijas divu ribu plātņu tiltam ar rāmja konstrukciju.



3.17. att. Korelācija starp pašsvārstību frekvenci un laiduma garumu.

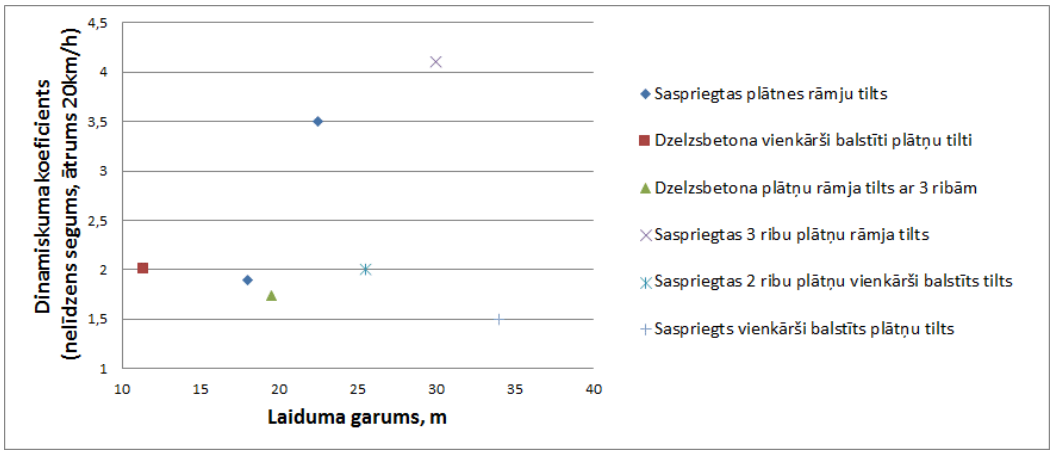
Korelācija starp pašsvārstību frekvenci un laiduma garumu redzama 3.17. attēlā. Spriegbetona tiltiem pašsvārstību frekvence samazinās, palielinoties laiduma garumam. Uz to norāda arī korelācijas koeficients 0,99. Tas konstatēts visu veidu spriegbetona tiltiem.



3.18. att. Korelācija starp svārstību rimšanas koeficientu un laiduma garuma/augstuma attiecību.

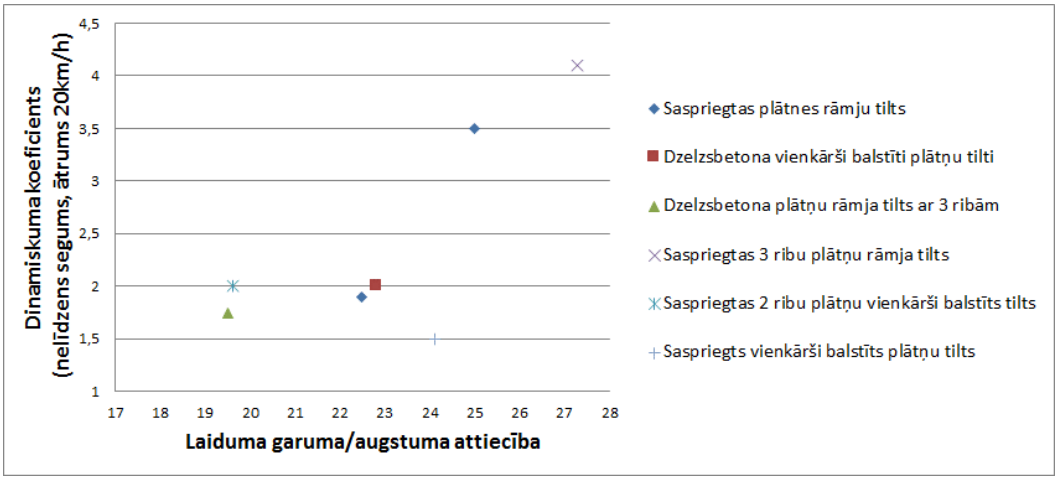
3.18. attēlā redzamā diagramma liecina, ka svārstību rimšanas koeficients ir daudz augstāks vienkārši balstītiem plātņu tiltiem. Savukārt ribotiem saspriegtas konstrukcijas tiltiem laiduma garuma / augstuma attiecība korelē ar rimšanas koeficientu – laiduma garuma / augstuma attiecības pieaugums parāda svārstību rimšanas koeficienta samazinājumu. Uz to norāda arī korelācijas koeficients 0,93.

Iepriekšējie Latvijas tiltu dinamisko īpašību pētījumi [98] rāda, ka lielākas dinamisko koeficientu vērtības fiksētas tiltiem ar nelīdzenu ceļa segumu gadījumos, ja automašīnas tos šķērso ar mazāku ātrumu. Šāds secinājums tika apstiprināts arī spriegbetona tiltiem.



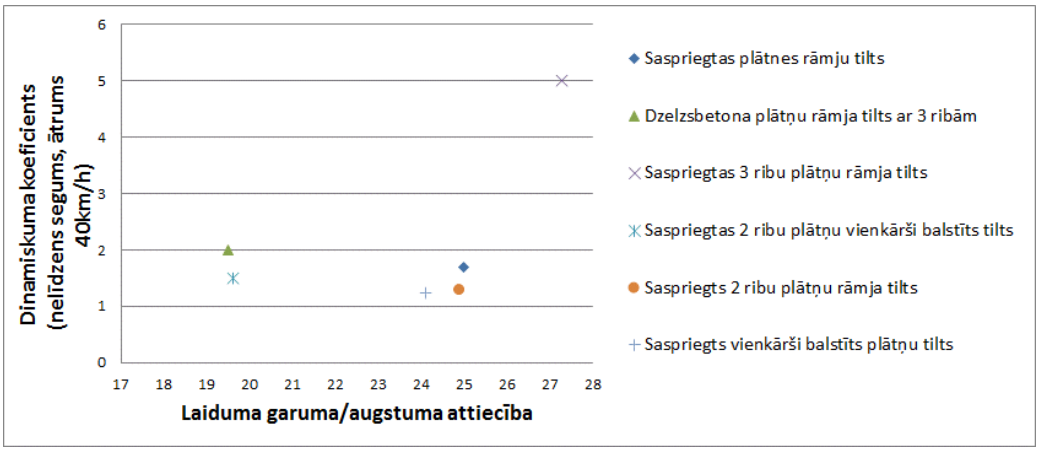
3.19. att. Korelācija starp dinamisko koeficientu (nelīdzens segums, braukšanas ātrums 20 km/h) un laiduma garumu.

3.19. attēlā redzamā diagramma parāda dinamiskā koeficienta vērtības, kas fiksētas, automašīnai braucot pa nelīdzenu segumu ar zemu braukšanas ātrumu – 20 km/h. Diviem tiltiem dinamiskais koeficients pārsniedz vērtību 2, kas liecina par ļoti augstu dinamisko veiktspēju.



3.20. att. Dinamiskā koeficienta korelācija ar laiduma garuma/augstuma attiecību.

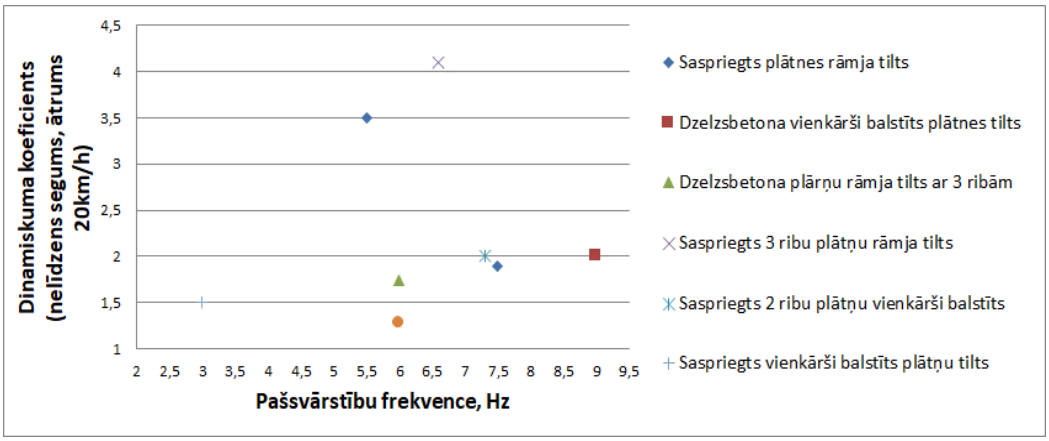
3.20. attēlā redzamā diagramma parāda dinamisko koeficientu atkarībā no laiduma garuma / augstuma attiecības, automašīnai pārbraucot pa nelīdzenu segumu. Saspriegtas konstrukcijas rāmju tiltiem ar laiduma garuma / augstuma attiecību virs 25 dinamiskais koeficients pārsniedz vērtību 2.



3.21. att. Korelācija starp dinamiskā koeficienta vērtībām (nelīdzens segums, braukšanas ātrums 40 km/h) un laiduma garuma / augstuma attiecību.

3.21. attēlā redzamā diagramma parāda korelāciju starp dinamisko koeficientu un laiduma garuma / augstuma attiecību, kas noteikta nelīdzenam ceļa segumam pie braukšanas ātruma 40 km/h. Rezultāti rāda, ka saspriegtas konstrukcijas tiltiem dinamiskais koeficients ir zemāks nekā 2, lielākajā daļā gadījumu – zem 1,4, tomēr saspriegtas konstrukcijas trīs ribu rāmja

konstrukcijas plātnes tilts parāda dinamiskā koeficienta pieaugumu pie lielākiem braukšanas ātrumiem.



3.22. att. Korelācija starp dinamisko koeficientu (nelīdzens segums, braukšanas ātrums 20 km/h) un pašsvārstību frekvenci.

3.22. attēlā redzamā diagramma parāda saspriegtas konstrukcijas rāmja tiltu dinamisko koeficientu atkarībā no pašsvārstību frekvences nelīdzenam ceļa segumam.

Iegūtie rezultāti liecina, ka dinamiskā koeficienta vērtības dzelzsbetona plātņu tiltiem ir atkarīgas ne tikai no laiduma garuma, bet arī no citiem faktoriem. Ja uz autoceļa segas ir ledus un sniega sanesumi vai bedres, tad smagās automašīnas, kas brauc pa tiltu ar nelielu braukšanas ātrumu, radīs dinamiskās slodzes pieaugumu, kas var būt pat trīs reizes lielāks nekā statiskā slodze, un tas savukārt ļoti paātrina tilta laiduma konstrukciju nolietošanos.

Brauktuves seguma līdzenums un automašīnas ātrums ietekmē tilta dinamiskās īpašībām, un rezultāti parāda, ka dinamiskais koeficients pie ātruma 20 km/h var pieaugt līdz vērtībai 2. Saspriegtas konstrukcijas tiltiem laiduma garuma / augstuma attiecība korelē ar svārstību rimšanas koeficientu – augstāka laiduma garuma / augstuma attiecība rada svārstību rimšanas koeficienta samazinājumu. Līdzeniem seguma apstākļiem dinamiskais koeficients ir mazāks par 1,4.

Tilta pašsvārstību frekvence nekorelē ar tilta laiduma garumu saspriegta dzelzsbetona konstrukcijas tiltiem, tomēr nesaspriegta dzelzsbetona tiltiem pašsvārstību frekvencei ir tendence samazināties, palielinoties laiduma garumam.

Kopumā dinamiskā koeficienta vērtības līdzenam segumam ir diapazonā no 1,0 līdz 1,4 un nepārsniedz Eirokodeksā ievērtēto vērtību. Tātad šīs vērtības līdzenam ceļa segumam ir pieļaujamas.

Spriegbetona plātņu tiltu stingumu raksturojošo parametru diapazoni

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 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. Spriegbetona plātņu tiltu gadījumā dinamiskuma koeficienta vērtības ir 2,1 – 3,5.

3.12. tabula

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
Pašsvārstību 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	

Spriegbetona plātņu tiltu dinamisko veiktspēju un stingumu raksturojoši parametri apkopoti 3.12. 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 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.

Diapazona vērtības spriegbetona ribotu plātņu tiltu ņemtas no tiltiem, kuriem dinamiskuma koeficients pie nelīdzena seguma ir virs 2. Spriegbetona plātņu tiltu gadījumā dinamiskuma koeficienta vērtības ir no 2,0 – 5,6.

3.13. tabula

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 slīpi 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	

Spriegbetona ribotu plātņu tiltu dinamiskās veiktspējas un stingumu raksturojoši parametri apkopoti 3.13. tabulā. Redzams, ka spriegbetona ribotu plātņu tiltiem laiduma garuma / augstuma attiecība ir 25–27, kas norāda uz 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, norāda uz lielāku dinamisko veiktspēju. Spriegbetona plātņu tilti, kuriem brauktuve novietota slīpi pret tilta garenasi, palielina konstrukcijas dinamisko veiktspēju. Brauktuves seguma līdzenuma un tilta slīpuma ietekme uz tilta konstrukciju apskatīta 3.1.5. apakšnodaļā.

3.1.5. Slodzes dinamiskās iedarbes ietekmējošie faktori

Izanalizējot 3.1. apakšnodaļā iegūtos datus, tika noteikti dinamiskās iedarbes ietekmējošie faktori.

Tilta konstrukcija normālas satiksmes apstākļos un ar līdzenu segumu tiek pakļauta nelielam dinamiskas slodzes pieaugumam, salīdzinot ar slodzi, kas rodas, ja automašīna pārvietojas lēni un pa nelīdzenu ceļa segumu, tāpēc nelīdzens ceļa segums ir tikai viens no parametriem, kas ietekmē tilta svārstības. 3.1.5. apakšnodaļā apskatīti tādi parametru kā tilta ģeometrija, ceļa līdzenums, automašīnas ātrums.

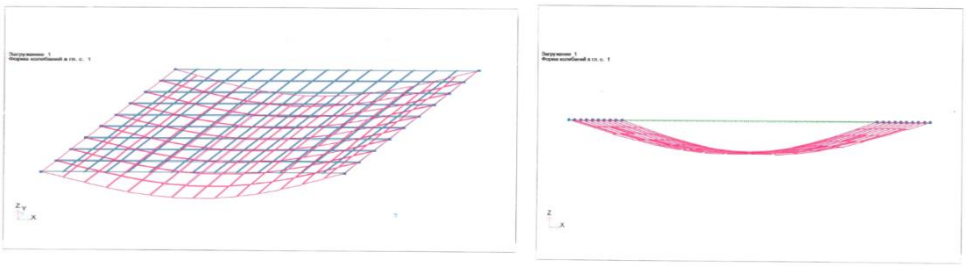
Tilta ģeometrija

Tilta ģeometrija ir viens no svarīgākajiem elementiem, kas ietekmē tilta dinamiku, jo gan tilta konstrukcijas veids un forma, gan šķērsgriezuma 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.

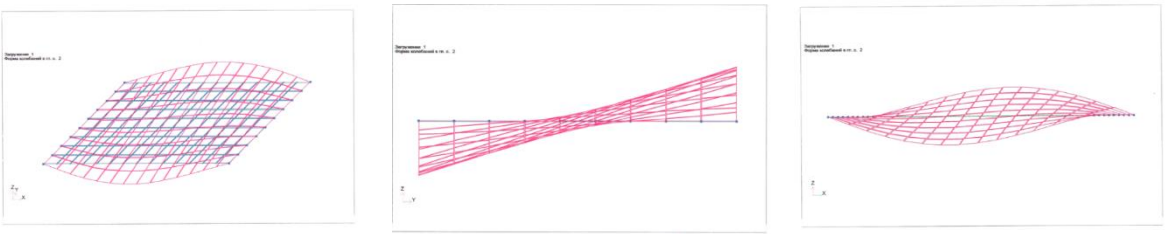
Tilti, kas novietoti slīpi, ir pakļauti lielākai dinamiskajai veiktspējai. Vienlaiduma plātņu tiltu (monolītas konstrukcijas) pirmo pašsvārstību formu frekvences norādītas 3.14. tabulā. Analīze veikta ar datorprogrammu *LIRA*. Redzams, ka, pieaugot tilta slīpumam, pieaug pašsvārstību frekvences vērtība. 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. 3.31. un 3.23. attēlā redzamas 15° slīpa tilta pirmās un otrās pašsvārstību formas. 3.24. attēlā redzama 30° slīpumā novietota tilta pirmā pašsvārstību forma.

3.14. tabula Pirmās formas pašsvārstību frekvence dažāda slīpuma tiltiem.

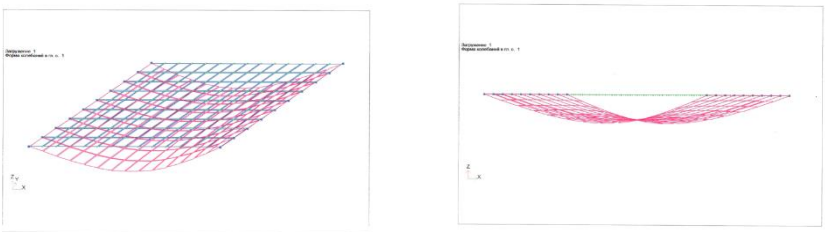
Novietojuma slīpums	Pašsvārstību frekvence (Hz)	Periods T, (s)
0°	6,15	0,163
15°	6,49	0,154
30°	7,69	0,13
45°	10,32	0,096



3.23. att. 15° slīpuma pirmā pašsvārstību forma.



3.24. att. 15° slīpumā novietota tilta otrā pašsvārstību forma

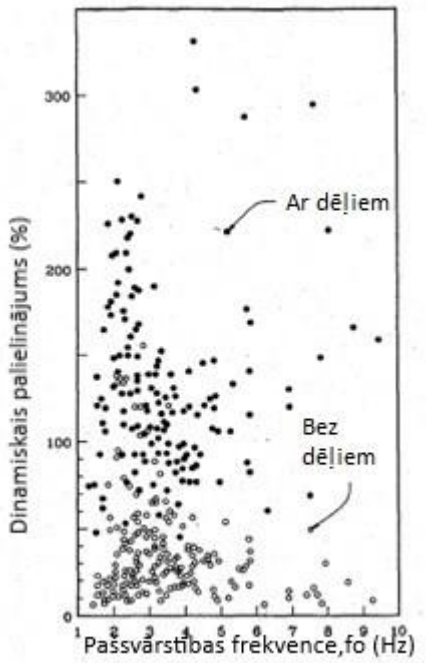


3.25.att. 30 grādu slīpumā novietota tilta pirmā pašsvārstību forma.

Kā redzams no 3.14. tabulā, palielinoties plātnes slīpumam, pieaug pirmās svārstību formas frekvence, kā arī parādās vērpes svārstību formas, kas konstrukcijā rada vērpes spēkus.

Brauktuves seguma līdzenums

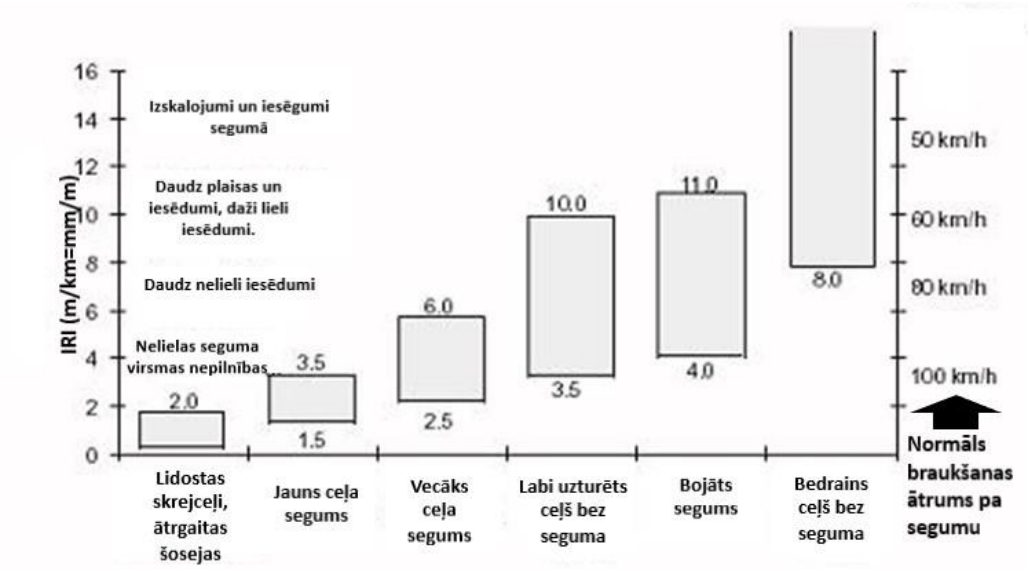
Analīzes rezultāti, kas aprakstīti 3. nodaļā, liecina, ka galvenais dinamiskā koeficienta palielinājuma iemesls ir autoceļa seguma nepilnības. Jebkurš autoceļa nelīdzenums – asfalta izdrupums, nelīdzena deformācijas šuve vai ledus ziemas apstākļos – rada papildu slodzi automašīnas piekares sistēmai, ko pēc tam automašīna pārnes uz tilta konstrukciju [99]. Šī ietekme ir parādīta 3.1. apakšnodaļā dažādiem tiltu veidiem, kā arī 3.26. attēlā, kur redzams dinamiskā koeficienta palielinājums 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].



3.26. att. Ceļa seguma nelīdzenuma ietekme uz dinamisko koeficientu [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 *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 3.27. attēlā.



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

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*. Nelīdzenums tiek mērīts katrai braukšanas joslai atsevišķi. VSIA "Latvijas Valsts ceļi" ir datubāze ar dažādu ceļu starptautisko nelīdzenuma indeksu *IRI*, kas katru gadu tiek papildināta ar jauniem ceļa posmu *IRI* rādītājiem. 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.

Izmantojot 2018. gadā VSIA "Latvijas Valsts ceļi" uz Latvijas autoceļiem veiktos starptautiskā nelīdzenuma indeksa *IRI* mērījumus, 3.28.–3.31. attēlā parādīti asfaltbetona segumi un tiem

atbilstoši starptautiskā nelīdzenuma indeksa *IRI* vērtības: 3.28. attēlā – autoceļa P22 12. km segums ar *IRI* vērtību 3,8 m/km; 3.29. attēlā – asfalta segums ar bojājumiem autoceļam P4 30. km ar *IRI* vērtību 4,81 m/km.

3.28. att. Skats uz autoceļa P22 12. km segumu (*IRI* 3,8 mm/m).

3.29. att. Skats uz autoceļa P4 31. km segumu (*IRI* 4,8 mm/m).

3.30. att. Skats uz autoceļa P35 12. km segumu (*IRI* 6,5 mm/m).

3.31. att. Skats uz autoceļa P131 30. km segumu (*IRI* 8,1 mm/m).

Tilta pārbaudei ar dinamisku slodzi, lai modelētu nelīdzenu 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 (3.32. att.).

3.32. att. Ar lāzerprofilográfu aprīkots automobilis, pārbraucot, pārbraucot pār 4 cm augstiem dēļiem.

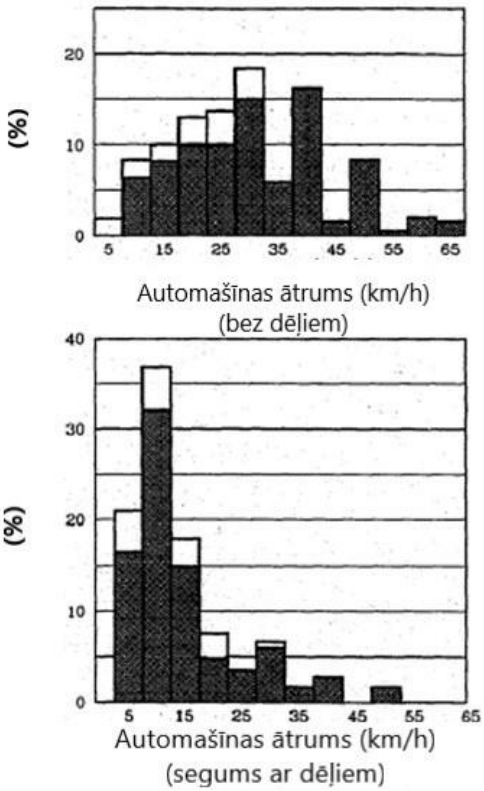
Iegūtie rezultāti parādīja, ka vidējā izmērītā starptautiskā nelīdzenuma indeksa *IRI* vērtība šādam segumam ar dēļu šķēršļiem ir 6 mm/m. Šāds rezultāts ir līdzīgs 3.30. attēlā redzamajam P35 12. km segumam, kura starptautiskais nelīdzenuma indekss IRI ir 6,5 mm/m.

Apkopojot rezultātus var secināt, ka par līdzenu var uzskatīt segumu ar starptautisko nelīdzenuma indeksu *IRI* līdz 2,5, kā noteikts "Ceļu specifikācijās 2019", par nelīdzenu 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 parāda 3.1. 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. Seguma līdzenums un automašīnas ātruma apvienojums veido šīs formas, tāpēc pārvietošanās ātrumam ir tik liela nozīme. Automašīnas ātruma ietekme uz dinamisko koeficientu redzama 3.33. attēlā. Augšējā attēlā parādīts segums bez



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

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 60km/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.

Eirokodeksā 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.

Promocijas darba 3.1. apakšnodaļā tika apskatīti un izvērtēti dažādi konstrukcijas parametri, kas ietekmē konstrukcijas dinamisko veiktspēju. No šiem parametriem tika atlasīti 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 rāmjveida 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 šķērsgriezuma konsoles daļas (saspriegtas 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 3.1. apakšnodaļā veiktās analīzes katrai tiltu grupai. Kritēriji K1 – K5 pieņemti ar koeficientu 1, nenosakot kādu kritēriju par svarīgāku. Noteiktie kritēriju vērtību diapazoni un vērtību diapazona daļa, kas liecina par lielāku dinamiku, norādīta 3.1. apakšnodaļas beigās izvietotajās tabulās.

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: 3.15. tabula – dzelzsbetona plātņu tiltiem, 3.18. tabula – spriegbetona plātņu tiltiem ar vienu ribu, 3.20 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 parāda, kā tiek aprēķināts DI:

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

kur:

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

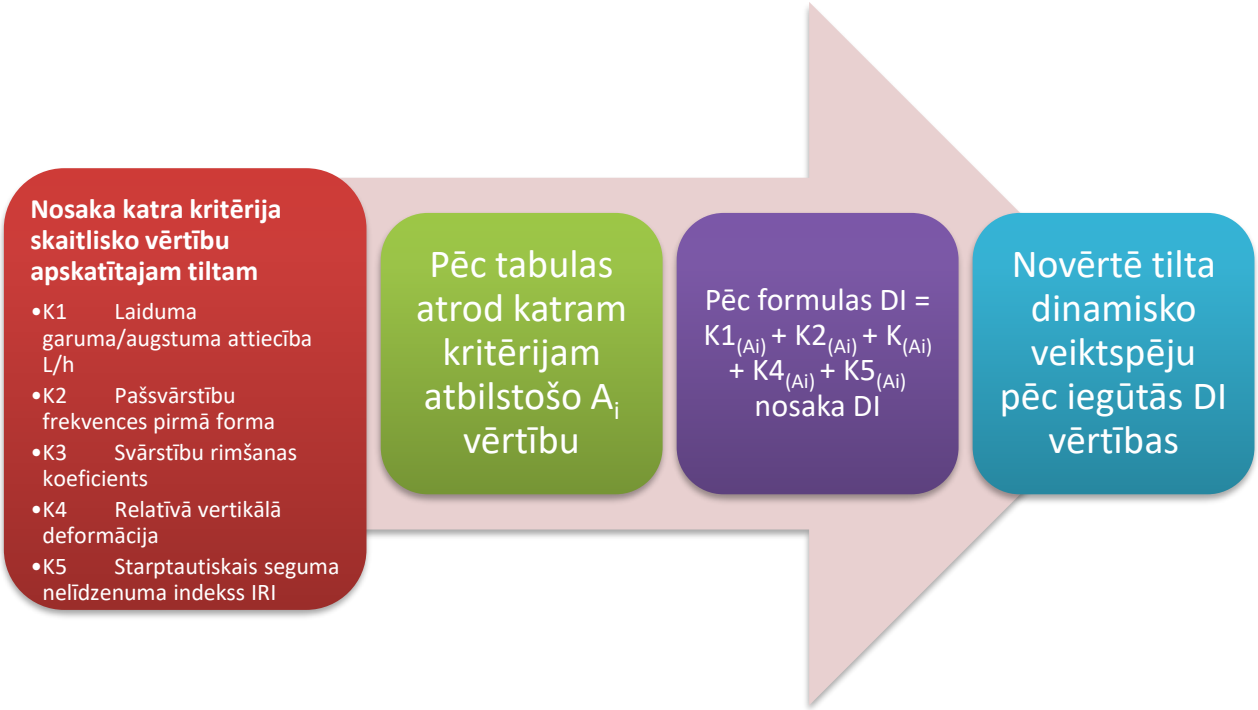
$K2_{Ai}$ – kritērija K2 vērtība diapazonā no 1 līdz 4;

$K3_{Ai}$ – 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.



3.34. att. DI noteikšanas algoritms.

3.34. 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. 3.15. tabulā redzami kritēriji un to vērtību sadalījums četrās daļās. Šādu tabulu izmanto dinamiskuma indeksa noteikšanai. Konkrētajam tiltam novērtē katru no kritērijiem.

3.15. tabula

Dinamiskuma indeksa noteikšana rāmjveida dzelzsbetona plātņu tiltiem

	Kritērijs	***A*1**	***A*2**	***A*3**	***A*4**	***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*	< = 2,9	2,9–4	4,1–5,0	5,1–6,0	$K5_{(Ai)}$	
				Dinamiskuma indekss:		$\Sigma\ Kj$	

3.16. tabulā norādītas dzelzsbetona plātņu tiltu metodē apskatīto kritēriju vērtības, kā arī dinamiskuma indekss. Katram tiltam dota arī dinamiskā koeficienta vērtība, kas parāda pārbaudē ar dinamisku slodzi noteikto reālo tilta dinamisko veiktspēju.

3.16 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**

Rezultāti parāda, 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.

3.17. tabula

Dzelzsbetona plātņu tiltu parametri un DI tiltiem ar līdzenu ceļa segumu

Tilta nosaukums	Tilta sistēma: vienkārši balstīts (VB) / rāmis (R)	Tilta novieto-jums pret garenasi	Laiduma garuma / augstuma (***L/H***) attiecība	Aprēķinātā pirmās formas pašsvārstību frekvence, Hz	Svārstību rimšanas koeficients	Relatīvā vertikālā deformācija (laiduma garums/statis kā deformācija)	**Lielākais dinamiskais koeficients (pa līdzenu brauktuvi)**	Dinamis kuma indekss (***max*** 20 p)
Tilts pār Svitenes upi	VB	Taisni	21,75	4,8	0,05	1/3258	**1,02**	**10**
Tilts pār Zunda kanālu Rīgā	Rāmis	Taisni	24	7,14	0,05	1/2464	**1,1**	**10**

Izveidotā metode tika pārbaudīta vēl divām tiltu konstrukcijām ar līdzenu ceļa segumu. Tiltu parametri norādīti 3.17. tabulā. Tilts pār Svitenes upi un tilts pār Zunda kanālu Rīgā ir nepārtrauktas konstrukcijas dzelzsbetona tilti. Līdzenam ceļa segumam tiltu dinamiskuma indekss ir normas robežās un neliecina par paaugstinātu tiltu dinamisko veiktspēju. Tātad šo metodi var izmantot dzelzsbetona plātņu tiltu dinamiskās veiktspējas novērtēšanai.

3.2.2. Saspriegtas dzelzsbetona plātnes

Metode ir derīga tikai rāmjveida saspriegtas dzelzsbetona plātnes tiltiem. 3.18. tabulā apkopoti kritēriji un to vērtības saspriegtas konstrukcijas rāmjveida tiltiem.

3.18.tabula

Dinamiskuma indeksa noteikšana rāmjveida saspriegta dzelzsbetona plātņu tiltiem

	Kritērijs	***A*1**	***A*2**	***A*3**	***A*4**	***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

3.19. tabulā norādītas apskatīto saspriegtas konstrukcijas plātņu tiltu metodē apskatīto kritēriju vērtības, kā arī dinamiskuma indekss. Katram tiltam dota arī dinamiskā koeficienta vērtība, kas parāda 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.

3.19. tabula

Dinamiskuma indeksa vērtības

Nosaukums	Tilta sistēma: vienkārši balstīts / rāmis	Brau-ktuve uz kon-soles J/N	Laiduma garuma / augstuma (***L/H***) attiecība	Aprēķinātā pirmās formas pašsvārstību frekvence, (Hz)	Svārstību rimšanas koefi-cients	Relatīvā vertikālā deformā-cija (laiduma garums/ statiskā deformā-cija)	**Lielākais dinamiskais koeficients**	**Dinamis-kuma 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. 3.20. tabulā apkopoti kritēriji un to vērtības saspriegtas konstrukcijas rāmjveida tiltiem.

3.20. tabula

Dinamiskuma indeksa noteikšana nepārtrauktas konstrukcijas saspriegtu 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

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

3.21. tabula

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 (***max*** 20 p)
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 = 6000m)	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**

Izstrādātā metode ir derīga norādīto tiltu veidiem definēto kritēriju diapazonos. 3.21. tabulā redzams, ka, izvērtējot 3.20. 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 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

4.1. Tiltu raksturojums

Izmantojot VSIA "Latvijas Valsts ceļi" tiltu vadības sistēmas datus, ir noteikti Latvijai raksturīgie tiltu laidumu veidi, kas apkopoti 4.1. tabulā.

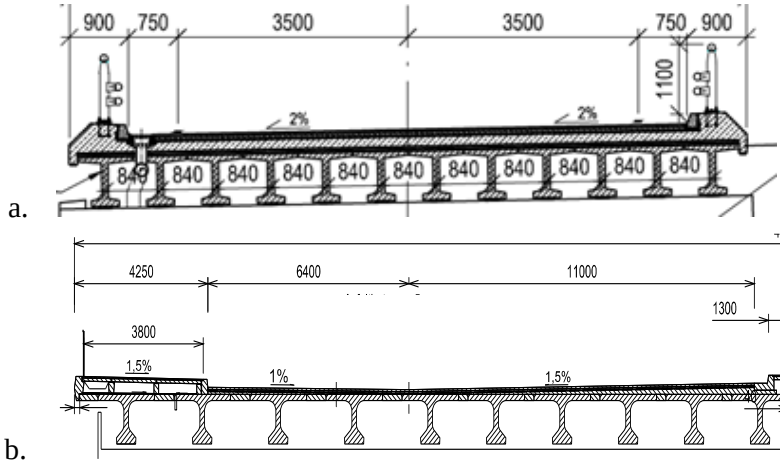
4.1. tabula

Latvijai raksturīgie tiltu laidumu konstrukciju veidi [102]

Nr.	Laiduma konstrukcijas veids
	Viena laiduma
1. Dzelzsbetons	56. tipu projekta dzelzsbetona diafragmu sijas: Laidumi: 8,66, 11,36, 14,06, 16,76, 22,16 m
2. Dzelzsbetons	56.tipu projekta dzelzsbetona bez diafragmu sijas: Laidumi: 8,66, 11,36, 14,06, 16,76, 22,16 m
3. Spriegbetona sija	Stīgbetona sijas: Laidumi: 11,36, 14,06, 16,76 m
4. Spriegbetona sija	Spriegbetona dubul-T veida sijas: Laidumi: 16,76, 18, 24, 33 m
5. Dzelzsbetona plātne	Dobās vienlaiduma plātnes Laidumi: 9, 12, 18 m
6. Dzelzsbetona plātne	Pilna šķērsgriezuma dzelzsbetona vienlaiduma plātnes Laidumi: 4, 6 m
7. Dzelzsbetona plātne	Ribotās saliekamā dzelzsbetona vienlaidumu plātnes Laidums: 6 m
8. Dzelzsbetona plātne	Divkonsoļu monolīti betonētas vienlaidumu sijas Centrālais laidums: 14, 17, 21, 27 m
	Vairāku laidumu
9. Dzelzsbetons	Nepārtrauktas vairāklaidumu Žuravļova tipa šķērsgriezuma sijas Garākie laidumi: 12, 15, 18, 24 m Sānu laidumi: 9, 12, 15, 18 m
10. Dzelzsbetona plātne	Dobā šķērsgriezuma vairāklaidumu nepārtrauktās plātnes Laidums: 12, 15, 18, 24 m
11. Dzelzsbetona plātne	Nepārtrauktas vairāklaidumu T-šķērsgriezuma sijas Laidums: 12 – 18 m
12. Dzelzsbetona plātne – rāmis	Dzelzsbetona rāmju sistēmas tilti ar slīpiem balstiem

Pēc VSIA "Latvijas Valsts ceļi" tiltu vadības sistēmas datiem, 90 % no visiem tiltiem ir vienkāršās divbalstu sijas vai plātnes. Pēc lieluma nākamā konstrukciju grupa ir nepārtrauktas sistēmas siju un plātņu tilti, kas ir aptuveni 3 % no visiem tiltu veidiem [102].

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.



4.1. att. Spriegbetona tipveida siju šķērsgiezumi: a) saspriegto atsevišķo stiepļu (stīgbetona) dzelzsbetona sijas; b) saspriegto stiepļu kūļu (spriegbetona) dzelzsbetona sijas [103].

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. Latvijas tipveida spriegbetona siju veidi redzami 4.1. attēlā.

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*. Šīs transporta slodzes sīkāk ir aprakstījis A. Paeglītis pētījumā "Satiksmes slodzes modeļi Latvijas autoceļu tiltiem ar laidumu garumiem līdz 30 metriem" [104].

Šodienas autotransporta plūsmā MK 2015. gada 2. jūnija noteikumu Nr. 279 "Ceļu satiksmes noteikumi" 2. pielikumā atļautā lielākā nekontrolētā transporta vienība ir *K44* – sešasu konteinervedējs ar normatīvo masu 44 t un kopējo garumu 13,4 m. Aprēķinos tiek izmantota

minētā *K44* slodze, jo tā parāda ikdienas apstākļos maksimāli pieļaujamo smagsvara slodzi. Pārbaudēs ar dinamisku slodzi šādas masas automašīnas neizmanto, jo tās nelīdzena seguma apstākļos konstrukcijā var radīt spēkus, kas atstās paliekošus bojājumus.

4.2. Metode pieļaujamā dinamiskā koeficienta noteikšanai

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

1. Zinot šķērsgriezuma izmērus un stiegrojuma daudzumu, nosaka sijas maksimāli pieļaujamo piepūli vai spriegumu E_{Rd}, kN·m vai N/mm^2.
2. Nosaka konstrukcijas pašsvara ierosināto maksimālo piepūli vai spriegumu M_g, kN·m vai N/mm^2.
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 $E_p/E_{p,i}$.

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

kur:

$E_{Rd,i}$ – konstrukcijas visvairāk nologotā elementa vai šķēluma pieļaujamā lielākā piepūle vai spriegumi, kN·m vai N/mm^2;
$E_{g,i}$ – konstrukcijas pašsvara ierosinātā piepūle, kN·m vai N/mm^2;
$E_{p,i}$ – konkrētās kustīgās slodzes statiskās iedarbības ierosinātā lielākā normatīvā piepūle vai spriegumi, kN·m vai N/mm^2;
i – visvairāk noslogotākais šķēlums vai konstrukcijas elements.

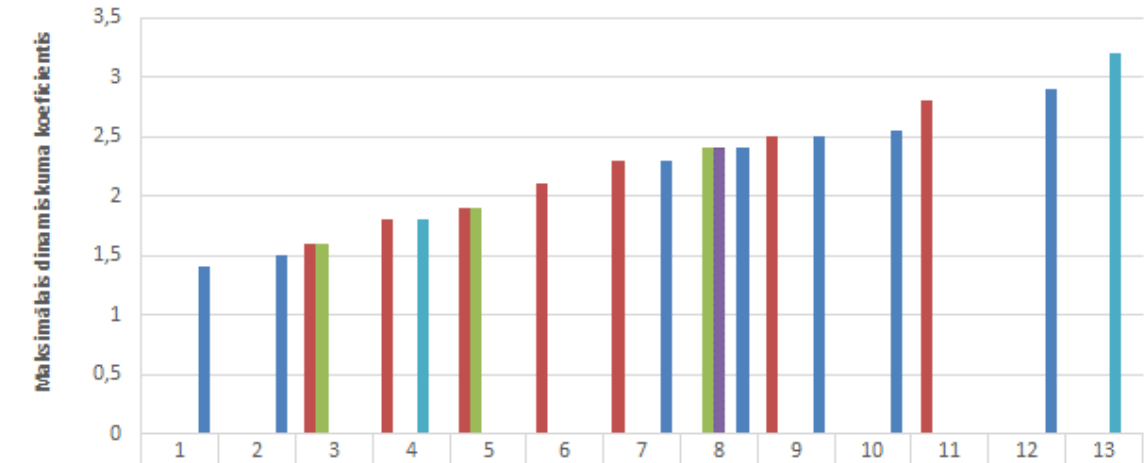
4.3. Pieļaujamie dinamiskie koeficienti siju tiltiem

4.2.–4.6. attēlu diagrammās redzamas lielākās pieļaujamā dinamiskā koeficienta vērtības tipveida dzelzsbetona un spriegbetona siju tiltiem Latvijā. Lielākā dinamiskā koeficienta vērtība ir parādīta maksimāli pieļaujamajai ikdienas satiksmes smagsvara slodzei *K44*. Lai arī sijas ir tipveida, tiltiem ir dažādi platumi un brauktuves konstrukcija, tāpēc arī viena garuma tipveida sijām dinamiskā koeficienta vērtības ir dažādas.

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 stiepļu kūļiem.

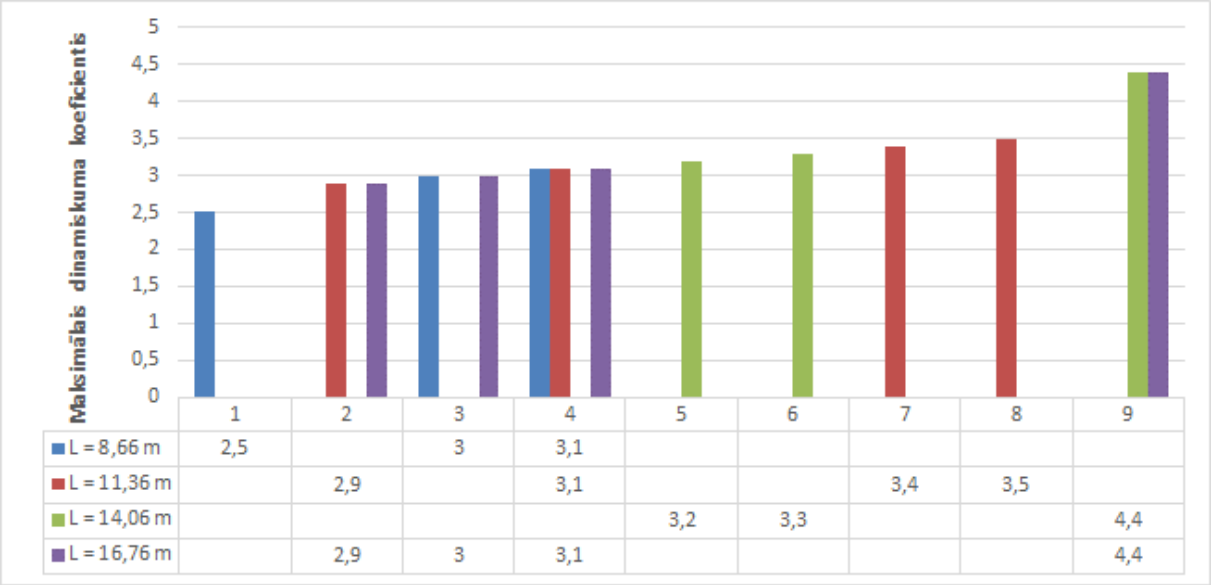
Latvijā pārbaudes ar dinamisku slodzi notiek tikai jauniem vai rekonstruētiem tiltiem, tāpēc šādām tipveida dzelzsbetona konstrukcijām nav daudz pārbaužu ar dinamisku slodzi rezultātu. Tomēr, pēc rekonstrukcijas veicot pārbaudi ar dinamisku slodzi, ir iespējams salīdzināt reālās dinamiskā koeficienta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



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
L = 11,36 m			1,6	1,8	1,9	2,1	2,3		2,5		2,8		
L = 14,06 m			1,6		1,9			2,4					
L = 16,76 m								2,4					
L = 22,16 m				1,8									3,2
L = 8,66 m	1,4	1,5					2,3	2,4	2,5	2,55		2,9	

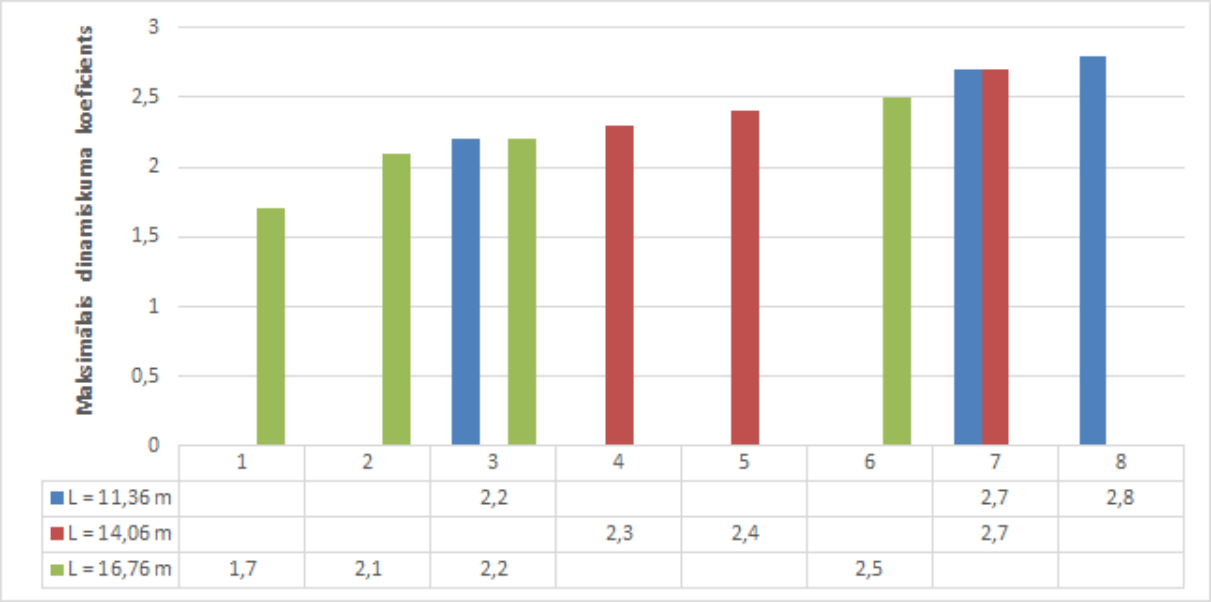
4.2. att. Dzelzsbetona sijas ar karkasa veida stiegrojumu ar diafragmām, izgatavotas pēc 56. tipa projekta rasējumiem.

4.2. attēlā redzamās aprēķina vērtības parāda, ka maksimālais dinamiskais koeficients dzelzsbetona sijām ar karkasa veida stiegrojumu ar diafragmām, izgatavotām pēc 56. tipa projekta rasējumiem, ir 3,2, kas noteikts 22,16 m garām sijām. Visām pārējām sijām maksimālais dinamiskais koeficients ir zem 3. Mazākais dinamiskais koeficients ir 1,4, kas ir Eirokodeksā noteiktā maksimālā dinamiskā koeficienta vērtība *LM1* slodzei, noteiktai 8,66 m garām sijām. Tas norāda, ka karkasa stiegrojuma sijām ar diafragmām ir ļoti neliela nestspējas rezerve dinamiskās slodzes uzņemšanai un šādas konstrukcijas segums būtu jāuztur kārtībā, lai konstrukcijā neradītu bojājumus.



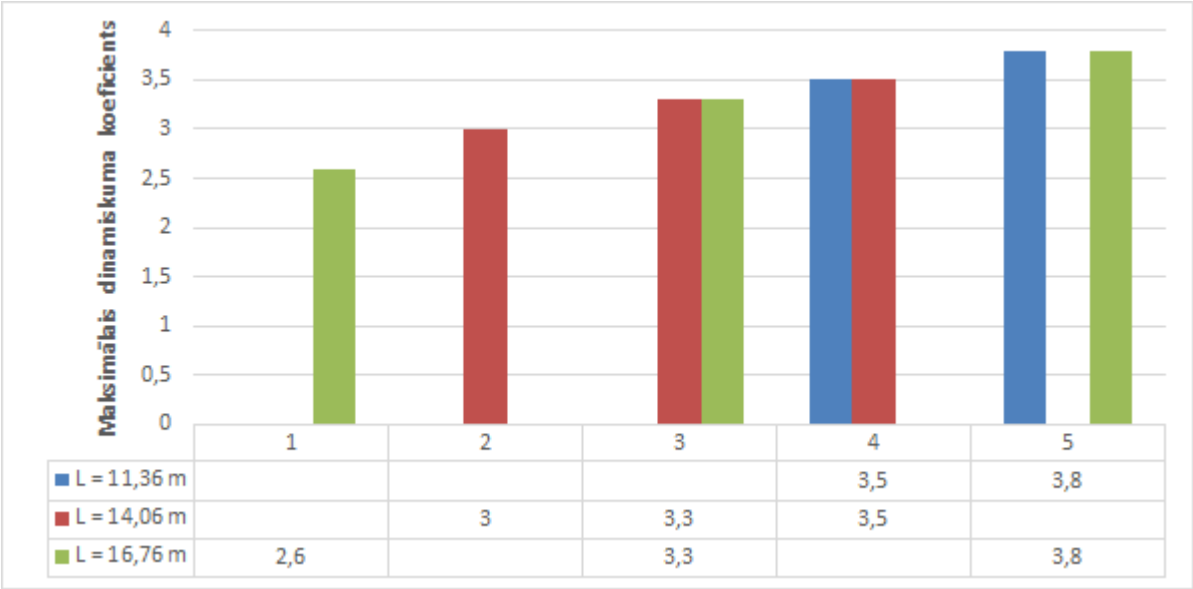
4.3. att. Dzelzsbetona sijas ar karkasa veida stiegrojumu bez diafragmām, izgatavotas pēc 56. tipa projekta rasējumiem.

Savukārt dzelzsbetona sijām ar karkasa veida stiegrojumu bez diafragmām, kas izgatavotas pēc 56. tipa projekta rasējumiem (4.3. att.) pieļaujamais maksimālais dinamiskais koeficients ir 4,4, kas ir lielāks nekā dzelzsbetona sijām ar karkasa veida stiegrojumu ar diafragmām, kas ir 3,2. Šāda veida sijām maksimālās dinamiskā koeficienta vērtības ir starp 2,5 un 4,4. Mazākā dinamiskās koeficienta vērtība 2,5 liecina, ka šīm sijām rezerve dinamiskās slodzes uzņemšanai ir 1,8 reizes lielāka nekā karkasa stiegrojuma sijām ar diafragmām.



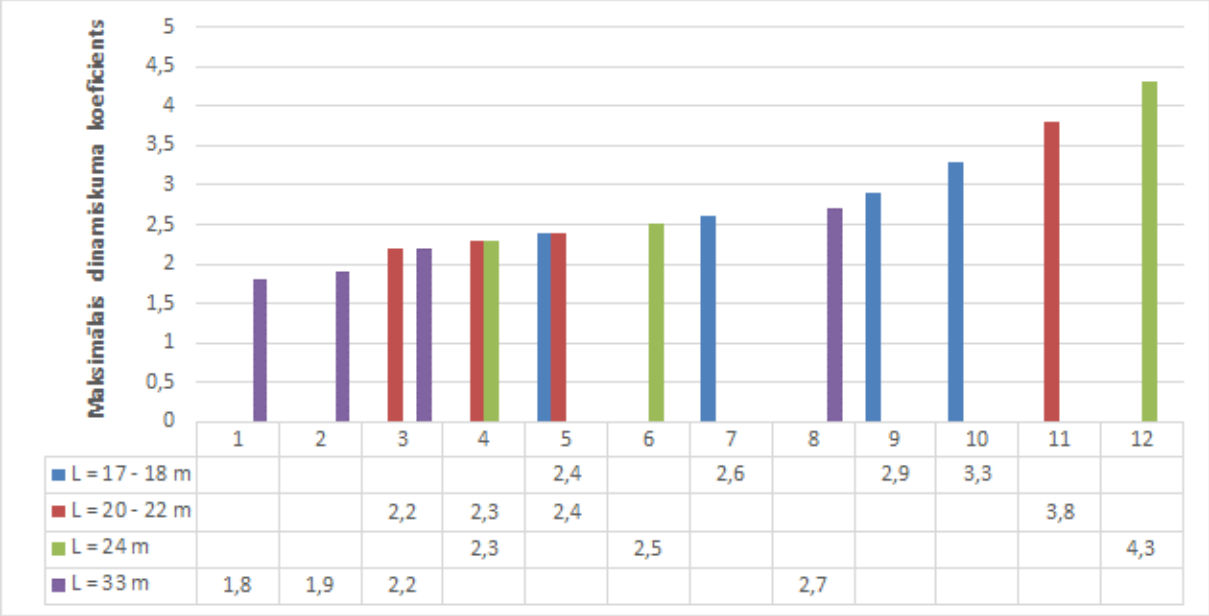
4.4. att. Stīgbetona sijas ar diafragmām.

Stīgbetona sijām ar diafragmām ir zemāks pieļaujamais dinamiskais koeficients. Maksimālā vērtība ir 2,8, kas noteikta 11,36 m garām sijām. Zemākais pieļaujamais dinamiskais koeficients ir 16,76 m garām sijām, kas ir tikai 1,7.



4.5. att. Stīgbetona sijas bez diafragmām.

Stīgbetona sijām bez diafragmām maksimālais dinamiskais koeficients ir 3,8, kas ir augstāks nekā stīgbetona sijām ar diafragmām, kas ir 2,8. Zemākā pieļaujamā dinamiskā koeficienta vērtība 2,6 ir augstāka nekā karkasa tipa 56. tipa projekta sijām un stīgbetona sijām ar diafragmām, kas liecina par šo siju nestspējas lielo rezervi.



4.6. att. Spriegbetona sijas ar stiepļu kūļiem.

Spriegbetona sijām ar stiepļu kūļiem lielākais pieļaujamais dinamiskais koeficients ir 4,3, kas aprēķināts 24 m garām sijām. Šī veida sijām redzama liela rezultātu izkliede, tomēr viszemākais pieļaujamais dinamiskais koeficients ir 33 m garām sijām, kas ir tikai 1,8.

4.4. Secinājumi

Maksimālās pieļaujamās dinamiskā koeficienta vērtības tipveida dzelzsbetona un spriegbetona siju tiltiem apkopotas 4.2. 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.

4.2. tabula

Maksimālās pieļaujamās dinamiskā koeficienta vērtības tipveida siju tiltiem

Tilta tips	**Dinamiskā koeficienta vērtību diapazons**				
	L = 8,66 m	L = 11,36 m	L = 14,06 m	L = 16,76 m	L = 22,16 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 (stiepļu kūļi) sijas	–	–	–	2,4–3,3	2,2–3,8

Rezultātu analīzē 3.1. apakšnodaļā 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 kā 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 kā 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 IEKĻAUŠANAI *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. nodaļā 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;
    - jāsastāda 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 jāšķērso tilts ar ātrumu 20, 40, 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, trieciena, 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 aparatūru 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 līdzenai 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 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.

LITERATŪRAS SARAKSTS

[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 amplificaion on Highway Bridges due to traffic flow,” 2001.

[24] J. Keenahan, P. J. McGetrick, A. González, and E. J. Obrien, “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. OBrien, 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. OBrien, 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. OBrien, 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 hughway 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. Neilsen, 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] Gonzalez and O. Mohammed, “Damage detections in bridges based on patterns of dynamic amplification.” Wiley, p. 20, 2019.

[65] S. G. M. Neves, a. 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. OBrien, 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] M. P. P. P. 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.

1. PIELIKUMS

Ceļa pārvada pār dzelzceļu Jelgava–Tukums autoceļa A9 Rīga (Skulte)–Liepāja 38,7 km pārbaudes programma

1. Ievads

Tilta pārbaude tiks veikta saskaņā ar *LVS190-11* "Tiltu inspekcijas un pārbaudes ar slodzi" prasībām.

Tilta pārbaude ietver šādus darbus:

- projekta mainīgo (kustīgo) slodžu un pārbaudes slodžu ierosināto piepūļu un pārvietojumu aprēķinu laiduma konstrukcijas raksturīgos šķēlumos un mezglos;
- vispārējo inspekciju;
- laiduma konstrukcijas dinamisko raksturojumu mērīšanu;
- tehniskās atskaites sastādīšanu.

2. Tilta konstrukcijas raksturojums

Pārvada nesošā konstrukcija ir nepārtrauktas sistēmas trīs laidumu spriegbetona plātne. Pārvada laiduma formula: 14,0 + 18,0 + 14,0 m. Kopējais tilta garums 46 m. Brauktuves gabarīts 10 m.

3. Vispārējā inspekcija

Vispārējā vizuālā inspekcija tiek veikta ar mērķi noteikt tilta gatavību pārbaudei:

- noteikt, vai tilta konstrukcijā ir bojājumi vai nepilnības, kas samazina tilta nestspēju un iespēju veikt pārbaudes darbus;
- veikt tilta nestspējas aprēķinu;
- noteikt sagaidāmās deformācijas un frekvences tilta slogošanas laikā;
- noteikt tilta konstrukciju stāvokli pirms pārbaudes, lai novērtētu radušās izmaiņas pēc pārbaudes.

Izvērtējot inspekcijā iegūtos rezultātus, tiek noteikts pārbaudē izmantojamās slodzes lielums.

4. Tilta dinamiskās pārbaudes secība

Tilta pārbaudei paredzēts izmantot vienu automašīnu. Mašīnai jābūt nosvērtai un ar kopējo masu 30 t (± 2 t).

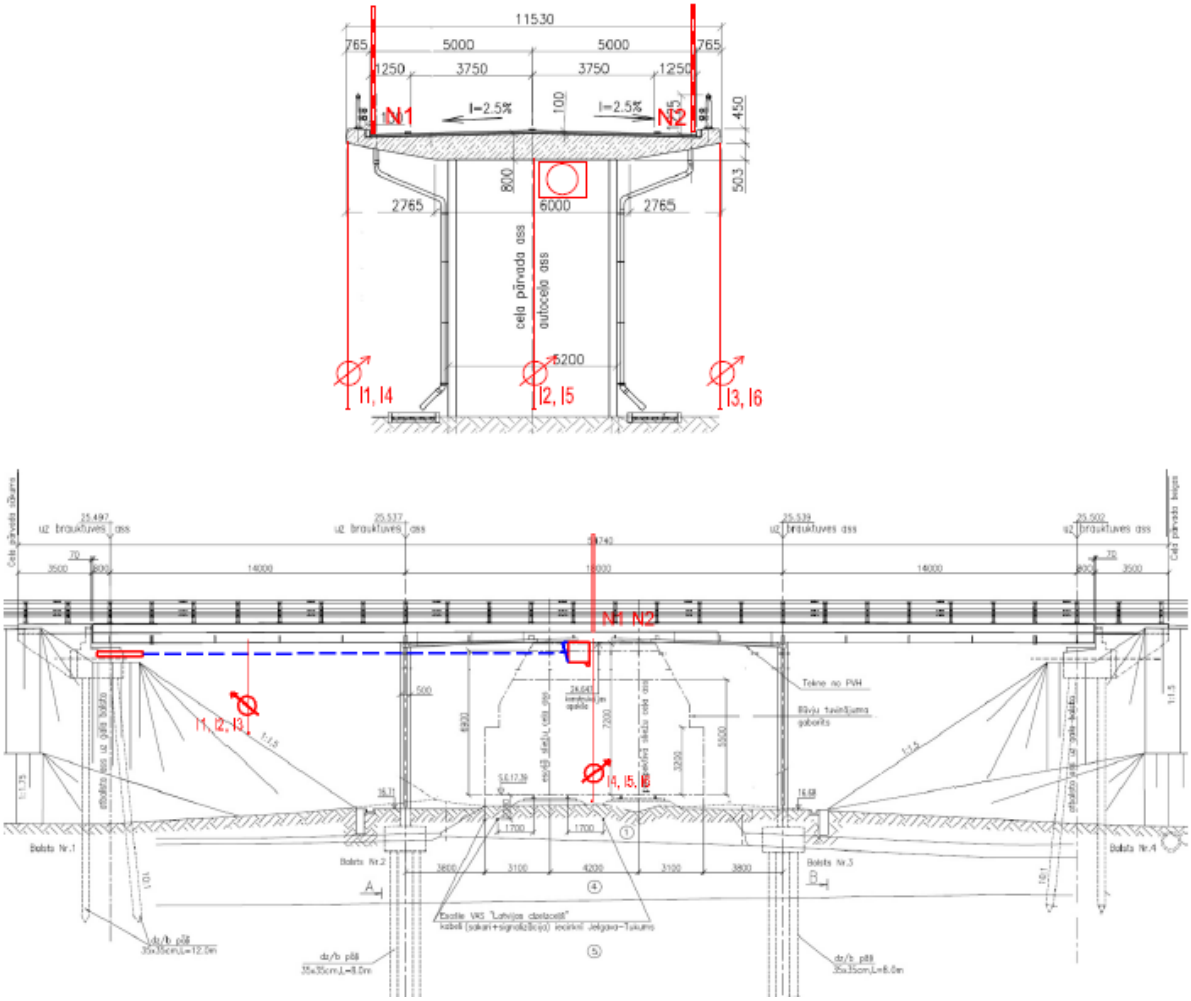
Dinamiskās iesvārstīšanas veidi:

1) viena automašīna ar ātrumu 20 km/h, 40km/h un 60 km/h pārbrauc gludai brauktuvei;
2) viena automašīna ar ātrumu 20 km/h un 40km/h pārbrauc pa 1,5 m attālumā izvietotām 4–5 cm biezām latām;
3) automašīnas priekšējie riteņi tiek nobraukti no 20 cm augta tramplīna.

Katra brauciena laikā tiks mērītas statiskās deformācijas, svārstību amplitūdas un frekvences.

5. Mērinstrumenti un to izvietojums

Mērījumiem tiks izmantoti Maksimova tipa ielieču mērītāji ar iedaļas vērtību 0,1 mm un lāzera deflektometrs ar mērīšanas biežumu 50 Hz. Mērierīču izvietojums parādīts P.1.att.



P.1. att. Mērinstrumentu izvietojuma shēma. I – Maksimova tipa izlieču mērītājs. Sarkanais kvadrāts – *Noptel* optiskais lāzera deflektometrs.

6. Darbinieku pienākumi pārbaudes laikā

Darbinieki, pienākumi	Darba vieta
Pārbaudes vadītājs:	uz brauktuves
Pie ielieču mērītājiem:	zem pārvada
Pie optiskā lāzera deflektometra:	zem pārvada
Atbild par dēļu un tramplīna izvietošanu uz brauktuves, informē automašīnas vadītāju:	uz brauktuves
Atbildīgais par drošības tehnikas ievērošanu:	zem un uz pārvada

7. Drošības tehnika

- Pirms darbu sākšanas darbiniekus iepazīstina ar drošības tehnikas noteikumiem, par to darbinieki parakstās instruktāžas lapā.
- Visi pārbaudē iesaistītie darbinieki ir drošības vestēs un ķiverēs.
- Pārbaudes laikā darbi uz pārvada ir jāpārtrauc un brauktuve jāatbrīvo no būvmateriāliem un būvtehnikas.

Programmu sagatavoja Ilze Paeglīte