

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**  
Būvniecības inženierzinātņu fakultāte  
Materiālu un konstrukciju institūts

**RIGA TECHNICAL UNIVERSITY**  
Faculty of Civil Engineering  
Institute of Materials and Structures

**Uldis LENCIS**

Doktora studiju programmas «Būvniecība» doktorants  
Doctoral student of the study program “Construction”

**METODOLOĢIJA ULTRASKAŅAS IMPULSU METODES  
PIELIETOŠANAI KONSTRUKCIJU BETONA STIPRĪBAS  
NOVĒRTĒŠANĀ**

**Promocijas darba KOPSAVILKUMS**

*Dr. sc. ing.* zinātniskā grāda iegūšanai Būvzinātnes nozarē,  
Būvmateriālu un būvtehnoloģiju apakšnozarē (RTU P-06)

**METHODOLOGY FOR APPLICATION OF THE METHOD OF  
ULTRASONIC PULSES TO EVALUATE THE STRENGTH OF  
CONCRETE IN STRUCTURES**

**SUMMARY of the Doctoral Thesis**

to be awarded the Degree of *Dr. sc. ing.* in Construction Science,  
Construction Materials and Technology (RTU P-06)

Zinātniskais vadītājs/Scientific supervisor  
profesors/Professor *Dr. sc. ing.* A. KORJAKINS

**RTU Izdevniecība**  
**Rīga 2015**

Lencis U. Metodoloģija ultraskaņas impulsu metodes pielietošanai konstrukciju betona stiprības novērtēšanā.

Promocijas darba kopsavilkums. — R.: RTU Izdevniecība, 2015. — 72 lpp.

Lencis U. Methodology for Application of the Method of Ultrasonic Pulses to Evaluate the Strength of Concrete in Structures

Summary of the Doctoral Thesis. —

R.: RTU Press, 2015. — 72 p.

Iespiests saskaņā ar RTU Materiālu un konstrukcijas institūta 2015. gada 27. februāra lēmumu, protokols Nr. 2.

Printed according to the Resolution of the Council of RTU Institute of Materials and Structures as of 27 February, 2015, Protocol No. 2.

**ISBN 978-9934-10-707-8**

## VISPĀRĒJA INFORMĀCIJA

**Promocijas darbs** izstrādāts Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības inženierzinātņu fakultātes Būvmateriālu un būvizstrādājumu katedrā laika posmā no 2006. līdz 2015. gadam.

### Oficiālie recenzenti:

*Dr. sc. ing. Gintauts SKRIPKŪNS* (*Gintautas SKRIPKIŪNAS*), Viļņas Ģedimina Tehniskās universitātes Būvmateriālu katedras profesors;

*Dr. sc. ing. Darjus BAČINSKS* (*Darius BAČINSKAS*), Viļņas Ģedimina Tehniskās universitātes Tiltu un specifisko konstrukciju katedras profesors;

*Dr. sc. ing. Ainārs PAEGLĪTIS*, Rīgas Tehniskās universitātes Ceļu un tiltu katedras profesors.

### Promocijas padomes RTU P-06 sastāvs:

*Dr. sc. ing. Diāna BAJĀRE*, promocijas padomes sekretāre;

*Dr. sc. ing. Jevgēņijs BARKANOVŠ*;

*Dr. habil. sc. ing. Jānis BRAUNS*;

*Dr. sc. ing. Andris ČĀTE*;

*Dr. sc. ing. Modris DOBELIS*;

*Dr. sc. ing. Jānis KAMINSKIS*;

*Dr. sc. ing. Ainārs PAEGLĪTIS*;

*Dr. sc. ing. Leonīds PAKRASTIŅŠ*;

*Dr. sc. ing. Ivars RADIŅŠ*;

*Dr. habil. sc. ing. Kārlis ROCĒNS*, promocijas padomes priekšsēdētājs;

*Dr. sc. ing. Dmitrijs SERDJUKS*;

*Dr. sc. ing. Juris SMIRNOVS*;

*Dr. sc. ing. Mārtiņš ZAUMANIS*.

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2015. gada 19. jūnijā, plkst. 14.15 Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības inženierzinātņu fakultātē, Āzenes ielā 16, sēžu zālē.

Ar promocijas darbu un kopsavilkumu iespējams iepazīties RTU Zinātniskajā bibliotēkā, Paula Valdena ielā 5, un tiešsaistē <http://www.rtu.lv/> sadaļā «Zinātne».

## GENERAL INFORMATION

The **Doctoral Thesis** has been developed at the Department of Building Materials and Products, Faculty of Civil Engineering, Riga Technical University in the period from 2006 to 2015.

### **Official Reviewers:**

*Dr. sc. ing.*, assoc. prof. **Gintautas SKRIPKIŪNAS**, the Department of Building Materials, Vilnius Gediminas Technical University.

*Dr. sc. ing.*, prof. **Darius BAČINSKAS**, the Department of Bridges and Special Structures, Vilnius Gediminas Technical University.

*Dr. sc. ing.*, prof. **Ainars PAEGLITIS**, the Department of Roads and Bridges, Riga Technical University.

### **Members of the Promotion Board of RTU P-06:**

*Dr. sc. ing.* Diana BAJARE, Secretary;

*Dr. sc. ing.* Jevgenijs BARKANOVŠ;

*Dr. habil. sc. ing.* Janis BRAUNS;

*Dr. sc. ing.* Andris CATE;

*Dr. sc. ing.* Modris DOBELIS;

*Dr. sc. ing.* Janis KAMINSKIS;

*Dr. sc. ing.* Ainars PAEGLITIS;

*Dr. sc. ing.* Leonids PAKRASTINS;

*Dr. sc. ing.* Ivars RADINS;

*Dr. habil. sc. ing.* Karlis ROCENS, Chairman;

*Dr. sc. ing.* Dmitrijs SERDJUKS;

*Dr. sc. ing.* Juris SMIRNOVS;

*Dr. sc. ing.* Martins ZAUMANIS.

To be awarded the scientific degree of Doctor of Civil Engineering, the Doctoral Thesis will be defended at the open meeting on June 19, 2015 at 2:15 p. m., at the Assembly Hall of the Faculty of Civil Engineering, Riga Technical University, Azenes Street 16, Riga, Latvia.

The Doctoral Thesis and the Summary are available at the Scientific Library of Riga Technical University, 5 Paula Valdena Street, Riga as well as online at <http://www.rtu.lv/> under the Section "Research".

## KOPSAVILKUMA SATURS / TABLE OF CONTENTS

VISPĀRĒJA INFORMĀCIJA .....	3
GENERAL INFORMATION .....	4
DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS .....	7
Tēmas aktualitāte un problēmas nostādne .....	7
Darba mērķis.....	8
Darba uzdevumi.....	8
Pētījuma zinātniskā novitāte .....	8
Promocijas darba praktiskais nozīmīgums .....	9
Pētīšanas metodika un pielietotie materiāli .....	11
Pētījumu teorētiskā un metodoloģiskā bāze .....	12
Pētījuma diapazons un iegūto rezultātu pielietojuma robežas.....	12
Aizstāvēšanai izvirzītie darba rezultāti.....	13
Promocijas darba saturs un apjoms .....	13
Darbā iegūto rezultātu aprobācija starptautiskās konferencēs.....	13
Publikāciju saraksts .....	14
PROMOCIJAS DARBA SATURS .....	15
1. Literatūras apskats/pētījuma teorētiskais un eksperimentālais pamatojums .....	15
2. Eksperimentāli iegūtie rezultāti, to analīze.....	18
3. Metodoloģija ultraskaņas impulsu metodes pielietošanai konstrukciju betona stiprības novērtēšanā .....	20
3.1. Konstrukciju betona ultraskaņas ātruma analīzes metodika mitruma un stiegruma ietekmes ievērtēšanai .....	20
3.2. Ultraskaņas izplatīšanās ātruma analīzes metodika konstrukciju betona stiprības raksturošanai, ievērtējot betona cietēšanas vides, vecuma, mitruma un apkārtējās vides temperatūras faktoru savstarpējo mijiedarbību.....	22
3.3. Lokāli svērto polinomiālo aproksimāciju pielietojums eksperimentu rezultātu analīzē .....	25
3.4. Iespējamo kļūdu rašanās iemeslu piemēri betona spiedes stiprības novērtēšanā, pielietojot ultraskaņas ātruma mērījumu datus bez konkrētu ietekmes faktoru ievērtēšanas .....	27
4. Izstrādātās metodoloģijas ieguldījums Latvijas Republikas tautsaimniecības būvniecības nozarē .....	29
4.1. Izstrādātās metodoloģijas tautsaimnieciskais efekts.....	29
4.2. Rekomendācijas papildinājumiem standartam LVS EN 12504-4:2005 L «Betona testēšana – 4. daļa: Ultraskaņas impulsa ātruma noteikšana».....	30
SECINĀJUMI .....	31
REKOMENDĀCIJAS .....	33

GENERAL DESCRIPTION OF THE RESEARCH .....	35
Topicality of the Research and Formulation of the Problem .....	35
The Aim of the Doctoral Thesis.....	36
The Tasks of the Doctoral Thesis .....	36
Scientific Novelty of the Research.....	37
Practical Application of the Research Results .....	38
The Methodology of the Research .....	39
The Theoretical and Methodological Foundation of the Research.....	40
The Scope of the Research.....	40
Results to Be Defended.....	41
The Structure and Volume of the Doctoral Thesis .....	41
The Approbation of the Research Results — List of Relevant International Conferences ..	42
List of the Author’s Scientific Publications on the Topic of the Doctoral Thesis .....	43
STRUCTURE OF THE DOCTORAL THESIS .....	44
1. Literature Review / Theoretical and Experimental Foundation of the Research .....	44
2. Experimental Results and Their Analysis .....	46
3. Methodology for Application of the Method of Ultrasonic Pulses to Evaluate the Strength of Concrete in Structures .....	49
3.1. Method for the Analysis of the Propagation of Ultrasonic Pulse Velocity in Rein- forced Concrete Structures, Considering the Effect of Moisture and Reinfor- cement.....	50
3.2. Method of Ultrasonic Pulse Velocity Analysis for Characterization of Concrete Strength in Structures, Considering the Interaction Effect of Concrete Hardening Environment, Age, Moisture and Ambient Temperature Factors .....	51
3.3. Application of Locally Weighted Polynomial Approximation Quadratic Functions in the Analysis of Experimental Results .....	54
3.4. Examples of Errors in Concrete Compressive Strength Determination by Apply- ing Ultrasonic Pulse Velocity Data without Consideration of Affecting Factors ....	57
4. The Contribution of the Methodology Developed to the National Economy of the Con- struction Industry of the Republic of Latvia .....	59
4.1. The National Economic Effect of the Methodology Developed.....	59
4.2. Recommendations for Amendments to Standard LVS EN 12504-4:2005 L “Testing Concrete – Part 4: Determination of Ultrasonic Pulse Velocity” .....	59
CONCLUSIONS.....	61
PROPOSALS .....	63
PROMOCIJAS DARBA LITERATŪRAS ATSAUCES/ LIST OF REFERENCES OF THE DOCTORAL THESIS.....	65
Par promocijas darba autoru .....	71
About the Author .....	71

## DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

### Tēmas aktualitāte un problēmas nostādne

Kā pamatmateriālu lietojot betonu un dzelzsbetonu, tiek celtas aizvien jaunas ēkas un inženierbūves. Pasliktinās arī agrāk celto būvju tehniskais stāvoklis. Tādējādi būtiski palielinās apsekojamo un pārbaudāmo objektu skaits un apjoms, un pārbaužu rezultātus nepieciešams izvērtēt pēc iespējas īsākā laikā. Līdz ar to konstrukciju tehniskā stāvokļa noteikšanai izdevīgāk ir pielietot negraujošās pārbaudes metodes. Šā iemesla dēļ aizvien lielāka uzmanība tiek pievērsta konstrukciju negraujošo izpētes metožu pilnveidošanai un aprobācijai.

Ar materiālu negraujošo izpētes metožu mēraparatūru iegūto rezultātu novērtēšana un to interpretācija joprojām ir mērījumu izpildītāju ziņā. Betona struktūra ir visai komplicēta, un šīs struktūras īpašības var mainīties atkarībā gan no apkārtējās vides apstākļiem, gan arī no plaisu esamības, tāpēc iegūtie rezultāti ir visai atšķirīgi. Līdz ar to nepieciešams apzināties betona struktūras un apkārtējās vides ietekmi uz mērījumu nolasījumiem.

Praksē dzelzsbetona būvkonstrukciju tehniskā stāvokļa raksturošanai galvenokārt izvēlas tikai vienu kritēriju — betona stiprību. Šā parametra noteikšanai dzelzsbetona konstrukciju pārbaudēs var izmantot kādu no ultraskaņas ātruma noteikšanas mērierīcēm. Tomēr patlaban spēkā esošajos standartos par ultraskaņas mērījumu korektas izpildes priekšnosacījumiem un rezultātu interpretāciju dota visai skopa informācija. Dažādu būvobjektu apsekošanas laikā iegūtie dati liecina par visai būtisku mitruma un u. c. faktoru ietekmi uz ultraskaņas izplatīšanās ātrumu, kuru ignorēšana var sekmēt mērījumu datu nepareizu interpretāciju. Nezinot šos ietekmes faktorus, būvinženieri mērījumus pārsvarā interpretē pavirši, neprecīzi nosakot arī pārbaudāmā betona īpašības.

Iepriekšējos pētījumos dažādi ekspluatācijas apstākļi, kā arī fizikālie un fizikāli ķīmiskie faktori, kas ietekmē ultraskaņas izplatīšanās ātrumu betonā, parasti analizēti atsevišķi. Taču katra konkrētā faktora un tā ietekmes pētījumu rezultāti nesekmē mērījumu datu korektu interpretāciju, ja netiek ņemta vērā ultraskaņas izplatīšanās ātruma ietekmējošo faktoru savstarpējā iespējamā mijiedarbība.

Lai būtiski samazinātu iespēju kļūdīties dzelzsbetona konstrukciju betona spiedes stiprības interpretācijā, nepieciešams izstrādāt jaunu ultraskaņas izplatīšanās ātruma analīzes metodoloģiju, ņemot vērā galveno fizikālo un fizikāli ķīmisko faktoru savstarpējās mijiedarbības ietekmi uz ultraskaņas viļņu izplatīšanās ātrumu betonā. Šāda metodoloģija būtu uzskatāma kā priekšraksts attiecīgu darbu veikšanai.

## **Darba mērķis**

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt metodoloģiju ultraskaņas izplatīšanās ātruma analīzei, ņemot vērā tā galveno ietekmējošo faktoru — betona mitruma, stieģrojuma, apkārtējās vides paaugstinātas un negatīvas temperatūras — savstarpējo mijiedarbību saistībā ar betona cietēšanas vidi un vecumu, lai novērtētu konstrukciju betona stiprību.

## **Darba uzdevumi**

Lai sasniegtu pētījuma mērķi, vispirms noskaidrota katra konkrētā faktora — mitruma, apkārtējās vides temperatūras un stieģrojuma — individuāla ietekme uz ultraskaņas izplatīšanās ātrumu betonā, to savstarpēji sasaistot ar betona cietēšanas vidi un vecumu. Pēc iegūto rezultātu apstrādes izveidojams algoritms, kas sevī ietver ultraskaņas izplatīšanās ātruma betonā galveno ietekmējošo faktoru savstarpējo mijiedarbību. Izmantojot algoritmu, iegūtiem datiem izpildīta aproksimācija.

Darbā tika izvirzīti šādi uzdevumi:

1. noteikt betona mitruma, stieģrojuma, apkārtējās vides paaugstinātas un negatīvas temperatūras savstarpējo mijiedarbību ietekmi uz ultraskaņas izplatīšanās ātrumu betonā cementakmens hidratācijas procesa aktīvajā un pasīvajā stadijā;
2. izstrādāt ultraskaņas izplatīšanās ātruma analīzes metodiku konstrukciju betonam, ņemot vērā mitruma un stieģrojuma ietekmi;
3. izstrādāt praksē izmantojamu datorprogrammu ultraskaņas izplatīšanās ātruma datu apstrādei, ņemot vērā betona cietēšanas vidi, vecumu, temperatūru un mitrumu, saistībā ar konstrukciju betona stiprības novērtēšanu;
4. noteikt, kādos gadījumos eksperimentāli iegūtiem datiem iespējams piešķirt aproksimācijas funkcijas, lai ultraskaņas izplatīšanās ātruma ietekmējošiem faktoriem aprēķinātu parametru vērtību kombinācijas, pie kurām eksperimenti nav veikti;
5. novērtēt, vai standartā LVS EN 12504-4:2005 L «Betona testēšana — 4. daļa: Ultraskaņas impulsa ātruma noteikšana» sniegtās norādes uzskatāmas par pietiekamām betona tehniskā stāvokļa noskaidrošanai.

## **Pētījuma zinātniskā novitāte**

Promocijas darba pamatā ir eksperimentālā veidā noskaidrotas ultraskaņas izplatīšanās ātruma ietekmējošo faktoru savstarpējās sakarības. Dažādi ekspluatācijas apstākļi, kā arī fizikālie un fizikāli ķīmiskie faktori, kas ietekmē ultraskaņas izplatīšanās ātrumu betonā, analizēti kop-



sakarībās. Katra konkrētā faktora un tā ietekmes pētījumu rezultāti sekmē mērījumu datu pieņemami korektu interpretāciju tikai tad, ja tiek ņemta vērā minēto un citu ultraskaņas izplatīšanās ātruma ietekmējošo faktoru savstarpējā iespējamā mijiedarbība. Izstrādāta datorprogramma ietver pētījumos iegūto informāciju, dažādiem betona sastāviem analizējot galveno fizikālo un fizikāli ķīmisko faktoru savstarpējo pakārtotību.

Datorprogramma attiecināma uz ultraskaņas virsmas skaņošanas metodi, ja pārbaudēs izmanto garenvilņu un virsmas viļņu impulsus. Datorprogrammas algoritms ietver ultraskaņas izplatīšanās ātruma izmaiņu koeficienta  $k_V$  četrargumentu funkcijas, kurās ietilpst betona cietēšanas vide  $c$ , cementakmens hidratācijas procesa stadija (jeb betona vecums)  $t$ , betona mitrums  $W$  un apkārtējās vides temperatūra  $T$ :

$$k_V = f(c; t; W; T) . \quad (1)$$

Datorprogramma izskaitļo reālo ultraskaņas izplatīšanās ātruma vērtību  $V_{real}$ , ņemot vērā koeficienta  $k_V$  vērtību. Līdz ar to pastāv iespēja salīdzināt, kādas ultraskaņas izplatīšanās ātruma atšķirības iespējamās konkrētajā gadījumā un kādā apmērā var tikt ietekmēta nosakāmā betona stiprība.

Noteikts, kādos gadījumos ultraskaņas izplatīšanās ātruma koeficienta  $k_V$  vērtības iespējams aprēķināt pie tādām ietekmējošo faktoru kombinācijām, pie kurām eksperimenti nav veikti.

Izstrādāta metodika konstrukciju betona ultraskaņas izplatīšanās ātruma analīzei, ņemot vērā mitruma un stiegrojuma ietekmi. Izveidotā blokshēma ietver secīgus soļus, kādi izpildāmi, lai objektīvi novērtētu konstrukciju betona viendabības, stiprības u. c. īpašības.

### **Promocijas darba praktiskais nozīmīgums**

Praksē dzelzsbetona konstrukcijām nepieciešams novērtēt stiprības rādītājus, izmantojot materiālu negraujošās izpētes metodes. Šim nolūkam ļoti ērti izmantot ergonomiskās un viegli pārnēsājamās ultraskaņas mērierīces. Ultraskaņas izplatīšanās ātruma mērījumu rezultātus galveno ietekmējošo faktoru savstarpēji kompleksā ietekme ietverta darba rezultātā izstrādātajā datorprogrammā «Ultraskaņas ātruma izmaiņu koeficienti un to pielietošana, ja dažādās vidēs cietējis betons, kas satur dažādu mitruma daudzumu, tiek skaņots atšķirīgā vecumā un pie dažādām apkārtējās vides temperatūrām».

Datorprogrammu korektu ultraskaņas ātruma vērtību iegūšanai var izmantot jebkurš būvzinieris vai speciālists, kuram ir priekšzināšanas un pieredze darbā ar ultraskaņas aparāturu.

Ultraskaņas izplatīšanās ātruma izmaiņu koeficienti pieņemti, izpildot salīdzinājumu ar konkrētajā pārbaudes dienā reālo ultraskaņas ātrumu, kāds noteikts, ja betonam cietēšanas lai-

kā 28 dienu ilgumā vai arī līdz skaņošanas izpildei attiecīgajā vecumā cementakmens hidratācijas procesu aktīvajā stadijā tiek nodrošināta attiecīga cietēšanas vide un tālākajā ekspluatācijas laikā betons atrodas gaissausā vidē.

Datorprogrammas soļu secīgums un betona stiprības īpašību izvērtēšana ir šāda: betona cietēšanas vides izvēle → betona vecuma izvēle → betona mitruma izvēle → gaisa temperatūras izvēle → ultraskaņas ātruma izmaiņu koeficienta  $k_V$  noteikšana → pie konkrētiem pārbaudes apstākļiem nomērītās ultraskaņas ātruma vērtības  $V_{meas}$  manuālā ievadīšana → ultraskaņas ātruma reālās vērtības  $V_{real}$  iegūšana → betona ultraskaņas ātruma un stiprības īpašību savstarpējo korelācijas sakarību izveidošana.

Iegūstot reālo ultraskaņas ātruma vērtību  $V_{real}$ , betona ultraskaņas ātruma un stiprības īpašību savstarpējās korelācijas sakarības izveidojamas konkrētai ultraskaņas mērierīcei. Tarēšanas līknes izveidojamas dažāda veida un dažādas stiprības betona sastāviem.

Konkrētos gadījumos ultraskaņas ātruma izmaiņu koeficienta  $k_V$  vērtības iespējams aprēķināt pie tādām ietekmējošo faktoru kombinācijām, pie kurām eksperimenti nav veikti. Šim nolūkam betonam līdz 56 dienu vecumam izmantojamas lokāli svērtās polinomiālās aproksimācijas kvadrātiskās funkcijas. Betonam vecumā no 56 līdz 1000 dienām koeficientu  $k_V$  vērtību izteikšanai iespējams pielietot lineāras sakarības, datiem izpildot interpolāciju. Apkārtējās vides negatīvas temperatūras gadījumos aproksimāciju funkcijas nedrīkst pielietot.

Izpildot mērījumus dažādos (tostarp ekstremālos) apstākļos, kas pat visai būtiski mēdz atšķirties no tiem, kādi novērojami reālā ultraskaņas ātruma noteikšanas gadījumā, izmantojot ultraskaņas ātruma izmaiņu koeficienta  $k_V$  vērtības, iespējams iegūt korektu ultraskaņas izplatīšanās ātrumu skaņotajā betonā. Tādējādi tiek būtiski samazināts risks pieļaut kļūdas pārbaudāmā betona stiprības īpašību novērtēšanā. Vienlaikus datorprogrammas lietotājam būs iespēja salīdzināt, kādas ultraskaņas ātruma atšķirības iespējamas konkrētajā gadījumā un cik lielā mērā var tikt ietekmēta pastarpināti nosakāmā betona stiprība, izmantojot korelāciju sakarību līknes.

Jebkura cita ultraskaņas ātruma ietekmējošā faktora analīze nepakļaujas objektīvai izpētei, ja skaņošanas laikā tiek ignorēta stiegrojuma iespējamā ietekme uz ultraskaņas izplatīšanās ātrumu betonā, tāpēc promocijas darbā izstrādāta metodika ultraskaņas ātruma mērījumiem viena atsevišķa dzelzsbetona izstrādājuma robežās. Blokslēmas veida metodika ļauj izraudzīties mērvieta shēmu un mērierīču devēju novietojumu tā, lai ultraskaņas ātruma rezultātus pēc iespējas mazāk ietekmētu mitrums un stiegrojums. Ievērojot izstrādāto blokslēmu, mitruma un stiegrojuma ietekme viena atsevišķa dzelzsbetona izstrādājuma viendabības, stiprības u. c.

īpašību novērtēšanā tiks ļoti būtiski samazināta, un iegūtie ultraskaņas ātruma dati būs korekti interpretējami.

Aprēķināts, ka promocijas darba rezultātā izstrādātās metodoloģijas korekta pielietošana praksē konstrukciju betona stiprības novērtēšanā Latvijas Republikas tautsaimniecībai viena gada griezumā sniegs ekonomisko efektu 34026,50 EUR apmērā.

### **Pētīšanas metodika un pielietotie materiāli**

Promocijas darba izstrādes pamatā ir eksperimentāli izgatavotu betona un stiegrota betona paraugu izpēte ar ultraskaņas aparatūru. Izpētes būtība balstīta uz ultraskaņas impulsu metodei pastāvošo pozitīvo korelāciju starp betona stiprību un tā elastības īpašībām. Pētījumos izmantota ultraskaņas aparatūra, kas piemērota materiāla tilpumā raidīt garenviļņus, šķērsviļņus (bīdes viļņus) un virsmas (Releja) viļņus. Ultraskaņas izplatīšanās ātrumu betonā noteica, pielietojot virsmas skaņošanas un caurskaņošanas metodes. Pārbaudēs izmantoti tikai punktveida adapteri, kas nodrošina daudz augstvērtīgāku kontaktu starp ultraskaņas avotu un kontrolējamo betona virsmu.

Izpētē izmantotās ultraskaņas mērierīces:

- testeris «UK-1401» (virsmas skaņošana; garenviļņu ātruma noteikšana; darba frekvence — 70 kHz);
- defektoskops «A1220 Monolith» (virsmas skaņošana un caurskaņošana; garenviļņu un šķērsviļņu ātruma noteikšana; darba frekvence — 50 kHz);
- oscilogrāfs «UKB-1M» (virsmas skaņošana un caurskaņošana; garenviļņu un virsmas viļņu ātruma noteikšana; darba frekvence — 100 kHz).

Ultraskaņas izplatīšanās ātrumu betonā būtiski ietekmē materiāla mitrums, tāpēc tā kontrolei eksperimentu laikā tika izmantoti mitruma mērītāji: «Tramex Concrete Moisture Encounter» un «Moisture Master T-M-170».

Iegūto rezultātu statistiskā apstrāde un matemātisko modeļu veidošana izpildīta programmatūras «Microsoft Excel» (versijas 97-2003 un 2010) vidē. Ultraskaņas defektoskopa «A1220 Monolith» datu analīzei izmantota datorprogramma «Introvisor» (versija 2.1.). Lokāli svērtās polinomiālās aproksimācijas izpildītas programmā «Matlab» (versija R2011a). Ultraskaņas izplatīšanās ātruma datu apstrādei četrargumentu vairākkopu funkcijas algoritms iekļauts «PHP5» valodā izveidotā datorprogrammā.

## Pētījumu teorētiskā un metodoloģiskā bāze

Promocijas darba pētījumi, izstrādātās metodes un aprēķinu modeļi balstīti uz šādām inženierzinātņu nozarēm:

- būvmateriāli un būvtehnoloģija;
- betona mehānika un reoloģija;
- akustika;
- lauki un viļņi elektronikā;
- varbūtību teorija un matemātiskā statistika;
- matemātiskā modelēšana un optimizācijas metodes;
- datoru un sistēmu programmatūra.

### Pētījuma diapazons un iegūto rezultātu pielietojuma robežas

Izstrādātajā datorprogrammā apkopotā informācija ļauj interpretēt iegūtos rezultātus, ja:

- 1) apskatāmā betona spiedes stiprības klase — C16/20...C45/55;
- 2) betona blīvums gaissausā stāvoklī — 2200...2350 kg/m<sup>3</sup>;
- 3) betona sastāvā izmantoto rupjo pildvielu materiāls — granīts un dolomīts, kuru šķembu un oļu izmēri nepārsniedz 30 mm;
- 4) betona sastāvā izmantotas dažādas minerālās piedevas, kuru daļiņu izmēri nav mazāki kā 10 μm.

Apskatāmais betons var tikt skaņots visai plašā apkārtējās vides temperatūras intervālā, t. i., no -20 °C līdz +30 °C (ja vien tas iespējams, raugoties no ultraskaņas aparatūras ekspluatācijas viedokļa).

Iegūto ultraskaņas izplatīšanās ātruma mērījumu datu apstrādei algoritma funkcijas piemērotas gan betonam cietēšanas laikā, gan arī turpmākās ekspluatācijas laikā pie dažāda mitruma, vienlaikus ņemot vērā apstākļus, kādi betonam bijuši cietēšanas laikā, t. i., cementakmens hidratācijas procesa aktīvajā stadijā.

Lokāli svērtās polinomiālās aproksimācijas kvadrātiskās funkcijas korekta ultraskaņas izplatīšanās ātruma iegūšanai iespējams izmantot betonam līdz 56 dienu vecumam. Betonam vecumā no 56 līdz 1000 dienām koeficientu  $k_V$  vērtību izteikšanai iespējams pielietot lineāras sakarības, datiem izpildot interpolāciju. Apkārtējās vides negatīvas temperatūras gadījumos aproksimāciju funkcijas nedrīkst pielietot.

Ultraskaņas izplatīšanās ātruma noteikšanai vēlams izmantot adapterus, kuru darba frekvences ir 70...100 kHz.

## Aizstāvēšanai izvirzītie darba rezultāti

1. Metodika ultraskaņas viļņu izplatīšanās ātruma analīzei dzelzsbetona konstrukcijās, ievērojot mitruma un stieģrojuma faktoru ietekmi.
2. Ultraskaņas izplatīšanās ātruma analīzes metodika konstrukciju betona stiprības raksturošanai, ievērtējot betona cietēšanas vides, vecuma, mitruma un apkārtējās vides temperatūras faktoru savstarpējās mijiedarbības ietekmi uz ultraskaņas garenviļņiem un virsmas viļņiem virsmas skaņošanas gadījumā.

## Promocijas darba saturs un apjoms

Promocijas darbā ir anotācija, darba vispārējais raksturojums, ievads, piecas galvenās nodaļas, kurām izveidotas apakšnodaļas, secinājumi, rekomendācijas, trīs pielikumi un izmantotās literatūras saraksts. 1. nodaļā aprakstīta promocijas darba pētījumu teorētiskā bāze un dots līdz šim veikto pētījumu apskats. 2. nodaļā sniegts pētījumos izmantoto paraugu apraksts, pielietotās materiālu negraujošo izpētes metožu mērierīces, kā arī novērtēta mērījumu nenoteiktība. 3. nodaļa veltīta eksperimentāli iegūtiem rezultātiem. 4. nodaļā aprakstīta metodoloģija ultraskaņas impulsu metodes pielietošanai konstrukciju betona stiprības novērtēšanā ar aizstāvēšanai izvirzītiem darba rezultātiem. 5. nodaļā apkopots darbā izstrādātās metodoloģijas tautsaimnieciskais ieguldījums.

Darbs ietver 144 lappuses, 78 attēlus, 53 tabulas un literatūras sarakstu ar 99 apskatītajiem avotiem. Promocijas darbs uzrakstīts latviešu valodā.

## Darbā iegūto rezultātu aprobācija starptautiskās konferencēs

1. «Civil Engineering '13» – 4<sup>th</sup> International Scientific Conference. University of Agriculture, Jelgava, Latvia, May 16<sup>th</sup> to 17<sup>th</sup>, 2013. Uzstāšanās tēma: *Effect of elevated temperature environment on ultrasonic pulse velocity in curing concrete*. Tēmas autori: U. Lencis, A. Ūdris, A. Korjakins.
2. 29<sup>th</sup> European Conference on Acoustic Emission Testing. TÜV Austria, European Working Group on Acoustic Emission, NDT.net. Vienna, Austria, September 8<sup>th</sup> to 10<sup>th</sup>, 2010. Uzstāšanās tēma: *Reinforcement effect on the ultrasonic pulse velocity in concrete, depending on the sounding method and measuring device*. Tēmas autori: U. Lencis, A. Ūdris, A. Korjakins.
3. The 10<sup>th</sup> International Conference «Modern Building Materials, Structures and Techniques». Vilnius Gediminas Technical University. Vilnius, Lithuania, May 19<sup>th</sup> to

- 21<sup>st</sup>, 2010. Uzstāšanās tēma: *Application of the ultrasonic and sclerometric measurement data for determining the compressive strength of the construction concrete*. Tēmas autori: U. Lencis, A. Ūdris, A. Korjakins.
4. 17. Internationale Baustofftagung. Bauhaus — Universität Weimar, Bundesrepublik Deutschland, September 23<sup>rd</sup> to 26<sup>th</sup>, 2009. Uzstāšanās tēma: *The Effect of Reinforcement on the ultrasonic longitudinal waves propagation velocity in concrete by modeling the concrete structure research of the reinforced concrete hollow core slabs*. Tēmas autori: U. Lencis, A. Ūdris, V. Zvejnieks, A. Korjakins.
5. RTU 49. starptautiskā zinātniskā konference. RTU Būvniecības fakultātes sēžu zāle Ķīpsalā, Āzenes ielā 16/20, 2008. gada 13. oktobrī. Uzstāšanās tēma: *Stiegrojuma ietekme uz ultraskaņas garenviļņu izplatīšanās ātrumu betonā*. Tēmas autori: U. Lencis, A. Ūdris, V. Zvejnieks, A. Korjakins.
6. RTU 48. starptautiskā zinātniskā konference. RTU Būvniecības fakultātes sēžu zāle Ķīpsalā, Āzenes ielā 16/20, 2007. gada 12. oktobrī. Uzstāšanās tēma: *Ultraskaņas un sklerometrisko mērījumu datu izmantojamība konstrukciju betona faktiskās spiedes stiprības novērtēšanā*. Tēmas autori: U. Lencis, A. Ūdris, A. Korjakins.

### Publikāciju saraksts

1. U. Lencis, A. Ūdris, A. Korjakins. Moisture Effect on the Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete Cured under Normal Conditions and at Elevated Temperature. RTU zinātnisko rakstu krājums, «Būvzinātne», 14. sējums. ISSN 1407-7329, e-ISSN 2255-8551. Rīga, 2013. g., 71.–78. lp. (8 lappuses).
2. U. Lencis, A. Ūdris, A. Korjakins. Effect of Elevated Temperature Environment on Ultrasonic Pulse Velocity in Curing Concrete. Civil Engineering` 13. 4<sup>th</sup> International Scientific Conference Proceedings, Vol. 4. ISSN 2255-7776. Jelgava, Latvia University of Agriculture, 2013, 11–18 p. (8 lappuses).
3. U. Lencis, A. Ūdris, A. Korjakins. Decrease of the ultrasonic pulse velocity in concrete caused by reinforcement. Journal of Materials Science and Engineering A1 (2011). International Standard Serial Number: ISSN 2161-6213. Formerly part of Journal of Materials Science and Engineering, ISSN 1934-8959. Volume 1, Number 7A, USA, December 2011, 1016–1028 p. (13 lappuses).
4. U. Lencis, A. Ūdris, A. Korjakins. Reinforcement effect on the ultrasonic pulse velocity in concrete, depending on the sounding method and measuring device: TÜV Austria, European Working Group on Acoustic Emission, NDT.net, 29<sup>th</sup> European Conference on

Acoustic Emission Testing, CD proceeding ISBN: 978-3-200-01956-0, Vienna, Austria, 2010 (8 lappuses).

5. U. Lencis, A. Ūdris, A. Korjakins. Application of the ultrasonic and sclerometric measurement data for determining the compressive strength of the construction concrete. Vilnius Gediminas Technical University Publishing House «Technika». The 10<sup>th</sup> International Conference «Modern Building Materials, Structures and Techniques», ISBN: 978-9955-28-592-2, Lithuania, 2010, 173–180 p. (8 lappuses) (*Indeksēts SCOPUS datu bāzē.*)
6. U. Lencis, A. Ūdris, V. Zvejnieks, A. Korjakins. The effect of reinforcement on the ultrasonic longitudinal waves propagation velocity in concrete by modeling the concrete structure research of the reinforced concrete hollow core slabs. F. A. Finger — Institut für Baustoffkunde, Bauhaus — Universität Weimar, 17. Internationale Baustofftagung, Tagungsbericht — Band 1, 2009, Weimar, Bundesrepublik Deutschland, 1-0999 ... 1–1010 p. (12 lappuses).
7. U. Lencis, A. Ūdris, V. Zvejnieks, A. Korjakins. The effect of reinforcement on the ultrasonic longitudinal waves propagation velocity in concrete by sounding surface of the reinforced structural elements. RTU zinātnisko rakstu krājums, «Būvzinātne», 9. sējums. ISSN 1407-7329. RTU Izdevniecība, Rīga, 2008. g., 72.–83. lp. (13 lappuses).

## **PROMOCIJAS DARBA SATURS**

Promocijas darba vispārējā aprakstā un ievadā ir formulēta nepieciešamība pētījuma veikšanai, izvirzītais mērķis un galvenie uzdevumi, kā arī norādīta pētījuma zinātniskā novitāte, praktiskais pielietojums un aprobācija praksē.

### **1. Literatūras apskats/pētījuma teorētiskais un eksperimentālais pamatojums**

Literatūras apskats, kas uzskatāms par pētījuma teorētisko un eksperimentālo pamatojumu, dots darba 1. nodaļā. Apskatot materiālu negraujošo izpētes metožu pielietojšanas iespējas dzelzsbetona konstrukciju pārbaudēs, secināts, ka ar ultraskaņas aparatūru iespējams noteikt vairākas īpašības (betona viendabību, blīvumu un stiprību), kas sniedz plašāku ieskatu par materiāla stāvokli kopumā (Malhotra, 2004; Коревицкая, 1989; Дзенис, 1987). Turklāt materiāla izpēti var veikt jebkura veida un formas izstrādājumiem un paraugiem (Mehta, 2005; Mindess, 2003; Hellier, 2001).

Ultraskaņas impulsu metodes būtības pamatā ir pozitīvā korelācija starp betona stiprību un tā elastības īpašībām (Дзенис, 1987; Lapsa, 1981). Kaut arī starp materiāla elastību raksturo-

jošiem lielumiem pastāv savstarpējas sakarības, tās ne vienmēr sakrīt ar ultraskaņas izplatīšanās ātruma izmaiņas tendencēm. Piemēram, materiālam esot samitrinātā stāvoklī, Puasona koeficienta un ultraskaņas ātruma izmaiņas var nebūt viennozīmīgi likumsakarīgas (Дзенис, 1971). Betona akustisko un stiprības īpašību savstarpējās korelācijas sakarības iespaido arī betona vecums, betona maisījumā iestrādātā ūdens un izmantotā cementa daudzuma savstarpējā attiecība, pildvielu raksturs, betona noblīvēšanas pakāpe un kopšanas (cietēšanas) apstākļi, pielietoto piedevu veids, kā arī stiegrojums (Lin, 2003; Yaman, 2001; Phoon, 1999; Popovics, 1986; Ужполявичюс, 1982). Tādējādi nozīme ir ne tikai katra konkrētā betona sastāvam, bet arī videi, kādā tas tiek pārbaudīts — pastāv virkne faktoru, kas var būtiski ietekmēt ultraskaņas ātrumu betonā pat tad, ja tas ticis izgatavots, izmantojot vienus un tos pašus ingredientus.

Aplūkojot literatūru par stiegrojuma ietekmi uz ultraskaņas izplatīšanās ātrumu, mērot tā izplatīšanos dzelzsbetonā, lielākoties minēts, ka ultraskaņas ātrums palielinās stiegru zonās (Malhotra, 2004; Bungey, 1984; Рутковский, 1980). Turklāt visbūtiskākā ietekmē ir stiegrojuma klātbūtnei mērāmās virsmas zonā. Patlaban lietojamajos dažādu valstu standartos minēti tikai ieteikumi, kā ultraskaņas ātruma mērījumi veicami stiegrotam betonam, turklāt šie ieteikumi ir visai atšķirīgi (ASTM C597-09, 2009; LVS EN 12504-4:2005 L, 2005; Методические указания, 2004).

Vides temperatūra diapazonā no +5 līdz +30 °C ultraskaņas izplatīšanās ātrumu betonā neietekmē (Malhotra, 2004; Guidebook, 2002). Savukārt mitruma un temperatūras režīmu kompleksa izmaiņa var pat būtiski ietekmēt ultraskaņas izplatīšanās ātrumu betonā (Алимов, 2-2007; Дзенис, 1971; Коротков, 1963). Taču mitruma faktora ietekme uz ultraskaņas izplatīšanās ātrumu betonā ir daudz būtiskāka (Алимов, 2-2007; Fadrugas, 2011). Šādos gadījumos runa gan parasti ir par betonu, kas tiek skaņots brīdī, kad cementakmens hidratācijas procesu aktīvā stadija betonā vairs nenorisinās. Taču pastāv liela atšķirība, vai betonu pārbauda agrīnā vecumā, vai arī vēlākajā ekspluatācijas laikā. Analizējot norādes dažādu valstu standartos, nerodas konkrēts priekšstats par to, kā pozitīva temperatūra ietekmē ultraskaņas izplatīšanās ātrumu betonā (LVS EN 12504-4:2005 L, 2005; ГОСТ 17624-87, 1988).

Pieņemot, ka betons ir absolūti sauss un tā porās ir vienīgi gaiss, pazeminoties temperatūrai, ultraskaņas ātrums betonā samazināsies pavisam nedaudz (Zitzewitz, 1995; Trinklein, 1990). Turpretim ultraskaņas izplatīšanās ātruma atšķirības ūdenī un ledū ir ļoti būtiskas. Ultraskaņas ātrums ledū var būt pat 2,5 reizes lielāks nekā ūdenī (Vogt, 2008; Al-Nassar, 2006; Kohnen, 1974). Līdz ar to materiāla struktūras fāzu sastāva izmaiņas ultraskaņas ātrumu betonā var ietekmēt pat visai būtiski. Īpaši tas izpaužas gadījumā, ja notiek pāreja no šķidrās fāzes cietajā, un pretēji. Iepriekš veiktajos pētījumos par negatīvas temperatūras ietekmi uz ultra-



skaņas ātruma izplatīšanos betonā norādītā ietekmes pakāpe ir atšķirīga. Maksimāli iespējama ultraskaņas ātruma palielinājums sasalušam betonam attiecībā pret gaissausu betonu noteikts kā 18 % (Алимов, 2-2007). Dažādu valstu standartos nav dotas konkrētas norādes par negatīvas temperatūras ietekmi uz ultraskaņas izplatīšanās ātrumu betonā (LVS EN 12504-4:2005 L, 2005; ГОСТ 17624-87, 1988; BS 1881: Part 203: 1986, 1986).

Mitruma ietekmes pakāpe uz ultraskaņas izplatīšanās ātrumu betonā tiek definēta plašā amplitūdā: — no niecīgas līdz pat būtiskai 16 % apmērā. (Fadragas, 2011; Алимов, 2-2007; Hellier, 2001). Atšķirīgi tiek vērtēti arī korelācijas sakarības «ultraskaņas ātrums – betona mitrums» raksturs. Ir darbi, kuros šo divu fizikālo lielumu savstarpējā saistība tiek definēta kā lineāra (Rollet, 2008), taču vairākumā pētījumu par atzītākiem noteikti eksponenciālie modeļi (Fadragas, 2011; Ohdaira, 2000; Дзенис, 1971). Dažādu valstu standartos atrodamās norādes ir nekonkrētas: 1) Latvijas Republikā un Eiropas Savienībā patlaban spēkā esošajā standartā atrodama informācija vien liecina, ka vienā un tajā pašā betonā, mainoties tā mitrumam, ultraskaņas ātruma atšķirības var būt nozīmīgas (LVS EN 12504-4:2005 L, 2005); 2) ASV spēkā esošajā standartā minēts, ka ar mitrumu piesātinātā betonā ultraskaņas izplatīšanās ātrums var būt par 5 % augstāks (ASTM C597-09, 2009); 3) Krievijas Federācijā spēkā esošie standarti nepārprotami norāda uz iespējamām ultraskaņas ātruma atšķirībām, ja pārbaudāmiem betona izstrādājumiem netiks ievērtēta mitruma pakāpe, taču nav konkretizēts iespējamo izmaiņu apmērs (ГОСТ 17624-87, 1988; ГОСТ 26134-84, 1985). Apskatītajos literatūras avotos nav atrodama informācija par ultraskaņas ātruma iespējamām izmaiņām mitruma ietekmē, kas saistītas ar pārbaudāmā betona vecumu un kopšanas kvalitāti cietēšanas laikā.

Izvērtējot pētījumu rezultātus par spriegumu ietekmi (ja savstarpēji salīdzina datus dzelzsbetona konstrukcijām, kas pakļautas atšķirīga lieluma slodžu iedarbībai), secināts, ka iespējamās ultraskaņas ātruma izmaiņas betonā galvenokārt saistāmas ar plaisu rašanos materiāla cementakmens struktūrā. Būtisks ultraskaņas izplatīšanās ātruma samazinājums betonā novērots, slodzei sasniedzot 70...80 % no robežsprieguma vērtības (Зиновьев, 2012; Popovics, 1991; P. Джонс, 1974). Pārbaudot dzelzsbetona konstrukcijas, spriegumu ietekmē fiksētais ultraskaņas ātruma samazinājums nenoliedzami liecinās arī par apskatāmās konstrukcijas betona stiprības un nestspējas zudumu, un tādējādi faktiskā situācija tiks atainota korekti.

Kā redzams, ultraskaņas ātrumu betonā ietekmējošiem faktoriem savstarpēja mijiedarbība praktiski netiek apskatīta. Līdz ar to šī promocijas darba izpētes galvenais vadmotīvs — noteikt, vai dažādiem fizikāliem un fizikāli ķīmiskiem faktoriem pastāv savstarpēja kompleksa ietekme uz ultraskaņas izplatīšanās ātrumu betonā.

## 2. Eksperimentāli iegūtie rezultāti, to analīze

Vispirms noteikts, kā, dzelzsbetona izstrādājumiem nosakot ultraskaņas izplatīšanās ātrumu betonā, iegūtos rezultātus ietekmē apskatāmajā masīvā esošais stiegrojums. Jebkura cita ultraskaņas ātruma ietekmējošā faktora analīze nepakļaujas objektīvai izpētei, ja skaņošanas laikā tiek ignorēta stiegrojuma iespējamā ietekme uz ultraskaņas izplatīšanās ātrumu betonā. Sekojoši tam izvērtēta mitruma un apkārtējās vides temperatūras faktoru ietekme uz ultraskaņas ātruma rezultātiem betonā. Novērtēta šo faktoru kompleksa iedarbība saistībā ar betona cietēšanas vidi un cementakmens hidratācijas procesa stadiju (jeb betona vecumu).

Eksperimentāli noteiktā **stiegrojuma ietekme** uz ultraskaņas izplatīšanās ātrumu betonā atšķiras no līdz šim dažādos zinātniskos rakstos un valstu standartos atrodamās informācijas. Betona paraugos iestrādāto stiegru joslās noteikts zemāks ultraskaņas ātrums. Šī sakarība attiecināma gan uz garenviļņiem, gan arī uz šķērsviļņiem un virsmas viļņiem.

Stiegru joslās noteiktais salīdzinoši zemākais ultraskaņas ātrums betonā, visticamāk, izskaidrojams ar kontaktzonā «hidratētā cementa pasta (HCP) — stiegrojuma stienis» pastāvošām atšķirīgām struktūras īpašībām (t. sk. vides nevienādību), ja salīdzina ar HCP īpašībām citviet betona masīvā. Minētajā kontaktzonā HCP parasti raksturojas ar paaugstinātu porainību, turklāt šajā vidē ap stiegrām novērojama arī rupjo pildvielu koncentrāciju atšķirība, kas betona masas iestrādāšanas brīdī bieži vien rodas t. s. pildvielu centrālās rezultātā. Tāpat nav izslēdzams, ka ultraskaņas ātruma izmaiņas saistībā ar stiegrojuma ietekmi sekmējusi betona pildvielu un piedevu attīstība, tādējādi izmainot HCP vidi, kurā izplatās ultraskaņas viļņi.

Novērtējot **paaugstinātas temperatūras ietekmi** uz ultraskaņas viļņu izplatīšanās ātrumu betonā dažādās cementakmens hidratācijas procesa stadijās, vispirms jānorāda šādi fakti. Šajā gadījumā termins «paaugstināta temperatūra» ir saistīts ar betonā notiekošajiem hidratācijas procesiem. Tādējādi par paaugstinātu temperatūru uzskatāma tāda, kas pārsniedz betona normālcietēšanas apstākļu temperatūru ( $+18 \pm 2$  °C).

Iegūtie rezultāti liecina, ka, betonam cietējot vidē, kur gaisa temperatūra sasniedz  $+30$  °C, virsējos slāņos izveidojusies palielinātā cementakmens porainība un/vai mikroplaisas kavē ultraskaņas viļņu izplatīšanos. Tādējādi, betonam izpildot ultraskaņas mērījumus ar virsmas skaņošanas metodi, akustisko un mehānisko īpašību savstarpējā korelācija ir būtiski atkarīga no izstrādājuma cietēšanas vides apstākļiem. Turklāt betona virskārtā noteiktā aina var korekti neraksturot betona stāvokli kopumā.

**Negatīvas temperatūras ietekme** uz ultraskaņas viļņu izplatīšanās ātrumu betonā tika noteikta cementakmens hidratācijas aktīvajā un pasīvajā stadijā, kā arī gaissausam un ar ūdeni

piesātinātam betonam. Betona paraugu sasaldēšanas ilgums pieņemts saskaņā ar norādēm betona salturības noteikšanas standartā (Russian Standard, 1996), kurā minēts, cik ilgā laikā betona paraugs ar konkrētām dimensijām sasilst visā tilpumā.

Noteikts, ka īslaicīga sala ietekmes izvērtēšanā būtiska nozīme ir pārbaudāmā betona mitrumam. Turklāt ultraskaņas ātruma izmaiņu atšķirības saistāmas ar betona cietēšanas vidi: jo ilgāk betons cietēšanas laikā pakļauts paaugstinātas temperatūras ietekmei, jo vairāk to iespaidos mitrums un sals, un līdz ar to lielākas būs arī ultraskaņas ātruma atšķirības.

Betonam ilglaicīga sala ietekmē 3 līdz 28 dienu periodā sasalušā un atlaidinātā stāvoklī noteiktas ļoti būtiskas ultraskaņas ātruma atšķirības, skat. 1. tabulu.

Vēl secināts, ka, betona paraugam sasalstot, samazinās tā virsmas mitrums (tas bieži vien ir zemāks par 6 %), bet ultraskaņas izplatīšanās ātrums betonā pieaug. Līdz ar to sasaluša betona gadījumā saistība starp ultraskaņas ātrumu un betona virsmas mitrumu ir citādāka nekā šo pašu parametru savstarpējā sakarība nesasalušam betonam.

1. tabula

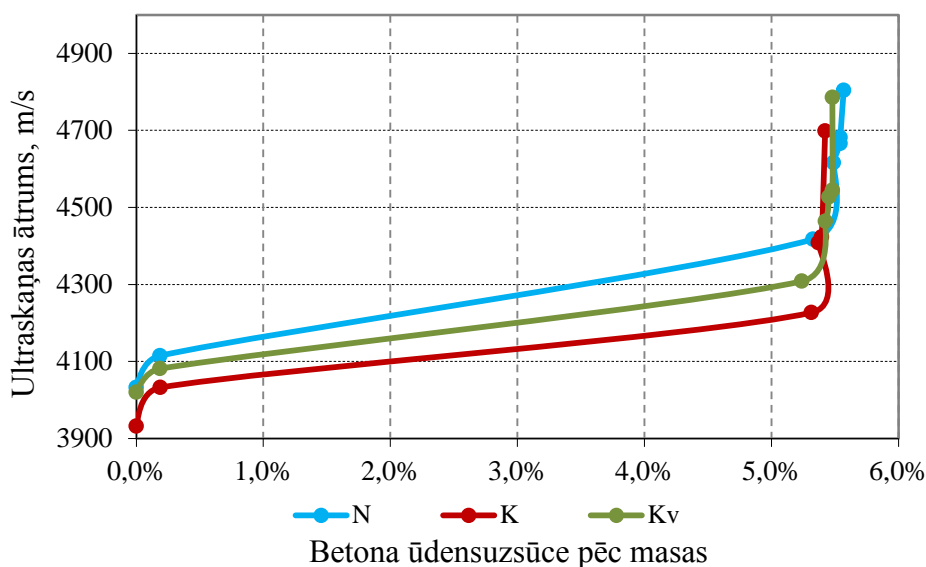
Ultraskaņas ātruma korekcijas koeficienti betonam, kas pakļauts ilglaicīga sala ietekmei

betona vecums dienās			3	7	14	28
virsmas skaņošana <sup>1</sup>	gareņviļņi	korekcijas koeficienti	0,50	0,49	0,55	0,57
	virsmas v.		0,52	0,50	0,55	0,58
caurskaņošana	gareņviļņi <sup>2</sup>		0,53	0,56	0,57	0,58
	gareņviļņi <sup>3</sup>		0,51	0,55	0,56	0,59
<b>vidēji:</b>			<b>0,52</b>	<b>0,53</b>	<b>0,56</b>	<b>0,58</b>

Piezīme: ultraskaņas aparatūra: <sup>1</sup> — «UK-1401»; <sup>2</sup> — «UKB-1M»; <sup>3</sup> — «A1220 Monolith».

Ultraskaņas ātruma mērījumu rezultātus visbūtiskāk ietekmē **mitruma faktors**. Tieši mitruma daudzuma izmaiņas betonā iespaido arī pārējo fizikāli mehānisko raksturlielumu (temperatūras un elastīgo īpašību u. tml.) ietekmes pakāpi uz ultraskaņas izplatīšanās ātrumu betonā.

Pielietojot betona virsmas skaņošanas metodi, ultraskaņas gareņviļņu ātrumam fiksēts būtisks palielinājums brīdī, kad ūdensuzsūces laikā paraugiem masas pieaugums ir mazāks par 0,1 % diennaktī (proti, kad gandrīz sasniegts betona maksimālais piesātinājums ar ūdeni). Visbūtiskākās izmaiņas konstatētas paaugstinātas temperatūras vidē cietējušam betonam, kura mitrumam pēc masas pieaugot par 0,1 %, ultraskaņas ātruma palielinājums sasniedza 9 % (1. att.). Tādējādi korektu ultraskaņas ātruma un ūdensuzsūces pēc masas sakarību noteikšanai betona paraugu piesātināšanu nepieciešams īstenot ilgākā laika periodā nekā to nosaka Latvijas Republikā patlaban spēkā esošie standarti.



1. att. Sakarības starp ultraskaņas izplatīšanās ātrumu un betona ūdenssūci pēc masas dažādā vidē cietējušiem paraugiem ( $N$  — normālcietēšanas kamerā,  $K$  — klimatiskajā kamerā atveidnoti,  $K_v$  — klimatiskajā kamerā neatveidnoti)

Iegūtie rezultāti liecina par betona paraugos noteiktā ultraskaņas ātruma un materiāla mitruma daudzuma savstarpējās sakarības nelineāro raksturu.

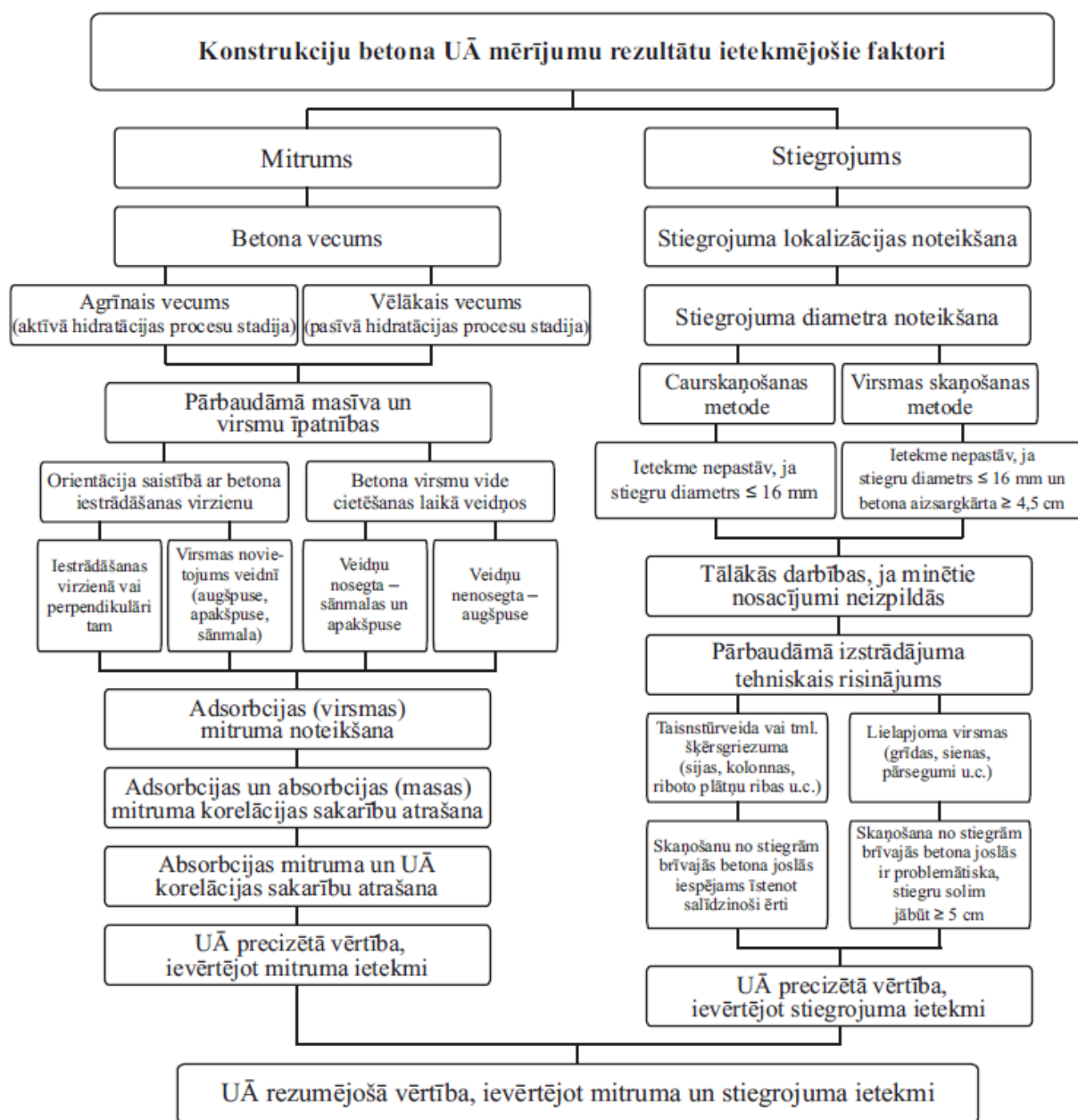
### 3. Metodoloģija ultraskaņas impulsu metodes pielietošanai konstrukciju betona stiprības novērtēšanā

Apkopojot eksperimentālā veidā iegūtos pētījumu rezultātus, izstrādāta metodoloģija ultraskaņas impulsu metodes pielietošanai konstrukciju betona stiprības novērtēšanā. Metodoloģija ietver divas metodikas, kas aprakstītas 3.1. un 3.2. nodaļās. Izstrādātajam četrargumentu vairākkopu funkciju algoritmam izpildīta matemātiskā modelēšana, kas parāda, kādos gadījumos ultraskaņas izplatīšanās ātruma koeficienta  $k_v$  vērtības iespējams aprēķināt pie tādām ietekmējošo faktoru kombinācijām, pie kurām eksperimenti nav veikti, skat. 3.3. nodaļu. Savukārt 3.4. nodaļā doti uzskatāmi piemēri tam, kādas neprecizitātes var rasties, veidojot ultraskaņas ātruma un betona spiedes stiprības korelācijas sakarības, ja netiek ievērota izstrādātā metodoloģija.

#### 3.1. Konstrukciju betona ultraskaņas ātruma analīzes metodika mitruma un stieģrojuma ietekmes ievērtēšanai

Vadoties pēc eksperimentālā veidā iegūtiem rezultātiem, izstrādāta metodika ultraskaņas ātruma mērījumu veikšanai konstrukciju betonā, ņemot vērā stieģrojuma un mitruma ietekmi.

Ultraskaņas mērijumu izpildes priekšraksts koncentrētā veidā apkopots 2. attēlā — blokshēmā attiecīgo faktoru ietekmes pozīcijas sakārtotas izslēgšanas secībā virzienā no augšas uz leju.



2. att. Mitruma un stiegrojuma faktoru ievērtēšanas shēma precīza ultraskaņas ātruma (UĀ) iegūšanai stiegrota betona konstrukcijās

Būtiska nozīme iegūto ultraskaņas ātruma datu interpretācijā ir konstrukciju betona ātrai atveidošanai. Cementakmens hidratācijas procesu aktīvajā stadijā apkārtējās vides paaugstinātā temperatūra pārbaudāmā betona virsmā var radīt būtisku ultraskaņas ātruma samazināšanos. Tas saistāms ar materiāla virsējā slāņa strauju izzūšanu, ja betonu atveidņo līdz 2 dienu vecumam. Tādējādi dažu milimetru biezā betona virskārta raksturojas ar daudz zemāku struktūras

blīvumu, kas būtiski kavē ultraskaņas viļņu izplatīšanos. Šādos gadījumos izžuvušo virsslāni nepieciešams nokalt un skaņošanu īstenot zem tā esošajam betonam.

Pārbaudot konstrukciju betonu, jāreķinās ar kompleksu stieģrojuma un mitruma faktoru iedarbību, un nevienam no tiem nav dodama priekšrocība.

### **3.2. Ultraskaņas izplatīšanās ātruma analīzes metodika konstrukciju betona stiprības raksturošanai, ievērtējot betona cietēšanas vides, vecuma, mitruma un apkārtējās vides temperatūras faktoru savstarpējo mijiedarbību**

Datorprogrammā apkopoti šā promocijas darba laikā vairākos pētījumos iegūtie rezultāti, dažādiem betona sastāviem analizējot galveno fizikālo faktoru savstarpējo pakārtotību. Konstatēts, ka mērījumu rezultātus visbūtiskāk ietekmē betona mitrums. Tieši tā izmaiņas lielā mērā nosaka pārējo fizikāli mehānisko u. c. raksturlielumu ietekmes pakāpi uz ultraskaņas izplatīšanās ātrumu betonā. Datorprogramma ietver metodiku korektu ultraskaņas ātruma datu iegūšanai, ja dažādās vidēs cietējušu betona skaņošanu, izmantojot virsmas skaņošanas metodi, izpilda dažādā vecumā, turklāt esot arī atšķirīgai temperatūrai un mitrumam. Pielietojot šādu pieeju, pētāmajam betonam iespējams daudz korektāk izveidot ultraskaņas ātrums un stiprības īpašību savstarpējās korelācijas sakarības.

#### **3.2.1. Četrargumentu vairākkopu funkciju algoritms**

Algoritms izstrādāts praksē visbiežāk pielietotai virsmas skaņošanas metodei, ja pārbaudēs izmanto garenviļņu un virsmas viļņu impulsus. Izstrādātā mērījumu metodika ietver ultraskaņas ātruma izmaiņu koeficienta  $k_V$  funkciju, kas satur četrus argumentus — betona cietēšanas vidi  $c$ , cementakmens hidratācijas procesa stadiju (jeb betona vecumu)  $t$ , betona mitrumu  $W$  un apkārtējās vides temperatūru  $T$ :

$$k_V = f(c; t; W; T). \quad (1)$$

Eksperimentāli pierādīts, ka ultraskaņas ātruma izmaiņas novērojamas konkrētos apstākļos,  $k_V$  funkcijas argumentiem definētas šādas apakšpozīcijas:

✓ betona cietēšanas vide  $c$ : 1) normālos apstākļos (pie apkārtējās vides temperatūras  $+18 \pm 2$  °C un gaisa relatīvā mitruma 95...100 %)  $c_n$ ; 2) paaugstinātas apkārtējās vides temperatūras apstākļos (līdz  $+30$  °C, gaisa relatīvajam mitrumam nepārsniedzot 50 % robežu)  $c_d$ ; 3) pazeminātas temperatūras apstākļos (pie gaisa temperatūras  $-18 \pm 2$  °C un gaisa relatīvā mitruma 65...75 %)  $c_f$ ;

✓ betona vecums  $t$ : 1) cementakmens hidratācijas procesu aktīvā stadija, t. i., betonam esot 3, 7, 14 un 28 dienu vecumā — attiecīgi  $t_3, t_7, t_{14}, t_{28}$ ; 2) cementakmens hidratācijas procesu pasīvā stadija, 56 un 1000 dienu vecam betonam — attiecīgi  $t_{56}$  un  $t_{1000}$ ;

✓ betona mitrums pēc masas  $W$ : 1) gaissaus betons, kura mitrums ir 2...3 % — attiecīgi  $W_2$  un  $W_3$ ; 2) mitrs betons (4...5 % — attiecīgi  $W_4$  un  $W_5$ ); 3) ar ūdeni maksimāli piesātināts betons (5...6 % — attiecīgi  $W_5$  un  $W_6$ );

✓ apkārtējās vides gaisa temperatūra  $T$ : 1)  $-20...0$  °C —  $T_{-20...0}$  — sala iedarbības diapazons jeb cementakmens hidratācijas procesi apstājušies; 2)  $+1...+9$  °C —  $T_{+1...+9}$  — cementakmens hidratācijas procesu norisei pazemināta temperatūra; 3)  $+10...+20$  °C —  $T_{+10...+20}$  — cementakmens hidratācijas procesu norisei labvēlīga temperatūra; 4)  $+21...+30$  °C —  $T_{+21...+30}$  — cementakmens rukuma procesus veicinoša temperatūra.

Izstrādātajā modelī netiek ietverti sausa betona gadījumi (pie mitruma pēc masas 0...1 %), kas neatbilst praksē iespējamai situācijai. Savukārt apkārtējās vides temperatūra tiešā mērā ir saistīta ar betona temperatūru. Visbūtiskāk tas izpaužas negatīvas temperatūras gadījumā. Eksperimentu laikā betona paraugi tikuši skaņoti sasaldēti visā tilpumā. Tādējādi ultraskaņas ātruma izmaiņu koeficienta vērtību pielietošanā jābūt īpaši uzmanīgam pie salīdzinoši augstām ārējā gaisa negatīvām temperatūrām (it sevišķi intervālā no  $-4$  °C līdz  $+4$  °C). Jābūt pārliecinātam par apskatāmā betona sasalšanu visā tilpumā, vadoties pēc būvelementa ģeometriskajiem parametriem un tā iespējamības sasalt pie attiecīgās gaisa temperatūras.

### 3.2.2. Ultraskaņas ātruma izmaiņu koeficienta $k_V$ pielietošana

Ultraskaņas ātruma izmaiņu koeficienti pieņemti, izpildot salīdzinājumu ar konkrētajā dienā ( $t_3, t_7, t_{14}, t_{28}, t_{56}$  un  $t_{1000}$ ) reālo ultraskaņas ātrumu, kāds noteikts, ja betonam cietēšanas laikā 28 dienu ilgumā, vai arī līdz skaņošanas izpildei attiecīgajā vecumā cementakmens hidratācijas procesu aktīvajā stadijā tiek nodrošināta attiecīga cietēšanas vide ( $c_n, c_d$  vai  $c_f$ ) un tālākajā ekspluatācijas laikā betons atrodas gaissausā vidē. Piemēram, normālcietēšanas apstākļos esošam betonam (cietēšanas vide —  $c_n$ ) līdz pat 28 dienu vecumam pieņemts, ka reālais ultraskaņas ātrums ( $k_V = 1$ ) ir pie betona mitruma  $W = 5$  %, bet 1000 dienu vecumā — betona mitrumam esot 3 %. Katrai cietēšanas videi šie rādītāji koeficienta vieninieka pozīcija nedaudz atšķiras, taču jebkurā gadījumā tie attiecināmi uz cementakmens hidratācijas procesu norises labvēlīgo temperatūras intervālu —  $T_{+10...+20}$ . Četrargumentu funkciju koeficienta *vieninieku* gadījumi betonam dažādās cietēšanas vidēs ir šādi:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_V = f(c_n; t_3 \dots t_{28}; W_5; T_{+10\dots+20}) = 1 \\ k_V = f(c_n; t_{56}; W_4; T_{+10\dots+20}) = 1 \\ k_V = f(c_n; t_{1000}; W_2; T_{+10\dots+20}) = 1 \\ k_V = f(c_d; t_3 \dots t_{14}; W_5; T_{+10\dots+20}) = 1 \\ k_V = f(c_d; t_{28\dots56}; W_4; T_{+10\dots+20}) = 1 \\ k_V = f(c_d; t_{1000}; W_2; T_{+10\dots+20}) = 1 \\ k_V = f(c_f; t_3 \dots t_{28}; W_5; T_{+10\dots+20}) = 1 \\ k_V = f(c_f; t_{56}; W_4; T_{+10\dots+20}) = 1 \\ k_V = f(c_f; t_{1000}; W_2; T_{+10\dots+20}) = 1. \end{array} \right. \quad (2)$$

Datorprogrammas algoritmā ietverto funkciju kopskaits ir 360. Jānorāda, ka 161 gadījumā funkcijās esošo argumentu savstarpējās sakarības nav pakārtojamas nedz cementa kā hidrauliskas saistvielas cietēšanas procesu pamatprincipiem saistībā ar šim nolūkam vajadzīgo ūdens daudzumu un apkārtējās vides temperatūru, nedz arī galēji atšķirīgiem cietēšanas un apkārtējās vides temperatūras intervāliem ( $c_d - T_{-20\dots0}$  un  $c_f - T_{+21\dots+30}$ ). Šādi gadījumi atbilst vien modelēšanas nepieciešamībai zinātniskos pētījumos, un šajā datorprogrammā tamlīdzīgi funkciju vienādības iznākumi tiek formulēti kā *praksē nereāli*. Definētie koeficienta *viēnīeku* gadījumi ir 18 (pa 6 katrai cietēšanas videi, kas līdzvērtīgs funkcijās ietvertiem betona vecuma gadījumiem), bet citi  $k_V$  skaitlisko vērtību gadījumi — 181. Eksperimentālā veidā iegūtās koeficientu vērtības, raugoties no cietēšanas laikā esošās apkārtējās vides temperatūras viedokļa, apkopotas promocijas darba pilnās versijas 4.1. tabulā.

Iegūtais ultraskaņas ātruma izmaiņu koeficients  $k_V$  reizināms ar attiecīgajā betona vecumā un pie konkrētiem pārbaudes apstākļiem noteikto (nomērīto) ultraskaņas ātruma vērtību —  $V_{meas}$ . Pieņemts, ka ultraskaņas ātruma vērtības nosaka mērvienībās  $m/s$  vai  $km/s$ , taču šī aplēses metode zemāk norādītajā formulā ļauj izmantot arī citas ultraskaņas ātruma mērvienības. Ultraskaņas ātruma reālās vērtības  $V_{real}$  aprēķina formula ir šāda:

$$V_{real} = V_{meas} \cdot k_V. \quad (3)$$

Līdz ar to, izpildot mērījumus dažādos (tostarp ekstremālos) apstākļos, kas pat visai būtiski mēdz atšķirties no tiem, kādi novērojami reālā ultraskaņas ātruma noteikšanas gadījumā, izmantojot ultraskaņas ātruma izmaiņu koeficienta  $k_V$  vērtības, iespējams iegūt korektu ultraskaņas izplatīšanās ātrumu skaņotajā betonā.

Pieklūšana datorprogrammai «Ultraskaņas ātruma izmaiņu koeficienti un to pielietošana, ja dažādās vidēs cietējis betons, kas satur dažādu mitruma daudzumu, tiek skaņots atšķirīgā vecumā un pie dažādām apkārtējās vides temperatūrām» iespējama, izmantojot interneta pieslēgumu. Datorprogrammas vietne: <http://concrete.scienceontheweb.net>. Atverot to, būs redzams



izstrādātās datorprogrammas nosaukums latviešu un angļu valodās. Programmas aktivizēšanai attiecīgajā valodā jānoklikšķina peles kreisais taustiņš uz vienu no divām pozīcijām *Latviski* vai *English*. Apstiprinot darba valodu, datorprogrammas lietotājs nokļūst galvenās izvēlnes lapā, kur izvēlas tālākās darbības virzienu. Pastāv iespēja aktivizēt sadaļas *Priekšraksts datorprogrammas lietošanai* un *Koeficienta  $k_V$  aprēķins un reālā  $U\bar{A}$  iegūšana*, kurās izskaidrots soļu secīgums datorprogrammas lietošanai.

### 3.3. Lokāli svērtu polinomiālo aproksimāciju pielietojums eksperimentu rezultātu analīzē

Eksperimentālo datu apstrādē augstvērtīgus rezultātus uzrādīja lokāli svērtās polinomiālās aproksimācijas kvadrātiskās funkcijas:

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_1 + b_5x_1x_2 + b_6x_1x_3 + b_7x_2x_2 + b_8x_2x_3 + b_9x_3x_3, \quad (4)$$

kur  $x_1 = t$  — betona vecums;

$x_2 = W$  — betona mitrums;

$x_3 = T$  — apkārtējās vides temperatūra;

$a$  un  $b$  — empīriskie koeficienti.

Ultraskaņas ātruma izmaiņu koeficienta  $k_V$  noteikšanai dažādās vidēs cietējušam betonam aproksimācijā iegūti atšķirīgi empīriskie koeficienti. Koeficientu vērtības apkopotas promocijas darba pilnās versijas 127. lpp.

Iegūtie rezultāti liecina, ka aproksimācijas funkcijas iespējams izmantot betonam līdz 56 dienu vecumam. Savukārt, betonam esot vecumā no 56 līdz 1000 dienām, šīs aproksimācijas funkcijas nav piemērojamas eksperimentālo datu nepietiekamā apjoma dēļ. Minētajā betona vecuma intervālā ultraskaņas ātruma izmaiņu koeficientu vērtību izteikšanai iespējams pielietot lineāras sakarības,  $k_V$  datiem izpildot interpolāciju. Apkārtējās vides negatīvas temperatūras gadījumos korekti aproksimācijas rezultāti netika iegūti, t. sk., izpildot lokāli svērtās kubiskās funkcijas aproksimāciju, jo: 1) eksperimentālo datu apjoms bija ierobežots praksē nereālo gadījumu skaita dēļ; 2) mitruma piesātinātam un sasalušam betonam novērojams būtisks ultraskaņas ātruma palielinājums pie 6 % mitruma sliekšņa, salīdzinot ar rezultātiem, kas fiksēti līdz 5 % mitrumam.

Eksperimentālā un teorētiskā (aproksimēšanas) veidā iegūtie datu savstarpējā salīdzinājuma kļūdu  $\Delta_{vid}$  (%) absolūto vērtību vidējie lielumi atkarībā no betona cietēšanas apstākļiem un apkārtējās vides temperatūras apkopotas 2. tabulā.

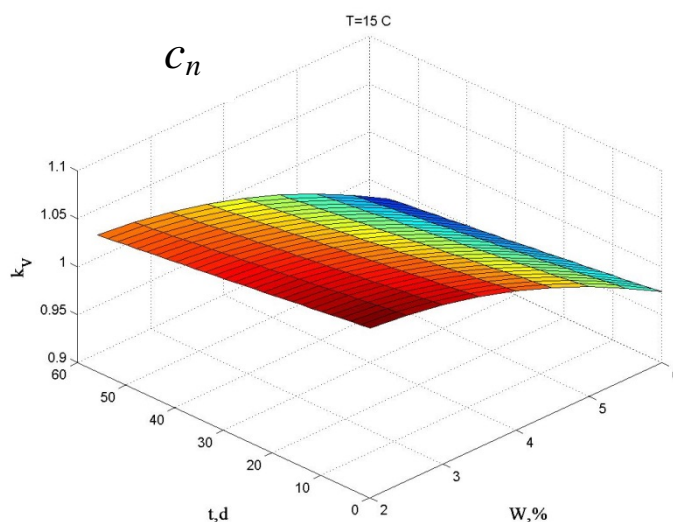
Apkopojot iepriekš teikto, secināms, ka iepriekš aprakstītās aproksimācijas iespējams pielietot tikai betonam līdz 56 dienu vecumam, kā arī pārbaudēs pie apkārtējās vides pozitīvām gaisa temperatūrām.

2. tabula

Ekspimentālā un aproksimēšanas veidā iegūto ultraskaņas ātruma izmaiņu koeficientu  $k_V$  savstarpējās atšķirības  $\Delta_{vid.}$  ( $\Delta_{min} \dots \Delta_{max}$ ), %, betonam atkarībā no cietēšanas apstākļiem un apkārtējās vides temperatūras

temperatūra cietēš. vide	$T_{-20\dots0}$	$T_{1\dots9}$	$T_{10\dots20}$	$T_{21\dots30}$
$c_n$	12,8 (0,50...39,3)	0,81 (0,20...2,07)	0,49 (0,06...0,85)	0,39 (0,01...1,10)
$c_d$	9,78 (0,03...42,3)	0,62 (0,13...1,19)	0,54 (0,01...1,52)	0,54 (0,00...1,45)
$c_f$	51,9 (0,77...107,3)	0,63 (0,09...1,70)	0,52 (0,03...1,61)	0,34 (0,02...0,80)

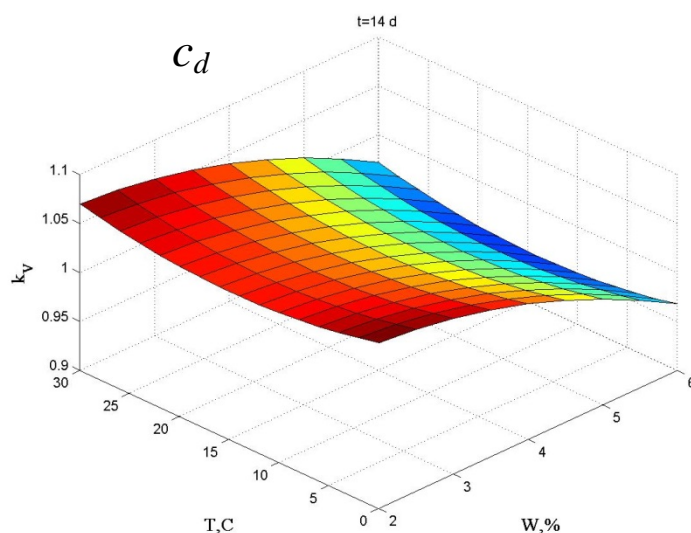
Kā parāda trīsdimensionālo sakarību modeļi, mitruma ietekme uz ultraskaņas izplatīšanos ātrumu betonā palielinās, pieaugot betona vecumam, skat. 3. att. Visos gadījumos ultraskaņas ātruma izmaiņu koeficienta vērtības ir gan lielākas, gan mazākas par 1 —  $c_n$  un  $c_d = 0,93\dots1,03$ ;  $c_f = 0,96\dots1,02$ . Betonam kļūstot vecākam, pieaug mitruma ietekmē ieviestās korekcijas ultraskaņas ātruma vērtības samazināšanai.



3. att. Trīsdimensionālais modelis ultraskaņas ātruma ietekmējošo faktoru sakarībām pie +15 °C temperatūras betonam, kas cietējis normālos apstākļos

Trīsdimensionālais modelis, kas izveidots betona mitruma un apkārtējās vides temperatūras savstarpējai ietekmei uz ultraskaņas ātruma izmaiņu koeficientu vērtību dažādās vidēs cietējumam betonam, parāda, ka apkārtējās vides temperatūras dimensijā salīdzinoši augstākas korek-

cijas koeficientu vērtības novērojamas 1...9 °C un 21...30 °C intervālos nekā pie 10...20 °C — šāda īpatnība saistāma ar to, ka betonam optimālas cietēšanas apstākļos piemērojami salīdzinoši zemāki koeficienti, jo šajā vidē betons uzrāda potenciāli augstāku ultraskaņas ātrumu (4. att.). Arī citā vecumā betonam līdz 56 dienām noteiktas līdzīgas sakarības.



4. att. Trīsdimensionālais modelis ultraskaņas ātruma ietekmējošo faktoru sakarībām 14 dienu vecam betonam, kas cietējis paaugstinātas apkārtējās vides temperatūras apstākļos

Promocijas darba pilnajā versijā iepriekš minētie trīsdimensionālie modeļi doti arī citās vidēs cietējušam betonam, skat. P.32. att. un P.33. att. Tāpat trīsdimensionālie modeļi norādīti arī ultraskaņas ātruma ietekmējošo faktoru savstarpējām sakarībām pie 5 % mitruma, skat. P.34. att. Savukārt betona mitruma un vecuma savstarpējām sakarībām pie dažādām apkārtējās vides temperatūrām izveidots attēlojums aksonometrijā, skat. P.35. att.

### 3.4. Iespējamo kļūdu rašanās iemeslu piemēri betona spiedes stiprības novērtēšanā, pielietojot ultraskaņas ātruma mērījumu datus bez konkrētu ietekmes faktoru ievērtēšanas

Betona mitruma, apkārtējās vides paaugstinātas un negatīvas temperatūras savstarpējai mijiedarbībai cementakmens hidratācijas procesa aktīvajā un pasīvajā stadijā var būt ļoti būtiska ietekme uz ultraskaņas izplatīšanās ātrumu betonā, tāpēc doti piemēri ultraskaņas ātruma atšķirībām vienāda sastāva betonam (tādējādi izslēdzot betona ingredientu īpašību ietekmi uz ultraskaņas izplatīšanās ātrumu), to pārbaudot dažādos apkārtējās vides apstākļos. Betona skaņošana izpildīta ar vienu un to pašu ultraskaņas testeru — «UK-1401» —, līdz ar to izslēgta arī

mēraparatūras tehnisko parametru un kalibrēšanas iestatījumu ietekme uz ultraskaņas izplatīšanās ātrumu betonā.

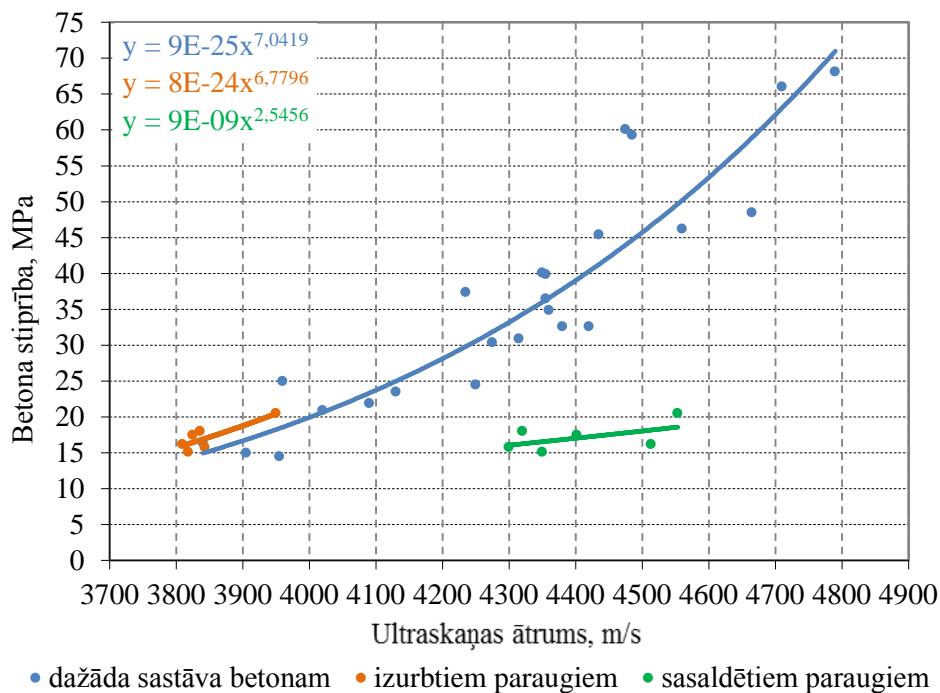
Visbūtiskākās ultraskaņas ātruma izmaiņas novērojamas, betonu skaņojot negatīvā temperatūrā un pie atšķirīga mitruma, tāpēc apskatīts, kādas neprecizitātes var rasties betona spiedes stiprības rādītāju interpretācijā, ja ultraskaņas ātrums noteikts betonam, kas: sākot no 3 dienu vecuma bijis pakļauts pazeminātas temperatūras iedarbībai; sasalušā stāvoklī būvobjektā ticis pārbaudīts 28 dienu vecumā, bet atlaidinātā stāvoklī — 29 dienu vecumā laboratorijas apstākļos; norādītajā vecumā saturējis attiecīgi 4,8...5,4 % absolūto mitrumu pēc masas; 28 dienu vecumā pārbaudīts gaisa temperatūrā  $-20...0$  °C, bet 29. dienā — temperatūrā  $+10...+20$  °C. Tādējādi skaņojamam betonam 28 un 29 dienu vecumā piemērojamas attiecīgi šādas ultraskaņas ātruma izmaiņu koeficienta  $k_V$  funkcijas:

$$k_V = f(c_n; t_3; W_5; T_{-20...0}) \text{ un } k_V = f(c_f; t_{28}; W_5; T_{+10...+20}). \quad (5)$$

Betonam esot 28 dienu vecam, objektā uz vietas kopumā izraudzījās 6 mērvietas. Katrā no tām betonu skaņoja sasaldētā stāvoklī. Šajā vecumā mērvietu zonās izurba 6 cilindrveida paraugus, kuriem pēc betona struktūras atlaidināšanas UĀ laboratorijas apstākļos noteica 29 dienu vecumā. Pēc attiecīgiem sagatavošanas darbiem laboratorijā betona paraugiem spiedes stiprību  $f_c$  noteica 32 dienu vecumā.

Iegūtie rezultāti liecina, ka sasaldētā stāvoklī ultraskaņas izplatīšanās ātrums betonā ir par 16,3...20,8 % lielāks nekā atlaidinātā stāvoklī vienu diennakti vēlāk (skat. promocijas darbā P.40. tabulu).

Apskatāmā betona ražotāju produkcijai pie nemainīgām ingredientu īpašībām ilgākā laika periodā uzkrātas mainīgo «ultraskaņas ātrums – spiedes stiprība» savstarpējās korelācijas sakarības plašā spiedes stiprības intervālā — 14,5...68,1 MPa. Korelāciju līknes dažādas stiprības betonam, kā arī izurbtajiem betona paraugiem atlaidinātā stāvoklī un konstrukciju betonam sasaldētā stāvoklī, redzamas 5. att. Iegūtie spiedes stiprības un ultraskaņas izplatīšanās ātruma korelācijas koeficienti: ražotāju piegādātajam dažāda sastāva betonam — 0,91; izurbto cilindrveida paraugu betonam — 0,85, sasaldētam betonam — 0,56.



5. att. Ultraskaņas ātruma un spiedes stiprības savstarpējās korelācijas sakarības konkrētā ražotāja betonam: sastāviem ar dažādu spiedes stiprību pie nemainīgām ingredientu īpašībām; izurbtajiem betona paraugiem atļaidinātā stāvoklī; sasaldētam betonam

Vadoties pēc 5. att. redzamām sakarībām, sasaldētam betonam pēc ultraskaņas izplatīšanās ātruma novērtētā spiedes stiprība ir par 22,7...36,6 MPa augstāka nekā tā fiksēta reāli. Līdz ar to spiedes stiprība caurmērā tiks novērtēta kā 3 reizes augstāka, ja to salīdzina ar rādītājiem kādi iegūti, spiedes robežstiprību nosakot no konstrukcijas izurbtajiem betona paraugiem. Saprātams, ka šādas būtiskas neprecizitātes var radīt neprognozējamas sekas būvobjektos, ja, vadoties pēc nekorekti iegūtās, būtiski augstākās betona stiprības, tiks pieņemts lēmums par konstrukciju priekšlaicīgu atveidnošanu, noslogošanu vai tml.

#### 4. Izstrādātās metodoloģijas ieguldījums Latvijas Republikas tautsaimniecības būvniecības nozarē

##### 4.1. Izstrādātās metodoloģijas tautsaimnieciskais efekts

Promocijas darbā izstrādātās metodoloģijas tautsaimnieciskais efekts būvniecības nozarei Latvijas Republikā aprēķināts: 1) salīdzinot darbu izmaksas, ja betona stiprības novērtēšanu objektā izpilda, šim nolūkam pielietojot vai nu ultraskaņas impulsu metodi, vai arī no konstrukcijām izurbto betona spiedes stiprības pārbaudi laboratorijas apstākļos; 2) ņemot vērā izpildāmos papildu darbus, ja konstrukciju betonā noteiktais ultraskaņas izplatīšanās ātrums ticis interpretēts nekorekti.

Apkopojot aprēķinātās darbu izmaksas Latvijas Republikā viena gada griezumā, secināms, ka: 1) izpētes veikšana ar ultraskaņas aparāturu salīdzinājumā ar no konstrukcijām iegūstamo betona paraugu spiedes stiprības pārbaudi dod ekonomisko efektu 24859,50 EUR apmērā. Turklāt vēl jāņem vērā konstrukciju monolītuma pakāpes vājināšanās, kas rodas paraugu izurbšanas procesā; 2) izvairoties no papildu darbu izpildes, iegūtais ekonomiskais efekts ir 9167,00 EUR. Šajā gadījumā darbu izmaksu aprēķinā nav iespējams ietvert dīkstāves izmaksas jaunbūvē, kas rodas apsekošanas rezultātu apkopošanas periodā.

Līdz ar to Latvijas Republikas tautsaimniecībai viena gada griezumā aprēķinātais ekonomiskais efekts, ko sniedz promocijas darba rezultātā izstrādātā metodoloģija dzelzsbetona konstrukciju betona stiprības novērtēšanai, pielietojot ultraskaņas impulsu metodi, ir 34026,50 EUR.

#### **4.2. Rekomendācijas papildinājumiem standartam LVS EN 12504-4:2005 L «Betona testēšana — 4. daļa: Ultraskaņas impulsa ātruma noteikšana»**

Saistībā ar promocijas darbā iegūtiem izpētes rezultātiem sagatavoti ieteikumi standartā LVS EN 12504-4:2005 L atrodamās informācijas papildināšanai. Ieteikumi iedalāmi divās grupās. Pirmā no tām ir saistāma ar standarta darbības sfēru, prasībām iekārtu lietošanai, procedūru, rezultātu izteikšanu un testēšanas pārskatu noformēšanai izvirzītām prasībām:

1. paplašināma standarta darbības sfēra. Relatīvi noteiktās sakarības dažādiem ultraskaņas viļņu veidiem nav būtiski atšķirīgas. Tādējādi 1. punktā jānorāda, ka standarts attiecināms arī uz ultraskaņas impulsa šķērsviļņu un virsmas viļņu izplatīšanās ātruma noteikšanu sacietējušā betonā;
2. iekārtu apraksta 5.2. punktā, kas nosaka ekspluatācijas prasības, jāpaaugstina precizitāte ultraskaņas impulsa izplatīšanās laika noteikšanai — no 2 % uz 1 %. Norādei: «Iekārta ir jāizmanto ekspluatācijas apstākļos, kurus noteicis izgatavotājs» klāt pievienojama atsauce uz informāciju B pielikumā, kur atrunāta ultraskaņas iekārtu korekta izmantošana sasaluša un būtiski ar mitrumu piesātināta betona testēšanai būvobjektos;
3. procedūras 6.1.2. punktā izpildāma korekcija betona virsmas pārbaudes terminam *virsmas caurskaņošana*. Piemērotāks termins ir *virsmas skaņošana*, jo šīs metodes pielietojumā devēju novietojums uz vienas un tās pašas betona virsmas nenodrošina pārbaudāmā objekta betona masīva caurskaņošanu. Turklāt terminu veidojošais vārds *caurskaņošana* var radīt neprecīzu priekšstatu par pārbaudei izmantojamo metodi. Nav pieņemama teikuma daļa: «Netiešās caurskaņošanas izvietojums ir vismazāk jūtīgs...». Eksperimentāli pierādīts, ka virsmas skaņošanas gadījumā pastāv salīdzinoši daudz vairāk faktoru, kas ietekmē mērījumu rezultātu precizitāti, jo to salīdzina ar caurskaņošanas metodi;

4. procedūras 6.1.3. punktā tiešās caurskaņošanas gadījumā nosakāmā ultraskaņas impulsa ceļa garuma mērījumu pieraksta precizitāte jāpaaugstina no  $\pm 1\%$  uz  $\pm 0,1\%$ ;
5. tiešās un vairākvirzienu caurskaņošanas impulsa izplatīšanās ātruma noteikšanai standarta 7. punktā jāpievieno piezīme, ka ultraskaņas izplatīšanās laikā jāievērtē impulsa aizture, ko ierosina mērierīces devēji. (Ne vienmēr ultraskaņas laika noteikšanā mērierīces automātiski ievērtē impulsa aizturi, it sevišķi tas attiecināms uz oscilogrāfa tipa aparāturu);
6. standarta 8. punktā, kur norādītas mērījumu rezultātu apkopojošā testēšanas pārskatā iekļaujamās pozīcijas, jāpapildina ar pozīciju *betona mitrums*. Papildus jānorāda: betona mitruma noteikšanas metode (mērierīces modelis, tips, mērījumu diapazons); betona kopšanas apstākļi cietēšanas brīdī un apkārtējās vides temperatūra, ja tiek skaņots betons līdz 56 dienu vecumam.

Apskatāmā standarta papildinājumu otrā grupa attiecināma uz B pielikumu, kur norādīti faktori, kas ietekmē impulsa izplatīšanās ātruma noteikšanu. Ieteikumi attiecināmi uz B.2. punktu, kas papildināms ar šādām norādēm: «Mitruma ietekmes pakāpe ir atkarīga no pārbaudāmā betona vecuma. Agrīnā vecumā, kad betona struktūrā hidratācijas reakcijām nepieciešamais ūdens vēl nav pilnībā saistījies, pie relatīvi mazākām mitruma daudzuma izmaiņām ultraskaņas ātrums izmainīsies daudz straujāk. Betonam esot vēlākā vecumā, sakarība «betona mitrums — ultraskaņas ātrums» atšķirsies no agrīna vecumā noteiktās. Pielietojot virsmas skaņošanas metodi, būtiskas ultraskaņas ātruma izmaiņas pārbaudāmajā betonā novērojamas, kad gandrīz sasniegts maksimālais piesātinājums ar ūdeni. Pirms ultraskaņas ātruma mērījumu izpildes pārbaudāmajam betonam obligāti nosakāms virsmas mitrums, kuram vēlams izveidot korelācijas sakarību ar betona ūdensuzsūci pēc masas vai tilpuma.»

## SECINĀJUMI

Promocijas darbā noteikta mitruma, temperatūras un stieģrojuma ietekme uz ultraskaņas izplatīšanās ātrumu stieģrota betona konstrukcijās. Novērtēta šo faktoru kompleksa iedarbība. Apkopojot pētījumu rezultātus, izstrādāta ultraskaņas izplatīšanās ātruma izmaiņu koeficienta datorprogramma, kuras četrargumentu vairākkopu funkcijas algoritms ietver betona cietēšanas vidi, cementakmens hidratācijas procesa stadiju (jeb betona vecumu), betona mitrumu un apkārtējās vides temperatūru. Noteikts, kādos gadījumos koeficienta vērtību aplēsē var pielietot aproksimācijas metodi. Doti priekšlikumi Latvijas Republikā patlaban spēkā esošā standarta LVS EN 12504-4:2005 L «Betona testēšana — 4. daļa: Ultraskaņas impulsa ātruma noteikšana» papildināšanai ar konkrētu informāciju. Darbā iegūtās informācijas korekta izmantošana

būtiski samazinās iespējamo kļūdu rašanos ultraskaņas ātruma mērījumu datu interpretācijā saistībā ar betona stiprības rādītāju novērtēšanu.

1. Noteikts, ka absolūti sausā un ar ūdeni maksimāli piesātinātā stāvoklī esošam betonam ultraskaņas ātruma savstarpējās atšķirības vidēji sasniedz 19 %. Pielietojot virsmas skaņošanas metodi, ultraskaņas ātrumam fiksēts 9 % pieaugums brīdī, kad gandrīz saņiegts betona maksimālais piesātinājums ar ūdeni. Caurskaņošanas metodes gadījumā šāda sakarība nav fiksēta.
2. Noteikts, ka caurskaņošanas metodes gadījumā ultraskaņas izplatīšanās ātruma palēnināšanās betonā stiegrojuma ietekmē sasniedza 7 %. Betona virsmas skaņošanas gadījumā iecirkņos, kur izvietotas stiegras ar diametru līdz 16 mm, minētā faktora ietekme nav konstatēta, savukārt 22 mm stiegru joslās attiecīgi fiksēts ievērojams ultraskaņas izplatīšanās ātruma samazinājums (līdz pat 10 %).
3. Eksperimentāli pierādīts, ka, betonam cietējot gaisa temperatūrā virs  $+30 \pm 2$  °C, virsējos slāņos izveidojušies defekti — palielinātā cementakmens porainība un/vai mikropļaisas — kavē ultraskaņas viļņu izplatīšanos. Šo defektu ietekmē ultraskaņas izplatīšanās ātrums betonā var samazināties pat par 7 %.
4. Sala ietekme uz ultraskaņas izplatīšanās ātrumu betonā cementakmens hidratācijas procesu aktīvajā stadijā ir praktiski identiska gan caurskaņošanas, gan virsmas skaņošanas gadījumā. Noteikts, ka ultraskaņas ātrums samazinās, pieaugot betona vecumam. Sala ietekme uz ultraskaņas izplatīšanās ātrumu normālā vidē cietējušā betonā vairs nepastāv, materiālam sasniedzot 28 dienu vecumu. Sasaldētam betonam 3 līdz 28 dienu vecumā konstatēts ļoti liels ultraskaņas izplatīšanās ātrums (atļaidinātam betonam tas ir aptuveni 2 reizes mazāks).
5. Noteikts, ka ultraskaņas ātruma palielinājums, ko rosina mitruma un sala mijiedarbība, sasniedz 34 %. Sasaldējot vidē ar relatīvo gaisa mitrumu līdz 40 % trīs gadus izturētus betona paraugus, ultraskaņas ātruma izmaiņas netika konstatētas. Betonam, kura absolūtais mitrums sasniedza pat 4,5 % (no masas), sasaldēšanas ietekme uz ultraskaņas izplatīšanās ātruma izmaiņām nebija būtiska un nepārsniedza 1 %.
6. Izstrādāta blokshēma ultraskaņas izplatīšanās ātruma novērtēšanai betonā, ņemot vērā mitruma un stiegrojuma faktoru ietekmi. Noteikts, ka mitruma ietekme atkarīga no betona vecuma un iestrādāšanas virziena, kā arī skaņojamo virsējo slāņu īpašībām saistībā ar apskatāmās konstrukcijas atveidņošanas laiku. Stiegrojuma ietekme atkarīga no tā lokalizācijas, šķērsriezuma parametriem un pārbaudāmās konstrukcijas tehniskā risinājuma.



7. Izstrādāts četrargumentu vairākkopu funkcijas algoritms un datorprogramma ultraskaņas izplatīšanās ātruma datu apstrādei konstrukciju betona stiprības novērtēšanai. Algoritms ietver ultraskaņas ātruma izmaiņu koeficienta  $k_V$  četrargumentu funkciju, kurā ietilpst betona cietēšanas vide, cementakmens hidratācijas procesa stadija (jeb betona vecums), betona mitrums un apkārtējās vides temperatūra diapazonā no  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  līdz  $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , kas ļauj iegūt korektu ultraskaņas izplatīšanās ātrumu skaņotajā betonā, izslēdzot galveno fizikālo un fizikāli ķīmisko faktoru ietekmi.
8. Lokāli svērtām polinomiālām aproksimācijas kvadrātiskām funkcijām iegūti atšķirīgi empīriskie koeficienti ultraskaņas izplatīšanās ātruma izmaiņu koeficienta  $k_V$  noteikšanai dažādās vidēs cietējušam betonam. Aproksimācijas funkcijas iespējams izmantot betonam līdz 56 dienu vecumam, bet laika posmā no 56 līdz 1000 dienām koeficienta  $k_V$  vērtību izteikšanai iespējams pielietot lineāras sakarības. Konstatēts, ka apkārtējās vides negatīvas temperatūras gadījumā korekti aproksimācijas rezultāti nav iegūstami.
9. Izstrādāti papildinājumi patlaban Latvijas Republikā spēkā esošajam standartam LVS EN 12504-4:2005 L «Betona testēšana — 4.daļa: Ultraskaņas impulsa ātruma noteikšana», lai praksē izvairītos no iespējamām kļūdām ultraskaņas izplatīšanās ātruma datu interpretācijā saistībā ar betona stiprības novērtēšanu. Standartā jānorāda, ka ultraskaņas ātruma mērījumu rezultātus var ietekmēt pielietotā skaņošanas metode, kā arī konkrētu fizikālo un fizikāli ķīmisko procesu savstarpējās mijiedarbības. Ultraskaņas ātruma aprēķināšanas metodikā jānodrošina norāde uz impulsa aiztures ievērošanas nepieciešamību.

## **REKOMENDĀCIJAS**

1. Izpildot mērījumus ar ultraskaņas aparāturu, nepieciešams iegūt informāciju par apskatāmā betona vecumu, mitrumu un temperatūru pārbaudes brīdī, kā arī par tā cietēšanas apstākļiem un sastāvā esošo ingredientu īpašībām. Jebkurš izstrādājums rezultātu salīdzināšanai skaņojams visās pieejamās skaldnēs, vienlaikus tām nosakot virsmas mitruma daudzumu. Attiecībā pret pārbaudāmās konstrukcijas noblīvēšanas (iestrādāšanas) un noslogošanas virzienu, mērierīču adapteru ass jānoorientē paralēli un perpendikulāri. Šādas mērījumu metodikas ievērošana būtiski veicinās ultraskaņas izplatīšanās ātruma mērījumu rezultātu korektu interpretāciju saistībā ar betona viendabības un stiprības rādītājiem.
2. Dzelzsbetona konstrukcijām nosakot ultraskaņas izplatīšanās ātrumu betonā, jāņem vērā apskatāmajā masīvā esošā stiegrojuma ietekme. Kolonnu, siju, riboto plātņu ribu

- un līdzīga risinājuma konstrukciju betona caurskaņošanā korektus rezultātus iegūs vienīgi tad, ja ultraskaņas impulsa ceļā neatradīsies nesošais jeb t. s. darba stiegrojums. Savukārt grīdas, pārseguma un sienu konstrukcijām izpildot virsmas skaņošanu, stiegrojuma ietekmi vairumā gadījumu var neņemt vērā, ja betona aizsargkārtā ir vismaz 4 cm.
3. Lai noteiktu mitruma daudzumu betonā un izslēgtu neprecizitātes iegūto ultraskaņas datu interpretācijā (veidojot ultraskaņas ātruma un absolūtā mitruma savstarpējās sakarības), pārbaudēs pielietojami betona virsmas mitruma mērītāji ar mērījumu diapazonu 0...8 %.
  4. Betonam cietējot augstākās temperatūrās nekā tas nepieciešams cementakmens hidratācijas procesu normālai norisei, būtiska nozīme iegūto ultraskaņas izplatīšanās ātruma datu interpretācijā ir betona izstrādājumu ātrai atveidošanai (līdz 2 dienu vecumam). Konstrukciju betona virsējos slāņos noteiktais ultraskaņas ātrums var būt mazāks kā citviet masīvā. Šādos gadījumos, lai iegūtu korektus datus par konstrukcijas masīvu kopumā, pirms betona skaņošanas tā izžuvušais virsslānis jānoņem (jānokaļ).
  5. Vienu un to pašu korelācijas sakarību izmantošana dažādām ultraskaņas mērierīcēm nav pieļaujama — betonam noteiktās spiedes stiprības un ultraskaņas izplatīšanās ātruma savstarpējās korelācijas sakarības katrai konkrētai ultraskaņas mērierīcei jānosaka atsevišķi. Pat ar viena tipa dažādām mērierīcēm noteiktās betona ultraskaņas ātruma absolūtās vērtības ir stingri individuālas, turklāt, ultraskaņas izplatīšanās ātrumam samazinoties vai palielinoties par 5 %, betona stiprība var izrādīties attiecīgi mazāka vai lielāka pat par 50 %.
  6. Betona faktisko stiprību novērtēt tikai un vienīgi ar ultraskaņas metodi praktiski nav pieļaujams — vienlaikus jāpielieto vismaz vairākas materiālu negraujošās pārbaudes metodes.

## **GENERAL DESCRIPTION OF THE RESEARCH**

### **Topicality of the Research and Formulation of the Problem**

There is the growing number of new buildings and engineering structures where concrete and reinforced concrete are the basic materials, while the technical condition of previously built constructions deteriorates. Thus, the number of the objects for investigation and testing increases significantly, and the results of testing need to be evaluated in the shortest time possible. Therefore, it is advantageous to use nondestructive test methods for determination of the technical condition of structures. For this reason, an increasing attention has been paid to the improvement and approbation of the nondestructive test methods.

The evaluation of results obtained through measurements with nondestructive testing equipment and their interpretation are still up to those who carry out the tests. As the concrete structure is quite complicated and the properties of this structure can vary due to environmental conditions and the presence of cracks, the obtained results are quite different. It is, therefore, necessary to recognize the influence of the concrete structure and environment on the measurement values.

In practice, mainly one parameter is chosen for the characterization of the technical condition of the reinforced concrete constructions — the strength of concrete. For the determination of this parameter in reinforced concrete structure tests various ultrasonic velocity measuring devices can be used. However, the current standards on the preconditions of correct performance of ultrasonic measurements and the interpretation of the results provide rather scarce information. The data obtained during investigation of various construction sites suggest a considerable influence of moisture and other factors on the ultrasonic pulse velocity. Ignoring these affecting factors can contribute to misinterpretation of measurement data. Being not aware of these affecting factors, civil engineers usually interpret the measurements in a superficial way, carrying out an inaccurate evaluation of the properties of the tested concrete.

In previous studies, various exploitation conditions as well as physical and physico-chemical factors that influence the ultrasonic pulse velocity in concrete were usually analyzed separately. However, research results of each individual factor do not promote the correct interpretation of measurement data if the possible interaction of factors affecting the ultrasonic pulse velocity is not taken into account.

In order to significantly reduce the risk of errors in the interpretation of concrete compressive strength in reinforced concrete structures, it is necessary to develop a new methodology for ultrasonic pulse velocity determination, which would include the influence of main phy-

siccation and physico-chemical factor interaction on the propagation of ultrasonic pulse velocity in concrete. Such a methodology should be considered a precept for carrying out relevant research.

### **The Aim of the Doctoral Thesis**

The aim of the Doctoral Thesis is to develop a methodology for the analysis of the propagation of ultrasonic pulse velocity, considering the interaction of the main factors — moisture of concrete, reinforcement, elevated and negative ambient temperature — in relation to the curing condition and the age of concrete in order to evaluate the strength of concrete in structures.

### **The Tasks of the Doctoral Thesis**

To achieve the aim of the present research, first the impact of each individual factor (moisture, ambient temperature and reinforcement) on propagation of ultrasonic velocity in concrete is determined in relation to the curing condition and the age of concrete. Then, after processing the obtained results, an algorithm is developed, which includes the interaction of main factors affecting the ultrasonic pulse velocity in concrete. Applying the algorithm, an approximation is performed for the data obtained.

The following tasks have been set for the present research:

1. To define the interaction of concrete moisture, reinforcement, elevated and negative ambient temperature influence on the propagation of ultrasonic velocity in concrete during the active and passive phases of cement hydration process;
2. To develop the analysis method of ultrasonic pulse velocity for concrete in structures, considering the effect of moisture and reinforcement;
3. To develop a practically applicable computer program for processing the data of ultrasonic pulse velocity, which considers the concrete curing condition, age, temperature and moisture in relation to the evaluation of concrete strength in structures;
4. To determine the cases in which experimentally obtained data can be granted an approximation function in order to calculate the combinations of parameter values for affecting factors of ultrasonic pulse velocity, in which experiments have not been performed;

5. To evaluate whether the guidance provided in the standard LVS EN 12504-4:2005 L “Testing Concrete — Part 4: Determination of Ultrasonic Pulse Velocity” can be regarded as sufficient for determining the technical condition of concrete.

### Scientific Novelty of the Research

The Doctoral Thesis is based on the experimentally obtained interactions of factors affecting the ultrasonic pulse velocity. Different exploitation conditions as well as physical and physico-chemical factors that affect the ultrasonic pulse velocity in concrete are analyzed in interconnection. The results of research of each specific factor and its influence contribute to the interpretation of measurement data sufficiently correct only when they take into account the interaction of these and other affecting factors of ultrasonic pulse velocity. The developed computer program includes research findings, analyzing main physical and physico-chemical factor interdependent subordination in different concrete mixes.

The computer program is referred to an ultrasonic indirect transmission method, if for sounding longitudinal and surface wave pulses are applied. The algorithm of computer program includes the four-argument functions of ultrasonic pulse velocity correction coefficient  $k_V$ , comprising concrete curing condition  $c$ , phase of cement hydration process (or concrete age)  $t$ , concrete moisture  $W$  and ambient temperature  $T$ :

$$k_V = f(c; t; W; T) . \quad (1)$$

The computer program calculates the actual ultrasonic pulse velocity value  $V_{real}$ , considering the value of the  $k_V$  coefficient. Hence, it is possible to compare the discrepancies in ultrasonic pulse velocity in particular cases and to examine to what extent the identifiable concrete strength can be affected.

It is established, in which cases it is possible to calculate the values of ultrasonic pulse velocity correction coefficient  $k_V$  at affecting factor combinations, at which experiments have not been performed.

A method for the analysis of ultrasonic pulse velocity for concrete in structures is developed, considering the impact of moisture and reinforcement. The developed flowchart includes sequential steps that are to be followed in order to objectively evaluate homogeneity, strength and other properties of concrete in structures.

## Practical Application of the Research Results

In practice, it is necessary to evaluate strength parameters of the reinforced concrete by applying nondestructive testing methods. Ergonomic and portable ultrasonic measuring devices are very convenient for this purpose. The interconnected effects of the main factors, which can affect the results of ultrasonic pulse velocity, are included in the computer program “Correction coefficients of ultrasonic pulse velocity and their application, if concrete hardened in different environments, which contains different amounts of moisture, is tested at different ages and different ambient temperatures” developed as a result of the research.

Any civil engineer or a specialist with background knowledge and work experience with ultrasonic equipment can use the computer program to obtain the correct ultrasonic pulse velocity values.

The correction coefficients of ultrasonic pulse velocity are adopted in comparison with the actual ultrasonic pulse velocity value on a particular testing day, which is determined if during 28-day concrete hardening or until the sounding at a respective age during the active phase of the cement hydration process a corresponding hardening environment is ensured and later concrete is located in an air-dry environment.

The sequence of computer program steps for the evaluation of concrete strength properties is the following: to select the concrete hardening environment → to select the concrete age → to select the concrete moisture → to select the ambient temperature → to establish the ultrasonic pulse velocity correction coefficient  $k_V$  → to manually input ultrasonic pulse velocity value  $V_{meas}$  measured under specific testing conditions → to obtain the real value of ultrasonic velocity  $V_{real}$  → to establish the correlation between ultrasonic pulse velocity in concrete and its compressive strength.

Obtaining the real ultrasonic pulse velocity value  $V_{real}$ , the correlation between ultrasonic pulse velocity in concrete and its compressive strength has to be carried out for a specific ultrasonic measurement device. Correlation curves must be organized for various concrete mixes with different strength parameters.

In specific cases, the value of ultrasonic pulse velocity correction coefficient  $k_V$  can be calculated at such combinations of affecting factors, where experiments have not been performed. For this purpose, locally weighted polynomial approximation quadratic functions are used for concrete of up to 56 days of age. For concrete aged 56 to 1000 days a linear relationship can be used to express the value of the  $k_V$  coefficient, performing data interpolation. The approximation function cannot be applied in cases of a negative ambient temperature.

By using the value of ultrasonic pulse velocity correction coefficient  $k_V$ , it is possible to obtain a correct ultrasonic pulse velocity in sounded concrete even when performing the measurements at different (including extreme) conditions, which could significantly differ from those that are observable in instances of determination of real ultrasonic pulse velocity. Thus, the risk of errors when evaluating the strength properties of the tested concrete is significantly reduced. At the same time, the computer program user will have an opportunity to compare what differences of ultrasonic pulse velocity are possible in a given case and to what extent the identifiable concrete strength can be indirectly affected by using correlation curves.

As an analysis of any other factors affecting ultrasonic pulse velocity is not subject to objective research if during the sounding of concrete the possible influence of the reinforcement on ultrasonic pulse velocity is ignored, the method for ultrasonic pulse velocity measurement has been developed within the Doctoral Thesis. Flowchart type method enables one to select the measurement-point scheme and measurement device transducer placement in a way that allows for a least possible impact of moisture and reinforcement in ultrasonic pulse velocity measurements. Taking into consideration the developed flowchart significantly reduces the impact of moisture and reinforcement for the evaluation of homogeneity, strength and other properties in particular reinforced concrete, and the acquired ultrasonic pulse velocity data will be interpreted correctly.

It has been estimated that the correct practical application of the methodology developed within the Doctoral Thesis for concrete strength evaluation will have an economic effect of €34,026.50 for the national economy of the Latvian Republic in a one-year perspective.

### **The Methodology of the Research**

The research of the experimentally manufactured concrete and reinforced concrete specimens with ultrasonic equipment serves as a basis for the elaboration of the Doctoral Thesis. The research is essentially based on the existing positive correlation between concrete strength and its elasticity properties, which exists in the ultrasonic pulse method. The ultrasonic equipment used in the study is suitable for longitudinal (compressional), shear (transverse) and surface (Rayleigh) wave transmission through material volume. The propagation of ultrasonic pulse velocity in concrete was determined by applying indirect and direct transmission methods. Only dry point contact transducers were used in the research, as they provide better contact between the ultrasonic source and the tested concrete surface.

Ultrasonic measurement devices used in the research:

- ultrasonic tester “UK-1401” (direct transmission; longitudinal waves; working frequency — 70 kHz);
- ultrasonic flaw detector “A1220 Monolith” (indirect and direct transmission; longitudinal and shear waves; working frequency — 50 kHz);
- ultrasonic pulse apparatus (oscillograph) “UKB-1M” (indirect and direct transmission; longitudinal and surface waves; working frequency — 100 kHz).

As the ultrasonic pulse velocity in concrete is significantly affected by moisture, moisture meters “Tramex Concrete Moisture Encounter” and “Moisture Master T-M-170” were applied during the experiments to control it.

The statistical processing of obtained results and development of mathematical models were performed using the Microsoft Excel software (versions 97-2003 and 2010). In order to analyze data from the ultrasonic flaw detector “A1220 Monolith”, the “Introvisor” software (version 2.1.) was applied. Locally weighted polynomial approximations were performed using the Matlab software (version R2011a). To process the data of ultrasonic pulse velocity, an algorithm of a function of four-argument multiple sets was incorporated in the program developed in the PHP5 language.

### **The Theoretical and Methodological Foundation of the Research**

The research, developed methods and calculation models of the Doctoral Thesis are based on the following branches of engineering science:

- construction materials and technology;
- concrete mechanics and rheology;
- acoustics;
- fields and waves in electronics;
- theory of probability and mathematical statistics;
- mathematical methods of modeling and optimization;
- computer systems and software.

### **The Scope of the Research**

The data gathered by the developed computer program allow interpreting the obtained results, if:

- 1) compressive strength class of concrete — C16/20...C45/55;
- 2) concrete density in an air-dry condition — 2200...2350 kg/m<sup>3</sup>;



- 3) the material of the coarse aggregates in concrete mix — granite and dolomite; size of the gravels and shingles does not exceed 30 mm;
- 4) the particle size of various mineral admixtures, used in the concrete mix, is not smaller than 10  $\mu\text{m}$ .

The concrete can be sounded in a quite wide ambient temperature range, i. e., from  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$  (if ultrasonic devices allow for their exploitation under these conditions).

To process the acquired data of ultrasonic pulse velocity measurement, the algorithm functions are applicable to both concrete in the hardening phase and concrete during further exploitation at different moisture, simultaneously taking into account conditions that concrete had during the hardening phase, i. e., during the active phase of the cement hydration.

Locally weighted polynomial approximation quadratic functions can be used to determine the correct ultrasonic pulse velocity for concrete of up to 56 days of age. For concrete aged 56 to 1000 days a linear correlation can be used to express the value of the  $k_V$  coefficient, performing data interpolation. Approximation functions cannot be used if the ambient temperature is negative.

It is recommended to use transducers with working frequencies of 70...100 kHz for determining the ultrasonic pulse velocity.

### **Results to Be Defended**

1. Method for the analysis of the propagation of ultrasonic pulse velocity in reinforced concrete structures, considering the effect of moisture and reinforcement;
2. Method of ultrasonic pulse velocity analysis for characterization of concrete strength in structures, considering the interaction effect of concrete hardening environment, age, moisture and ambient temperature factors on ultrasonic longitudinal and surface waves in the indirect transmission.

### **The Structure and Volume of the Doctoral Thesis**

The Doctoral Thesis consists of an annotation, general description of the research, introduction, five main chapters divided into sub-chapters, conclusions, proposals, three appendices and bibliography. In the first chapter, the theoretical basis of the Doctoral Thesis and a review of studies carried out up to date are presented. The second chapter discusses specimens and measuring devices of nondestructive test method applied in the experiments and estimates measurement uncertainty. The third chapter is dedicated to experimentally obtained results. The fourth chapter describes the methodology of ultrasonic pulse velocity applied to evaluate

concrete strength in structures and presents the research results to be defended. The fifth chapter summarizes the contribution of the methodology developed to a national economy.

The volume of the Doctoral Thesis is 144 pages. It includes 78 figures, 53 tables that explain and illustrate the content of the research. During the elaboration of the Doctoral Thesis 99 information sources have been used. The Doctoral Thesis has been written in Latvian.

### **The Approbation of the Research Results — List of Relevant International Conferences**

1. The 4<sup>th</sup> International Scientific Conference “Civil Engineering '13”. University of Agriculture, Jelgava, Latvia, May 16 –17, 2013. U. Lencis, A. Udris, A. Korjakins. Effect of Elevated Temperature Environment on Ultrasonic Pulse Velocity in Curing Concrete.
2. The 29<sup>th</sup> European Conference on Acoustic Emission Testing. TÜV Austria, European Working Group on Acoustic Emission, NDT.net. Vienna, Austria, September 8–10, 2010. U. Lencis, A. Udris, A. Korjakins. Reinforcement Effect on the Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete, Depending on the Sounding Method and Measuring Device.
3. The 10<sup>th</sup> International Conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques”. Vilnius Gediminas Technical University. Vilnius, Lithuania, May 19–21, 2010. U. Lencis, A. Udris, A. Korjakins. Application of the Ultrasonic and Sclerometric Measurement Data for Determining the Compressive Strength of the Construction Concrete.
4. 17. Internationale Baustofftagung. Bauhaus — Universität Weimar, Bundesrepublik Deutschland, September 23–26, 2009. U. Lencis, A. Udris, V. Zvejnieks, A. Korjakins. The Effect of Reinforcement on the Ultrasonic Longitudinal Wave Propagation Velocity in Concrete by Modeling the Concrete Structure Research of the Reinforced Concrete Hollow Core Slabs.
5. The 49<sup>th</sup> International Scientific Conference of Riga Technical University. Assembly Hall at the Faculty of Civil Engineering of Riga Technical University, Azenes Street 16, Riga, Latvia. October 13, 2008. U. Lencis, A. Udris, V. Zvejnieks, A. Korjakins. Stiegrojuma ietekme uz ultraskaņas garenviļņu izplatīšanās ātrumu betonā.
6. The 48<sup>th</sup> International Scientific Conference of Riga Technical University. Assembly Hall at the Faculty of Civil Engineering of Riga Technical University, Azenes Street 16, Riga, Latvia. October 12, 2007. U. Lencis, A. Udris, A. Korjakins. Ultraskaņas un sklerometrisko mērījumu datu izmantojamība konstrukciju betona faktiskās spiedes stiprības novērtēšanā.

### **List of the Author's Scientific Publications on the Topic of the Doctoral Thesis**

1. U. Lencis, A. Udriš, A. Korjakins. Moisture Effect on the Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete Cured under Normal Conditions and at Elevated Temperature. Riga Technical University. Construction Science. Vol. 14, pp. 71–78. ISSN 1407-7329, e-ISSN 2255-8551. Riga, October 2013.
2. U. Lencis, A. Udriš, A. Korjakins. Effect of Elevated Temperature Environment on Ultrasonic Pulse Velocity in Curing Concrete. Civil Engineering` 13. The 4<sup>th</sup> International Scientific Conference Proceedings, Vol. 4, pp. 11–18. ISSN 2255-7776. Jelgava, Latvia University of Agriculture, 2013.
3. U. Lencis, A. Ūdriš, A. Korjakins. Decrease of the Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete Caused by Reinforcement. Journal of Materials Science and Engineering A1 (2011). International Standard Serial Number: ISSN 2161-6213. Formerly part of Journal of Materials Science and Engineering, ISSN 1934-8959. Vol. 1, pp. 1016–1028, Number 7A, December 2011.
4. U. Lencis, A. Ūdriš, A. Korjakins. Reinforcement Effect on the Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete, Depending on the Sounding Method and Measuring Device. TÜV Austria, European Working Group on Acoustic Emission, NDT.net, the 29<sup>th</sup> European Conference on Acoustic Emission Testing, CD proceeding ISBN: 978-3-200-01956-0, Vienna, Austria, 2010.
5. U. Lencis, A. Ūdriš, A. Korjakins. Application of the Ultrasonic and Sclerometric Measurement Data for Determining the Compressive Strength of the Construction Concrete. Vilnius Gediminas Technical University Publishing House “Technika”. The 10<sup>th</sup> International Conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques”, pp. 173–180. ISBN: 978-9955-28-592-2, Lithuania, 2010. (*indexed in SCOPUS*)
6. U. Lencis, A. Ūdriš, V. Zvejnieks, A. Korjakins. The Effect of Reinforcement on the Ultrasonic Longitudinal Wave Propagation Velocity in Concrete by Modeling the Concrete Structure Research of the Reinforced Concrete Hollow Core Slabs. F. A. Finger — Institut für Baustoffkunde, Bauhaus – Universität Weimar, 17. Internationale Baustofftagung, Tagungsbericht — Band 1, pp. 1–0999...1–1010. Weimar, Bundesrepublik Deutschland, 2009.
7. U. Lencis, A. Ūdriš, V. Zvejnieks, A. Korjakins. The Effect of Reinforcement on the Ultrasonic Longitudinal Wave Propagation Velocity in Concrete by Sounding Surface of

the Reinforced Structural Elements. Riga Technical University. Construction Science. Vol. 9, pp. 72–84. ISSN 1407-7329. Riga, 2008.

## **STRUCTURE OF THE DOCTORAL THESIS**

In the general description of the Doctoral Thesis and in the introduction, the necessity to perform the research is substantiated, aims of and main tasks of the research are set, as well as scientific novelty, practical application and approbation are defined.

### **1. Literature Review / Theoretical and Experimental Foundation of the Research**

Literature review, which is to be considered the theoretical and experimental foundation of the research, is provided in Chapter 1. Having viewed the nondestructive testing method application possibilities in the investigation of the reinforced concrete structures, it is concluded that with ultrasonic equipment it is possible to determine various properties (homogeneity of concrete, density and strength), which provide a broader overview of the condition of the material as a whole (Malhotra, 2004; Коревицкая, 1989; Дзенис, 1987). In addition, the material can be studied in all kinds and shapes of structures and specimens (Mehta, 2005; Mindess, 2003; Hellier, 2001).

The method of ultrasonic pulses is based on a positive correlation between concrete strength and its elasticity properties (Дзенис, 1987; Lapsa, 1981). Although there are correlations between the values characterizing material elasticity, they do not always coincide with the tendencies of ultrasonic pulse velocity changes. For example, when the material is in the moistened condition, the Poisson's ratio and ultrasonic pulse velocity changes may not be unequivocally regular (Дзенис, 1971). The correlation of acoustic and strength properties of concrete is also influenced by the age, the correlation of embedded water and the amount of cement used, the nature of aggregates, the level of concrete consolidation and the curing (hardening) conditions, types of admixtures used, as well as reinforcement (Lin, 2003; Yaman, 2001; Phoon, 1999; Popovics, 1986; Ужполявичюс, 1982). Thus, not only the mix of specific concrete is important, but also the environment it is tested in — there are a number of factors which may significantly influence ultrasonic pulse velocity in concrete even if it was manufactured by using the very same ingredients.

A closer look at the studies about reinforcement influence on ultrasonic pulse velocity, measuring its propagation in reinforced concrete, demonstrates that it is often mentioned that ultrasonic pulse velocity increases in the areas of reinforcement bars (Malhotra, 2004; Bungey, 1984; Рутковский, 1980). In addition, the most important influence is exerted by the

surface areas near the reinforcements. In the current standards of different countries, only recommendations on how ultrasonic pulse velocity measurements are to be performed on reinforced concrete are mentioned; and these recommendations are quite different (ASTM C597-09, 2009; LVS EN 12504-4:2005 L, 2005; Методические указания, 2004).

Ambient temperatures in the range of +5 to +30 °C do not influence the ultrasonic pulse velocity in concrete (Malhotra, 2004; Guidebook, 2002). In turn, a change of moisture and temperature regime can significantly influence ultrasonic pulse velocity in concrete (Алимов, 2-2007; Дзенис, 1971; Коротков, 1963). However, moisture factor influence on ultrasonic pulse velocity in concrete is much more significant (Алимов, 2-2007; Fadragas, 2011). In such cases concrete is usually indicated that is sounded at a moment when the hydration process active phase in concrete does not take place anymore. However, there is a substantial difference, if concrete is tested at an early age, or at a later time of exploitation. An analysis of references in the standards of different countries does not lead to a specific representation of how positive temperature influences ultrasonic pulse velocity in concrete (LVS EN 12504-4:2005 L, 2005; ГОСТ 17624-87, 1988).

Assuming that concrete is absolutely dry, and its pores are filled with nothing but air, at lowering temperatures ultrasonic pulse velocity in concrete will decrease very slightly (Zitzewitz, 1995; Trinklein, 1990). By contrast, ultrasonic pulse velocity differences in water and ice are very significant. Ultrasonic pulse velocity in ice can be 2.5 times bigger than in water (Vogt, 2008; Al-Nassar, 2006; Kohnen, 1974). Thus, the phasic content changes of material structure can significantly influence ultrasonic pulse velocity in concrete. It is particularly evident in the case of transitioning from the liquid to solid phase, and vice versa. In the previously conducted research on negative temperature influence on ultrasonic velocity propagation in concrete, the indicated influence level is different. The maximum possible increase of ultrasonic pulse velocity in frozen concrete in relation to air-dry concrete is set to 18 % (Алимов, 2-2007). In the standards of different countries, no specific indications are given on negative temperature influence on ultrasonic pulse velocity in concrete (LVS EN 12504-4:2005 L, 2005; ГОСТ 17624-87, 1988; BS 1881: Part 203: 1986, 1986).

The influence of moisture level on ultrasonic pulse velocity in concrete is defined in a wide range: from insignificant to a considerable level of 16 %. (Fadragas, 2011; Алимов, 2-2007; Hellier, 2001). The character of the “ultrasonic velocity — concrete moisture” correlation is valued differently as well. There are studies where the interrelation of these two physical characteristics is defined as linear (Rollet, 2008), yet most of the studies acknowledge the exponential models (Fadragas, 2011; Ohdaira, 2000; Дзенис, 1971). The references found in the

standards of different countries are uncertain: 1) The information found in the current standard of the Republic of Latvia and the European Union indicates that in the very same concrete, with the changes of moisture, the differences of ultrasonic pulse velocity can be significant (LVS EN 12504-4:2005 L, 2005); 2) In the USA current standard it is mentioned that in moisture-saturated concrete ultrasonic pulse velocity can be 5 % higher (ASTM C597-09, 2009); 3) The current standards of Russian Federation provide a clear indication of possible differences in ultrasonic pulse velocity if for tested concrete materials moisture levels are not taken into consideration, the scope of possible changes, however, remains unspecified (ГОСТ 17624-87, 1988; ГОСТ 26134-84, 1985). In the literature overviewed, no information has been found on possible changes in ultrasonic pulse velocity under the influence of moisture, which is related to the age of the tested concrete and curing quality during hardening.

Evaluating research results on stress effect (comparing data on reinforced concrete exposed to different values of loads), it is concluded that the possible changes in ultrasonic pulse velocity of concrete are primarily related to the occurrence of cracks in the structure of hydrated cement paste of the material. A significant decrease of ultrasonic pulse velocity in concrete is observed when stress reaches 70...80 % of the ultimate stress value (Зиновьев, 2012; Popovics, 1991; P. Джонс, 1974). When testing reinforced concrete constructions, a detected decrease in ultrasonic pulse velocity of concrete under stress undoubtedly indicates a loss in strength and load carrying capacity of the concrete structure, and thus the actual situation will be fixed accurately.

As can be seen, the interaction between factors affecting ultrasonic pulse velocity in concrete is hardly discussed. Consequently, the main motive of this Doctoral Thesis is to determine if various physical and physico-chemical factors have a complex influence on ultrasonic pulse velocity in concrete.

## **2. Experimental Results and Their Analysis**

First, it is established how during determination of ultrasonic pulse velocity in reinforced concrete structures the results are influenced by reinforcement. Any other factor influencing ultrasonic pulse velocity cannot be analyzed objectively if during sounding the possible influence of reinforcement on the ultrasonic pulse velocity in concrete is ignored. Thereafter the moisture and ambient temperature factor influence on ultrasonic pulse velocity in concrete is evaluated. The complex effect of these factors is determined in relation to concrete hardening environment and cement hydration process phase (or concrete age).

Experimentally determined **influence of reinforcement** on ultrasonic pulse velocity in concrete differs from the data found so far in various scientific papers and state standards. In the embedded reinforcement bar zones lower ultrasonic pulse velocity in concrete is detected. This correlation applies to longitudinal, as well as transverse and surface waves.

The comparatively low ultrasonic pulse velocity in concrete detected in the reinforcement bar zones is most likely due to the existing structural differences in the contact zone “hydrated cement paste (HCP) — reinforcement bar” (i. e., environmental heterogeneity), if one compares with HCP properties in a plain concrete area. In the contact zone mentioned, the HCP is usually characterized by increased porosity, and a difference in coarse aggregate concentration is also observable in this environment around reinforcement bars, which occurs even at the moment of concrete placement as a result of the so-called aggregate centrifugal forces. It is also not excluded that ultrasonic pulse velocity changes in relation to reinforcement influence are caused by concrete aggregate and admixture development, thus changing the HCP environment, in which ultrasonic waves propagate.

Evaluating the **influence of elevated temperature** on ultrasonic pulse velocity in concrete at various phases of cement hydration process, one must first specify the following. In this case, the term “elevated temperature” is related to the hydration processes ongoing in concrete. Thus, such temperature is considered elevated, which exceeds normal concrete curing environment temperature ( $+18 \pm 2$  °C).

The obtained results show that if concrete hardens in an environment where the air temperature reaches  $+30$  °C, increased porosity and/or micro-cracks in the upper layers hinder the propagation of ultrasonic waves. Thus, when performing ultrasonic measurements with indirect transmission method on concrete, the correlation of acoustic and mechanical properties is essentially dependent on the hardening conditions of the material. In addition, the determined conditions of the concrete upper layer might not necessarily accurately reflect the overall concrete condition.

The **influence of a negative temperature** on ultrasonic pulse velocity was determined at the active and passive phases of the cement hydration, as well as for air-dry and water-saturated concrete. Duration of the concrete specimen freezing is assumed according to the references in the concrete frost-resistance determination standards (Russian Standard, 1996), where it is mentioned how long it takes for a concrete specimen with specific dimensions to freeze throughout the entire volume.

It is determined that under short-term influence of frost, moisture of the tested concrete is of crucial significance. In addition, differences in the change of ultrasonic pulse velocity are related to concrete hardening environment: the longer concrete is exposed to elevated temperatures during hardening, the more it will be influenced by moisture and frost, and thus the differences in ultrasonic pulse velocity will be greater, too.

For concrete under long-term influence of frost in 3 to 28 day period under the frozen and thawed conditions very significant ultrasonic pulse velocity differences are determined (see Table 1).

The following has been concluded as well. When a concrete specimen freezes, its surface moisture content reduces (it is often even lower than 6 %), but ultrasonic pulse velocity in concrete increases. Consequently, in the case of the frozen concrete, the relation between ultrasonic pulse velocity and concrete surface moisture is different than the correlation of the same parameters for non-frozen concrete.

Table 1

Correction Coefficients of Ultrasonic Pulse Velocity for Concrete Exposed to Long-term Frost

Age of concrete in days		3	7	14	28
indirect transmission <sup>1</sup>	longitudinal w.	0.50	0.49	0.55	0.57
	surface w.	0.52	0.50	0.55	0.58
direct transmission	longitudinal w. <sup>2</sup>	0.53	0.56	0.57	0.58
	longitudinal w. <sup>3</sup>	0.51	0.55	0.56	0.59
<b>on the average:</b>		<b>0.52</b>	<b>0.53</b>	<b>0.56</b>	<b>0.58</b>

Note: ultrasonic equipment: <sup>1</sup> — “UK-1401”; <sup>2</sup> — “UKB-1M”; <sup>3</sup> — “A1220 Monolith”.

**Moisture factor** has the most significant influence on the ultrasonic pulse velocity measurement results. Those are the moisture content changes in concrete that set the level of impact of other physical and mechanical characteristics (temperature and elasticity properties, etc.) on ultrasonic pulse velocity in concrete.

By applying indirect transmission, a significant increase for longitudinal wave velocity is detected at the moment when during water absorption the mass increase for the specimen is less than 0.1 % per day (i. e., when the maximum saturation of concrete with water is almost reached). Most significant changes are obtained for concrete that has hardened in an environment with elevated temperatures, for which when moisture content increased by 0.1 % by mass, ultrasonic pulse velocity increase has reached 9 % (Fig. 1). Thereby, to correctly identify the correlation between ultrasonic pulse velocity and water absorption by mass, concrete



specimen saturation needs to be performed during a longer time period than is currently prescribed by the standards required in the Republic of Latvia.

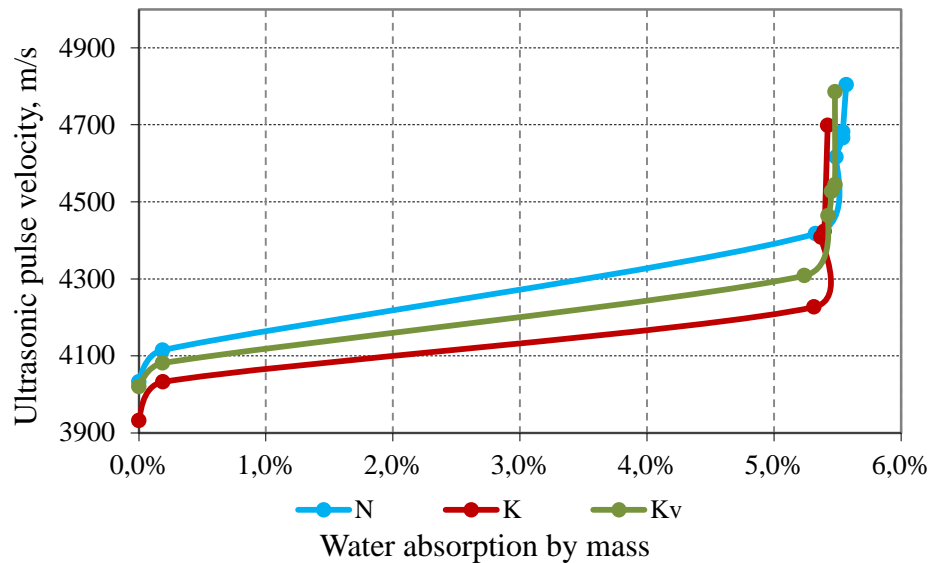


Fig. 1. Correlations between ultrasonic pulse velocity and concrete water absorption by mass for specimens hardened in various environments: *N* — in the standard moist room; *K* — in the climatic chamber (dismantled); *K<sub>v</sub>* — in the climatic chamber (undismantled)

The obtained results show the non-linear character of the correlation between the ultrasonic pulse velocity and material moisture content determined in concrete specimens.

### 3. Methodology for Application of the Method of Ultrasonic Pulses to Evaluate the Strength of Concrete in Structures

By summarizing experimentally obtained results, a methodology has been developed for application of the method of ultrasonic pulses to evaluate the strength of concrete in structures. The methodology consists of two methods, which are described in Chapters 3.1 and 3.2. For the developed algorithm of a function of four-arguments multiple sets, the mathematical modeling was carried out to establish, in which cases it is possible to calculate the values of ultrasonic pulse velocity correction coefficient  $k_v$  at affecting factor combinations, at which experiments have not been performed (see Chapter 3.3). Chapter 3.4, in turn, describes the obvious examples of inaccuracies that may occur, when correlation between ultrasonic pulse velocity and concrete strength is established without taking into account the developed methodology.

### 3.1. Method for the Analysis of the Propagation of Ultrasonic Pulse Velocity in Reinforced Concrete Structures, Considering the Effect of Moisture and Reinforcement

On the basis of experimental results, the methodology has been developed for determination of ultrasonic pulse velocity for concrete in structures, considering the effect of moisture and reinforcement. The prescription for ultrasonic measurement performance is concisely presented in Fig. 2 — in a flowchart where the positions of effects of a corresponding factor are arranged in an order of exclusion from top to bottom.

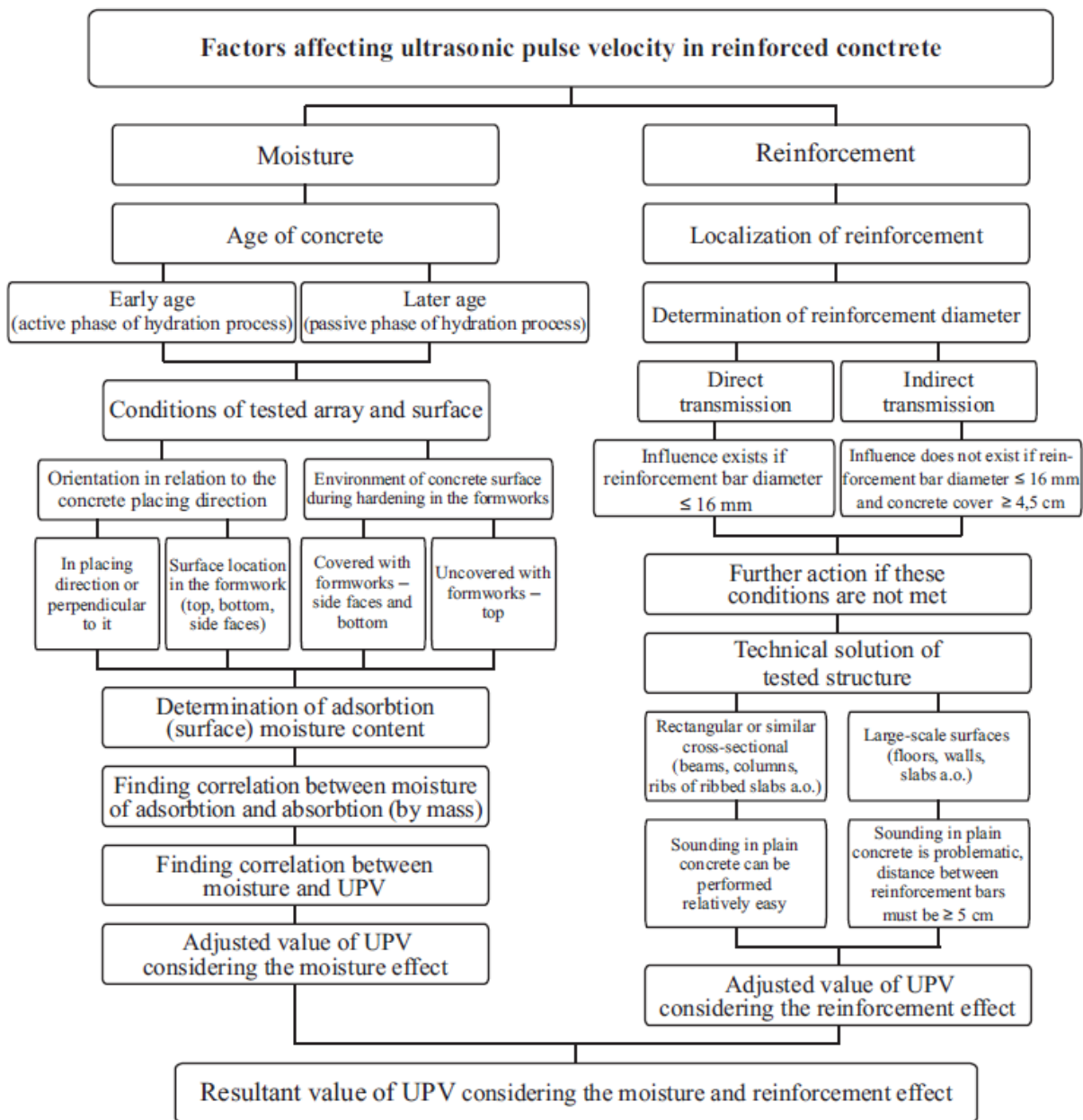


Fig. 2. Flowchart for moisture and reinforcement effect detection at performing the measurements of ultrasonic pulse velocity (UPV) in reinforced concrete structures

A fast removal of construction concrete formworks plays a significant role in the interpretation of the data obtained. In the active phase of the cement hydration an elevated ambient temperature can create a significant decrease of ultrasonic pulse velocity on the surface of the tested concrete. This is due to rapid drying of the concrete upper layer if concrete formworks are removed at the age of up to 2 days. Thus, a few millimeter thick concrete upper layer is characterized by a much lower structural density, which significantly hinders propagation of the ultrasonic pulse waves. In such cases it is necessary to remove the dried upper layer and perform the sounding on the concrete underneath.

When testing construction concrete, the complex reinforcement and moisture factor influences need to be taken into account; and none of the two can be given preference.

### **3.2. Method of Ultrasonic Pulse Velocity Analysis for Characterization of Concrete Strength in Structures, Considering the Interaction Effect of Concrete Hardening Environment, Age, Moisture and Ambient Temperature Factors**

The results obtained from various studies performed within this Doctoral Thesis are summarized using a computer program, analyzing the subordination of main physical factors for different concrete mixes. It was found that the measurement results were most significantly influenced by concrete moisture. Exactly the changes in moisture largely determined the influence rates of physico-mechanical and other characteristics on ultrasonic pulse velocity in concrete. The computer program includes the methodology for correct obtaining of ultrasonic pulse velocity data if sounding of concrete that has hardened in different environments, applying an indirect transmission method, is performed at different ages, different temperatures and moisture levels. By applying such an approach it is possible to create the correlation between ultrasonic pulse velocity and strength properties for the tested concrete with more precision.

#### **3.2.1. Algorithm of a Function of Four-Argument Multiple Sets**

An algorithm is developed for the most common sounding method in practice — indirect transmission —, if longitudinal and surface wave pulses are used in the investigation. The developed measurement methodology includes ultrasonic pulse velocity correction coefficient  $k_V$  function, which comprises four arguments — concrete hardening environment  $c$ , cement hydration phase (or concrete age)  $t$ , concrete moisture  $W$  and ambient temperature  $T$ :

$$k_V = f(c; t; W; T) . \quad (1)$$

As it is experimentally proven that changes of ultrasonic pulse velocity are observable under certain circumstances,  $k_V$  function for arguments is defined in following subheadings:

- ✓ Concrete hardening environment  $c$ : 1) Under normal conditions (at ambient temperature  $+18 \pm 2$  °C and relative humidity of air 95...100 %)  $c_n$ ; 2) Under elevated ambient temperature conditions (up to  $+30$  °C, relative humidity of air not exceeding 50 %)  $c_d$ ; 3) Under reduced temperature conditions (air temperature  $-18 \pm 2$  °C and relative humidity of air 65...75 %)  $c_f$ ;
- ✓ Concrete age  $t$ : 1) At the active phase of the cement hydration process, i. e., concrete at the age of 3, 7, 14, and 28 days —  $t_3, t_7, t_{14}, t_{28}$  respectively; 2) At the passive phase of the cement hydration process, for 56- and 1000-day-old concrete —  $t_{56}$  and  $t_{1000}$  respectively;
- ✓ Concrete moisture by mass  $W$ : 1) Air-dry concrete with moisture content 2...3 % —  $W_2$  and  $W_3$  respectively; 2) Wet concrete (4...5 % —  $W_4$  and  $W_5$  respectively); 3) Maximally water-saturated concrete (5...6 % —  $W_5$  and  $W_6$  respectively);
- ✓ Ambient temperature  $T$ : 1)  $-20...0$  °C —  $T_{-20...0}$  — range of frost influence or the cement hydration processes have stopped; 2)  $+1...+9$  °C —  $T_{+1...+9}$  — cement hydration processes take place at a lowered temperature; 3)  $+10...+20$  °C —  $T_{+10...+20}$  — favorable temperature for cement hydration processes; 4)  $+21...+30$  °C —  $T_{+21...+30}$  — temperature stimulating shrinkage of hydrated cement paste.

In the developed model the dry concrete cases are not included (at moisture by mass 0...1 %), which does not comply with a situation in practice. Ambient temperature, in turn, is directly related to concrete temperature. Most prominently it becomes apparent in the case of negative temperatures. During the experiment, the concrete specimens were sounded frozen throughout the volume. Thus, applying the ultrasonic pulse velocity correction coefficient value, one should be particularly aware of relatively high negative ambient temperatures (especially in the range from  $-4$  °C to  $+4$  °C). One should be sure that the sounded concrete has frozen throughout the volume, taking into account geometrical parameters of the construction element and its likelihood to freeze at corresponding air temperature.

### 3.2.2. Application of Ultrasonic Pulse Velocity Correction Coefficient $k_V$

The correction coefficients of ultrasonic pulse velocity are accepted following a comparison with the real ultrasonic pulse velocity on a given day ( $t_3, t_7, t_{14}, t_{28}, t_{56}$  and  $t_{1000}$ ) determined if during 28-day hardening time of concrete, or until the sounding at the corresponding age of the cement hydration process active phase, a corresponding hardening environment is ensured ( $c_n, c_d$  or  $c_f$ ) and in further exploitation concrete is exposed to air-dry environment. For in-

stance, for concrete under normal curing conditions (hardening environment–  $c_n$ ) of up to 28 days of age it is assumed that the real ultrasonic pulse velocity ( $k_V = 1$ ) is at concrete moisture  $W = 5\%$ , but at the age of 1000 days — concrete moisture will be 3%. For each hardening condition, the values for coefficients  $k_V = 1$  will differ slightly, but in any case they apply to favorable temperature range  $T_{+10\dots+20}$  of cement hydration process. Four-argument function coefficient  $k_V = 1$  occurrence for concrete in different hardening environments are as follows:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_V = f(c_n; t_3 \dots t_{28}; W_5; T_{+10\dots+20}) = 1 \\ k_V = f(c_n; t_{56}; W_4; T_{+10\dots+20}) = 1 \\ k_V = f(c_n; t_{1000}; W_2; T_{+10\dots+20}) = 1 \\ k_V = f(c_d; t_3 \dots t_{14}; W_5; T_{+10\dots+20}) = 1 \\ k_V = f(c_d; t_{28\dots56}; W_4; T_{+10\dots+20}) = 1 \\ k_V = f(c_d; t_{1000}; W_2; T_{+10\dots+20}) = 1 \\ k_V = f(c_f; t_3 \dots t_{28}; W_5; T_{+10\dots+20}) = 1 \\ k_V = f(c_f; t_{56}; W_4; T_{+10\dots+20}) = 1 \\ k_V = f(c_f; t_{1000}; W_2; T_{+10\dots+20}) = 1. \end{array} \right. \quad (2)$$

The total number of functions included in the computer program algorithm is 360. It should be noted that in 161 occurrences the correlations of the arguments in the function are not subordinate either to the basic principles of hardening of cement as hydraulic binder in relation to necessary water and ambient temperature for this purpose, or to the extreme hardening and ambient temperature ranges ( $c_d - T_{-20\dots0}$  un  $c_f - T_{+21\dots+30}$ ). Such occurrences only correspond to the modelling necessity within scientific research, and in this computer program such equation outcomes are formulated as *unrealistic in practice*. The defined coefficient  $k_V = 1$  occurrences are 18 (6 in each hardening environment, which corresponds to concrete ages included in the function); yet there are 181 other numeral values of  $k_V$ . Experimentally obtained coefficient values, in terms of ambient temperature at hardening time, are summarized in Table 4.1 of the full version of the Doctoral Thesis.

The obtained ultrasonic pulse velocity correction coefficient  $k_V$  is multiplied by corresponding ultrasonic pulse velocity value  $V_{meas}$  measured at a corresponding age under specific testing circumstances. It is assumed that values of ultrasonic pulse velocity define measurement units  $m/s$  or  $km/s$ , but this estimation method in the formula shown below allows using other ultrasonic pulse velocity measurement units as well. The real value of ultrasonic pulse velocity  $V_{real}$  is calculated by the following formula:

$$V_{real} = V_{meas} \cdot k_V. \quad (3)$$

Consequently, performing measurements at different (including extreme) environments, which can significantly differ from those observed in real ultrasonic pulse velocity detection cases, using ultrasonic pulse velocity correction coefficient  $k_V$  value allows obtaining a correct ultrasonic pulse velocity in the sounded concrete.

The access to the computer program “Correction coefficients of ultrasonic pulse velocity and their application, if concrete hardened in different environments, which contains different amounts of moisture, is tested at different ages and different ambient temperatures” is possible using the Internet connection. Computer program website is: <http://concrete.scienceontheweb.net>. Opening it one sees the title of the developed software in Latvian and English. To activate the program in a respective language one should left-click on one of the two positions: *Latviski* or *English*. After confirming the working language, the software user enters the main menu page, where further course of action is chosen. There is an option to activate the sections *Directions for computer program use* and *Calculation of the  $k_V$  coefficient and obtaining of the real UPV*, which describe the sequence of steps for the computer program use.

### 3.3. Application of Locally Weighted Polynomial Approximation Quadratic Functions in the Analysis of Experimental Results

In the processing of experimental data high-quality results were shown by locally weighted polynomial approximation quadratic functions:

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_1 + b_5x_1x_2 + b_6x_1x_3 + b_7x_2x_2 + b_8x_2x_3 + b_9x_3x_3, \quad (4)$$

where  $x_1 = t$  — concrete age;

$x_2 = W$  — concrete moisture;

$x_3 = T$  — ambient temperature;

$a$  and  $b$  — empirical coefficients.

Different empirical coefficients were obtained for the approximation of ultrasonic pulse velocity correction coefficient  $k_V$  determination for concreted hardened in various environments. Coefficient values are summarized on page 127 of the full version of the Doctoral Thesis.

The obtained results show that the approximation functions can be used for concrete of up to 56 days of age. In turn, if concrete is at the age between 56 and 1000 days, these approximation functions are not applicable due to the lack of experimental data volume. In this range of concrete age, for the expression of the value of ultrasonic pulse velocity correction coeffi-

cient, it is possible to use linear correlations, performing an interpolation on  $k_V$  data. In case of negative ambient temperature, no correct approximation results were obtained, by performing locally weighted cubic function approximation because: 1) the experimental data were limited by practically impossible occurrences; 2) in moisture-saturated and frozen concrete a significant ultrasonic pulse velocity increase was observed at 6 % moisture, compared to the results obtained at 5 % moisture.

The average values of comparison error  $\Delta_{vid}$  (%) for data obtained in experimental and theoretical (approximation) way depending on concrete hardening circumstances and ambient temperature are summarized in Table 2.

Table 2

The Differences  $\Delta_{vid}$  ( $\Delta_{min} \dots \Delta_{max}$ ), % between Values of Ultrasonic Pulse Velocity Correction Coefficient  $k_V$  Obtained Experimentally and in Approximation Way, Depending on the Concrete Hardening Environment and Ambient Temperature

Temperature Hardening environment	$T_{-20\dots0}$	$T_{1\dots9}$	$T_{10\dots20}$	$T_{21\dots30}$
$c_n$	12.8 (0.50...39.3)	0.81 (0.20...2.07)	0.49 (0.06...0.85)	0.39 (0.01...1.10)
$c_d$	9.78 (0.03...42.3)	0.62 (0.13...1.19)	0.54 (0.01...1.52)	0.54 (0.00...1.45)
$c_f$	51.9 (0.77...107.3)	0.63 (0.09...1.70)	0.52 (0.03...1.61)	0.34 (0.02...0.80)

It can be concluded that previously described approximations can be applied only to concrete of up to 56 days of age, as well as during investigations at positive ambient temperatures.

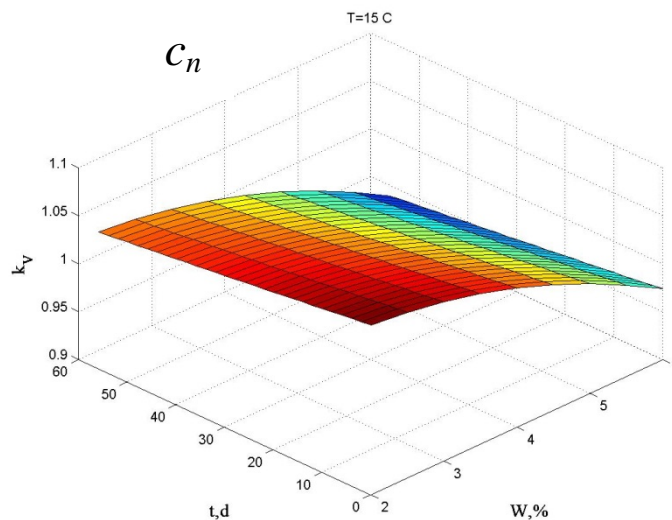


Fig. 3. Three-dimensional model of correlations of ultrasonic pulse velocity affecting factors at +15 °C for concrete cured under normal conditions.

As three-dimensional correlation models show, the influence of moisture on ultrasonic pulse velocity in concrete increases with the increase in concrete age (see Fig. 3). In all cases, ultrasonic pulse velocity correction coefficient values are both higher and lower than 1 —  $c_n$  and  $c_d = 0,93...1,03$ ;  $c_f = 0,96...1,02$ . When concrete gets older, corrections caused by the influence of moisture are more significant and the real value of ultrasonic pulse velocity gets lower.

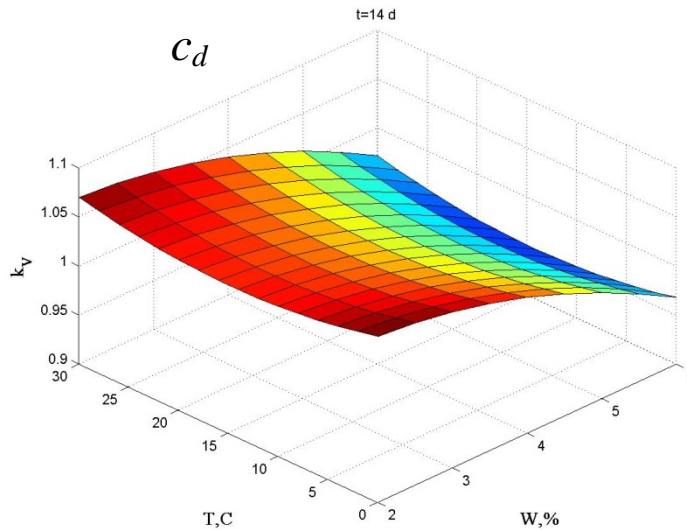


Fig. 4. Three-dimensional model of correlations of ultrasonic pulse velocity affecting factors for 14-day-old concrete cured at elevated ambient temperatures.

The three-dimensional model, which is developed for concrete moisture and ambient temperature interaction influence on ultrasonic pulse velocity correction coefficient value in concrete hardened in different environments, shows that in the ambient temperature dimension relatively high correction coefficient values are seen more in the range of 1...9 °C and 21...30 °C than in the range of 10...20 °C. Such a feature is related to the fact that for concrete hardening under optimum curing conditions lower coefficients are used, as in such an environment concrete shows potentially higher ultrasonic pulse velocity (Fig. 4). For concrete up to 56 days of age similar correlations are obtained.

In the full version of the Doctoral Thesis, the above-mentioned three-dimensional models are presented for concrete hardened in other environments as well (see Figs. P.32 and P.33). Three-dimensional models are also given for ultrasonic pulse velocity affecting factor correlations at 5 % moisture (see Fig. P.34). In turn, for correlation between concrete moisture and age at different ambient temperatures an axonometric representation is developed (see Fig. P.35).



### 3.4. Examples of Errors in Concrete Compressive Strength Determination by Applying Ultrasonic Pulse Velocity Data without Consideration of Affecting Factors

As the correlation between concrete moisture, elevated and negative ambient temperature during the active and passive phases of the cement hydration process can have a significant influence on ultrasonic pulse velocity in concrete, examples are given on differences in ultrasonic pulse velocity for concrete with the same mix (thus excluding the influence of ingredient properties on ultrasonic pulse velocity), testing it at different environmental conditions. The sounding of concrete is performed with the same ultrasonic tester — “UK-1401” — thus excluding the influence of measuring equipment technical parameters and calibration settings on ultrasonic pulse velocity in concrete.

As the most significant ultrasonic pulse velocity changes are observed when performing sounding at negative temperatures and at different moisture, it is described, what kind of inaccuracies can occur interpreting concrete compressive strength values, if ultrasonic pulse velocity is determined for concrete, which: was exposed to lower temperature from 3 days of age; was tested under frozen conditions at the construction site at 28 days of age, under thawed conditions — at the age of 29 days in a laboratory; at the given age concrete contained 4.8...5.4 % of absolute moisture by mass; at 28 days of age it was tested at air temperature of  $-20...0$  °C, but at the day 29 — at temperatures of  $+10...+20$  °C. In concrete sounded this way, at the age of 28 and 29 days, the following functions of ultrasonic pulse velocity correction coefficient  $k_V$  are applicable:

$$k_V = f(c_n; t_3; W_5; T_{-20...0}) \text{ un } k_V = f(c_f; t_{28}; W_5; T_{+10...+20}). \quad (5)$$

When concrete was 28 days old, at the site 6 measurement points were chosen. At each point, concrete was sounded when frozen. At this age, in the measurement areas, 6 cylindrical specimens were drilled out, for which after thawing the ultrasonic pulse velocity was determined under laboratory conditions on the 29<sup>th</sup> day. After relevant preparatory work, the compressive strength  $f_c$  of the concrete specimens was determined at 32 days of age in the laboratory.

The obtained results show that under frozen conditions the ultrasonic pulse velocity is 16.3...20.8 % higher than under thawed conditions one day later (see Table P.40 of the full Doctoral Thesis).

For the production of concrete under consideration, with fixed ingredient properties and in a longer period of time, correlations of the variables “ultrasonic pulse velocity — compressive strength” have been collected in a wide compressive strength range 14.5...68.1 MPa. Figure 5

demonstrates correlation curves of different strength concrete, as well as for drilled concrete specimens under thawed conditions and construction concrete under frozen conditions. The obtained correlation coefficients of compressive strength and ultrasonic pulse velocity: concrete of different mixes supplied by manufacturers — 0.91; concrete of drilled cylindrical specimens — 0.85, frozen concrete — 0.56.

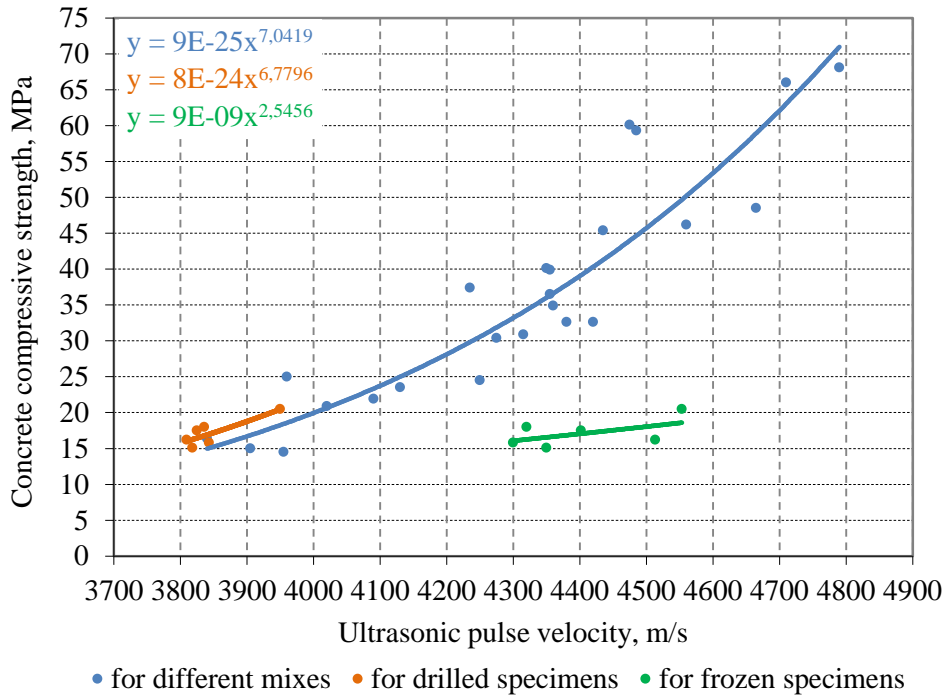


Fig. 5. Correlation of ultrasonic pulse velocity and compressive strength for given manufactured concrete: for mixes with different compressive strength at constant ingredient properties; for drilled concrete specimens under thaw conditions; for frozen concrete.

According to the correlations shown in Fig. 5, the compressive strength of frozen concrete obtained by data of ultrasonic pulse velocity is 22.7...36.6 MPa higher than it is actually determined. Consequently, compressive strength will be evaluated on the average 3 times higher, if compared with the data obtained from specimens drilled out from concrete structure. It is understood that such significant inaccuracies can lead to unpredictable consequences on construction sites if, based on incorrectly obtained significantly higher concrete strength, decisions are to be made about premature removal of formworks, loading or the like.

## **4. The Contribution of the Methodology Developed to the National Economy of the Construction Industry of the Republic of Latvia**

### **4.1. The National Economic Effect of the Methodology Developed**

The economic gain from the methodology developed within the Doctoral Thesis for the national economy of the construction industry of the Republic of Latvia is calculated: 1) by comparing working expenditures if the concrete strength evaluation on the building object is performed by applying either an ultrasonic pulse method or compressive strength tests (in a laboratory) for specimens drilled out from the structures; 2) calculating the additional work if for construction concrete the ultrasonic pulse velocity was interpreted incorrectly.

Summarizing the estimated working expenditures in the Republic of Latvia in one-year perspective, it can be concluded that: 1) performing investigation by applying ultrasonic equipment, compared to the test of compressive strength for the drilled specimens from concrete structures, provides an economic effect of €24,859.50. Furthermore, it should be taken into account that the integrity of construction is weakened by drilling specimens out of it; 2) avoiding the additional work leads to an economic effect of €9,167.00. In this case, it is not possible to include the idleness costs for a new building in the calculation, which arise in the period of summarizing the inspection results.

Thus, the calculated economic effect on the national economy of the Republic of Latvia in a one-year perspective, provided by the methodology for reinforced concrete structure concrete strength evaluation applying an ultrasonic pulse method developed within the Doctoral Thesis, accounts for €34,026.50.

### **4.2. Recommendations for Amendments to Standard LVS EN 12504-4:2005 L “Testing Concrete – Part 4: Determination of Ultrasonic Pulse Velocity”**

Considering the research results obtained in the Doctoral Thesis, recommendations have been formulated to supplement the information found in standard LVS EN 12504-4:2005 L. Recommendations are divided into two groups. The first group is related to the requirements set for standard scope, requirements for equipment use, procedure, presentation of results and formatting of testing report:

1. The scope of the standard should be broadened. Relatively determined correlations between various ultrasonic wave types are not significantly different. Accordingly, in paragraph 1 it should be noted that the standard also applies to determination of ultrasonic pulse transverse and surface wave velocity in hardened concrete;

2. In the device description of paragraph 5.2, which determines the operational requirements, the accuracy should be increased for determination of ultrasonic pulse propagation time — from 2 % to 1%. To the indication “Equipment is to be used in operating conditions determined by manufacturer”, a reference to Annex B should be added, where correct usage of ultrasonic device for testing frozen or significantly moisture-saturated concrete on building sites should be discussed;
3. For the procedures of paragraph 6.1.2, a correction is to be made for the concrete indirect testing term *virsmas caurskaņošana* (direct transmission for surface). A more appropriate term is *virsmas skaņošana* (sounding of surface), as applying this method the position of the transducers on the very same concrete surface does not ensure sounding throughout the volume of the object tested. Furthermore, the word *caurskaņošana* (direct transmission) can create an erroneous impression about the method used for the investigation. The sentence part “The placement of indirect transmission is least sensitive...” is not acceptable. It is experimentally proven that in case of indirect transmission there are a relatively high number of factors that influence the precision of the measurement data compared to a direct transmission method;
4. For the procedure of paragraph 6.1.3, the recording precision of ultrasonic pulse path length in direct transmission case is to be increased from  $\pm 1 \%$  to  $\pm 0.1 \%$ ;
5. For determination of propagation velocity of direct and semidirect transmission pulse, in paragraph 7 of the standard it is necessary to add a note that pulse (transit) delay in ultrasonic propagation time caused by device transducers should be taken into account. (Not always for ultrasonic time determination the measurement devices include pulse delay, which especially applies to the oscillograph-type equipment);
6. Paragraph 8 of the standard, where positions of the measurement result summarizing testing report are listed, is to be supplemented with the position *concrete moisture*. Additionally, it is necessary to specify concrete moisture determination method (model and type of the measurement device, measurement range); concrete curing environment during hardening and ambient temperature, if concrete of up to 56 days of age is sounded.

The second group of the standard amendments refers to Annex B, where the factors that influence pulse propagation velocity determination are listed. The recommendations refer to paragraph B.2, which is to be supplemented with the following references: “Moisture influence degree is dependent on the age of the tested concrete. At an early age, when the water necessary for the hydration process of concrete structure has not been completely bound, the

velocity will change much faster in case of relatively low changes in moisture amount. At a later concrete age, the correlation “concrete moisture — ultrasonic pulse velocity” will differ from the one determined at an early age. By using indirect transmission method, significant changes in ultrasonic pulse velocity in the tested concrete are determined when the maximum saturation with water is almost reached. The surface moisture necessarily needs to be determined for the tested concrete before carrying out the ultrasonic pulse velocity measurement, where it is advisable to establish a correlation with concrete water absorption by mass or volume.”

## CONCLUSIONS

The influences of moisture, temperature and reinforcement on ultrasonic pulse velocity in reinforced concrete structures have been determined in the Doctoral Thesis. The complex effects of these factors have been evaluated. Summarizing research results, ultrasonic pulse velocity correction coefficient program has been developed, where the algorithm of a function of four-argument multiple sets includes concrete hardening environment, hydration process phase of cement (or concrete age), concrete moisture and the ambient temperature. It is established in which cases an approximation method can be used for the coefficient value estimate. Proposals have been given for current standard LVS EN 12504-4:2005 L of the Republic of Latvia “Concrete testing — Part 4: Ultrasonic pulse velocity determination” to supplement it with specific information. The correct use of information obtained in the Doctoral Thesis can significantly reduce the risk of errors in the interpretation of ultrasonic pulse velocity measurement data in relation to concrete strength evaluation.

1. It has been established that the difference accounts for 19 % on the average for ultrasonic pulse velocity in absolutely dry concrete, compared to concrete under the condition of maximum saturation with water. By applying indirect transmission, a 9 % increase for ultrasonic pulse velocity is detected when the maximum saturation of concrete with water is reached. Such a correlation has not been fixed for direct transmission.
2. It has been determined that direct transmission shows the decrease of ultrasonic pulse velocity in concrete, caused by reinforcement effect, up to 7 %. For indirect transmission, in the areas where reinforcement bars with diameter of up to 16 mm are embedded, no influence of the mentioned factor has been fixed; for 22 mm reinforcement bar zones a significant decrease in ultrasonic pulse velocity has been defined (up to 10 %).
3. It is experimentally proven that during the hardening of concrete at the ambient temperature above  $+30 \pm 2$  °C, defects have occurred in the upper layers — increased po-

rosity of cement and/or appearance of micro-cracks — which delay propagation of ultrasonic wave. These defects can decrease the propagation of ultrasonic pulse velocity in concrete by as much as 7 %.

4. The influence of frost on ultrasonic pulse velocity in concrete during the cement hydration process active phase is practically identical for both transmission methods — direct and indirect transmission. It has been determined that ultrasonic pulse velocity decreases with an increase in concrete age. At 28 days of age, frost influence on the ultrasonic pulse velocity in concrete hardened in a normal environment does not exist anymore. For frozen concrete aged between 3 and 28 days, very elevated ultrasonic pulse velocity is determined (for thawed concrete it is approximately 2 times lower).
5. It has been established that an increase in ultrasonic pulse velocity caused by moisture and frost interaction reaches 34 %. By freezing specimens kept three years in an environment where air humidity reaches up to 40 %, no changes in ultrasonic pulse velocity have been determined. For concrete with absolute moisture content reaching up to 4.5 % (of mass), freezing does not have a significant influence on the ultrasonic pulse velocity and does not exceed 1 %.
6. A flowchart for ultrasonic pulse velocity evaluation in concrete has been developed, considering moisture and reinforcement effect influence. It has been determined that moisture influence is dependent on concrete age and placing direction, as well as properties of the sounded upper layer in relation to the formwork removal for the construction considered. The influence of reinforcement is dependent on its location, cross-sectional parameters and the technical solution of the tested construction.
7. Algorithm of a function of four-argument multiple sets has been elaborated and a computer program for ultrasonic pulse velocity data processing to evaluate the strength of concrete in structures has been developed. The algorithm includes the four-argument function of ultrasonic pulse velocity correction coefficient  $k_V$ , which comprises concrete hardening environment, cement hydration process phase (or concrete age), concrete moisture and ambient temperature in the range from  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  up to  $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , which allows obtaining a correct ultrasonic pulse velocity in the sounded concrete, excluding the impact of main physical and physico-chemical factors.
8. For locally weighted polynomial approximation quadratic functions, different empirical coefficients have been obtained in order to determine ultrasonic pulse velocity correction coefficient  $k_V$  for concrete hardened in different environments. Approximation

functions can be used for concrete of up to 56 days of age; but in the period from 56 to 1000 days, linear correlations can be used to express the value of  $k_V$  coefficient. It has been found that in case of a negative ambient temperature correct approximation results cannot be obtained.

9. Amendments to the current standard LVS EN 12504-4:2005 L of the Republic of Latvia “Concrete testing — Part 4: Ultrasonic pulse velocity determination” have been developed in order to avoid possible errors in the interpretation of ultrasonic pulse velocity data in practice with regard to concrete strength determination. It should be noticed in the standard that ultrasonic pulse velocity measurement results can be influenced by the transmission method used, as well as by interaction of specific physical and physico-chemical factors. In the methodology of ultrasonic pulse velocity calculation, the necessity for observing the pulse delay should be given.

### **PROPOSALS**

1. Performing measurements with ultrasonic equipment, it is necessary to collect information on the age, moisture and temperature of the tested concrete in the time of investigation, as well as on its conditions during hardening and properties of the mix ingredients. For the comparison of the results, any object is to be sounded at all available faces, determining the surface moisture at the same time. With regard to the tested construction consolidation (placement) and loading direction, measuring device transducers need to be oriented on parallel and perpendicular axes. Complying with such a methodology contributes significantly to correct interpretation of ultrasonic pulse velocity measurement results in relation to concrete homogeneity and strength properties.
2. When determining ultrasonic pulse velocity in concrete for reinforced concrete structures, one needs to consider the influence of the reinforcement embedded in material. For columns, beams, ribbed plate ribs and similar construction solutions, correct results of construction concrete direct transmission will only be obtained if on the way of ultrasonic pulse there will be no main reinforcement. In turn, for floor, slab and wall constructions by performing indirect transmission, the influence of reinforcement can be ignored in most cases, if concrete cover is at least 4 cm.
3. To determine moisture content in concrete and exclude inaccuracies in interpretation of obtained data (developing the correlations between ultrasonic pulse velocity and abso-

lute moisture), in investigations devices for moisture measuring in the range of 0...8 % are to be applied for concrete surface.

4. During the curing of concrete at higher temperatures than it is necessary for the normal course of the cement hydration processes, fast removal of formworks (up to 2 days of age) is of significance for the correct interpretation of ultrasonic pulse velocity data. Ultrasonic pulse velocity determined at the upper layers of the construction concrete may be less than in the array. In such cases, in order to obtain correct data throughout the volume of the construction, the dried upper layer needs to be removed (hammered off) before concrete sounding.
5. Applying one and the same correlation for different ultrasonic measuring devices is not allowed — correlations between ultrasonic pulse velocity in concrete and compressive strength need to be established separately for each ultrasonic measuring device. Even for different measuring devices of one type, the defined absolute values of ultrasonic pulse velocity in concrete are strictly individual; in addition, when ultrasonic pulse velocity decreases or increases by 5 %, concrete strength may turn out to be lower or higher even by 50 %.
6. Evaluating the actual strength of concrete only by means of ultrasonic method is practically not acceptable — at least several nondestructive testing methods need to be used simultaneously.



**PROMOCIJAS DARBA LITERATŪRAS ATSAUCES/  
LIST OF REFERENCES OF THE DOCTORAL THESIS**

*Latviešu valodā/in Latvian:*

1. Januševskis, A., Auziņš, J. Eksperimentu plānošana un analīze. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2007
2. Lapsa, V. Jaunākās būvmateriālu mehāniskās pārbaudes. – Rīga, «Avots», 1981
3. Latvijas standarts LVS EN 12504-4:2005 L «Betona testēšana — 4. daļa: Ultraskaņas impulsa ātruma noteikšana». LVS, 2005
4. Pommers, J. Studentu zinātniskā darba pamati. – Rīga, «Zvaigzne», 1979

*Angļu valodā/in English:*

1. Al-Nassar, Y. N., Al-Jalal, A. M., Khan, M. A., Al-Kaabi, S. A. Functional Dependence of Ultrasonic Speed in Water on Salinity and Temperature. NDT.net. Vol. 11 No.6, June 2006
2. American standard ASTM C597-09. Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete. ICS Number Code 91.100.30. ASTM Standards, 2009
3. ASTM Test Designation C 597-02, Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02, West Conshohocken, PA, 2003
4. Arioglu, E., Arioglu, N., Girgin, C. A discussion of the paper – Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted. Journal of Cement and Concrete Research, October, 2000
5. British Standard BS 1881: Part 203: 1986. Testing Concrete – Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete. 1986
6. Bungey, J. H. The Influence of Reinforcement on Ultrasonic Pulse Velocity Testing. The American Concrete Institute (ACI), Special Publication, September 1, 1984
7. Chung, H. W. Effects of Embedded Steel Bars upon Ultrasonic Testing of Concrete. Magazine of Concrete Research Vol. 30 No. 102, London, 1978
8. Cleveland, W.S. Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. Journal of the American statistical association. Vol. 74, 1979
9. Cleveland, W.S., Devlin, S.J. Locally weighted regression: An approach to regression analysis by local fitting. Journal of the American statistical association. Vol. 83, 1988
10. Cleveland, W.S., Grosse, E. Computational methods for local regression. Statistics and Computing. Vol. 1, 1991
11. Demirboga, R., Turkmen, I., Karakoc, M.B. Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixtured concrete. Cement and Concrete Research 34. Science Direct, 2004
12. Evangelista, A.C.J., Shehata, I.A.E.M., Shehata, L.C.D. Evaluation of the Compressive Strength of Concrete by Different Nondestructive Methods. American Concrete Institute. Special Publication. Volume 229, September, 2005
13. Fadrugas, C.R., Gonzalez, M.R. Dependence of Ultrasonic Pulse Propagation Velocity on Free Water Content in Concrete Structure under Tropical Climate Conditions. 5th Pan American Conference for NDT. Cancun, Mexico, 2011
14. Gooding, M. The temperature dependence of seismic waves in ice. Robotics Research Group Department of Engineering Science University of Oxford. Merton College. Trinity Term, 2004

15. Gudra, T., Najwer, L. Ultrasonic Investigation of Snow and Ice Parameters. Optical and Acoustical Methods in Science and Technology. ACTA Physica Polonica A. No. 4. Vol. 120, 2011
16. Guidebook on non-destructive testing of concrete structures. Training course series No. 17. Industrial Applications and Chemistry Section. International Atomic Energy Agency. Vienna. ISSN 1018-5518, 2002. Available on: [http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/tcs-17\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/tcs-17_web.pdf)
17. Hannachi, S., Guetteche, M.N. Application of the Combined Method for Evaluating the Compressive Strength of Concrete on Site. Open Journal of Civil Engineering 2, March 2012
18. Hellier, C. Handbook of Nondestructive Evaluation: Blacklick, OH: McGraw-Hill Professional Publishing, USA, 2001
19. Jones, R. Non-destructive Testing of Concrete. Cambridge University Press, London, 1962
20. Kaplan, M.F. Compressive Strength and Ultrasonic Pulse Velocity Relationships for Concrete in Columns. ACI J., 29 (54-37), 675, 1958
21. Kohnen, H. "The temperature dependence of seismic waves in ice" J. Glaciol.13, 1974
22. Latvian standard LVS EN 1338:2004 L. Concrete paving blocks – Requirements and test methods. LVS, 2004
23. Latvian standard LVS 405:2002. Concrete masonry units – Test methods for the water absorption and frost resistance. LVS, 2002
24. Lin, Y., Kuo, S., Hsiao, C., Lai, C. Investigation of Pulse Velocity-Strength Relationship of Hardened Concrete. Journal of American Concrete Institute. Title no. 104-M38, ACI Materials Journal/July-August 2007
25. Lin, Y., Lai, C., Yen, T. Prediction of Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) in Concrete. Journal of American Concrete Institute. Title no. 100-M3, ACI Materials Journal/January-February 2003
26. Malhotra, V. M., Carino, N. J. Handbook on Nondestructive Testing of Concrete. Second edition: ASTM International, CRC Press LLC, USA, 2004
27. Mehta, P. Kumar. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. Blacklick, OH, USA: McGraw-Hill Professional Publishing, 2005
28. Mindess, S., Young, J. F., Darwin, D. Concrete. Second edition. Pearson Education, Inc. Upper Saddle River, NJ 07458. USA, 2003
29. Nasser, K. W., Al-Manaseer, A. A. Comparison of Nondestructive Testers of Hardened Concrete. Journal of American Concrete Institute. Materials Journal, September-October, 1987
30. Ohdaira, E., Masuzawa, N. Water content and its effect on ultrasound propagation in concrete — the possibility of NDE. Ultrasonics. Copyright © 2000 Elsevier Science B.V. Volume 38, Issues 1-8, March 2000
31. Phoon, K. K., Wee, T. H., Loi, C. S. Development of Statistical Quality Assurance Criterion for Concrete Using Ultrasonic Pulse Velocity Method. Journal of American Concrete Institute. Title no. 96-M70, ACI Materials Journal/September-October 1999
32. Popovics, S., Komlos, K., Popovics, J. Comparison of DIN/ISO 8047 (Entwurf) to Several Standards on Determination of Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete. NDTnet - Vol. 2 No. 04, April 1997
33. Popovics, S., Popovics, J. S. Effect of stresses on the ultrasonic pulse velocity in concrete, RILEM Materials and Structures, 24, 15, 1991
34. Popovics, S. Effect of Curing Method and Final Moisture Condition on Compressive Strength of Concrete. Journal of American Concrete Institute. Title no. 83-60. ACI Journal, July-August 1986

35. Pucinotti R., Hinterholz, L., D'Elia, A., De Lorenzo, R. A. Influence of Steel Reinforcement on Ultrasonic Pulses Velocity. 4th International Conference on NDT. Greece, 2007
36. "Proceq". "Digi-Schmidt 2 ND/LD". Operating Instructions. — Zürich, Switzerland: "Proceq SA", 1996
37. Rollet, F., Mansell, M., Cochran, S. Determining moisture content in concrete under simulated precipitation using ultrasonic propagation time measurements. Nondestructive Testing and Evaluation, Vol. 23, No. 4, December 2008
38. Samarin, A., Meynink P. Use of Combined Ultrasonic and Rebound Hammer Method for Determining Strength of Concrete Structural Members. Journal of American Concrete Institute. Concrete International, March, 1981
39. Sengpiel, E. Calculation of the Speed of Sound in Air and the effective Temperature. Studiotechnik Aufnahmetechnik Tontechnik Forum Sengpielaudio. Universität der Künste Berlin - UdK. <http://www.sengpielaudio.com/calculator-speedsound.htm>
40. Sun Z., Voigt T., Shah S. P. Temperature Effects on Strength Evaluation of Cement-Based Materials with Ultrasonic Wave Reflection Technique. ACI Materials Journal, V. 102, No. 4. Title no. 102-M31. 275, 2005
41. Trinklein, F. E. Modern Physics. New York. 1990: 256
42. Turgut, P. Research into the correlation between concrete strength and UPV values. NDT.net, Vol. 12, December, 2004
43. Vogt, C., Laihem, K., Wiebusch, C. Speed of sound in bubble-free ice. Acoustical Society of America. J. Acoust. Soc. Am. 124 (6), December, 2008
44. Voigt T. The Application of an Ultrasonic Shear Wave Reflection Method for Nondestructive Testing of Cement-Based Materials at Early Ages. An Experimental and Numerical Analysis. University of Leipzig, Germany, 2005
45. Wen, T., Garrison, G. R., Francois, R. E., Stein, R. P., Felton, W. J. Sound Speed, Reflectivity, and Absorption Measurements in Arctic Ice in 1988. Applied Physics Laboratory University of Washington. Technical Report. APL-UW TR 9005. March 1991
46. Yaman, I. O., Inci, G., Yesiller, N., Aktan, H. M. Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete Using Direct and Indirect Transmission. Journal of American Concrete Institute. Title no. 98-M48. ACI Materials Journal/November-December 2001
47. Zitzewitz, N., Davids, M. Physics: Principles and Problems, New York: Glencoe, 1995: 308

*Krievu valodā/in Russian:*

1. Адилходжаев Ш. А. Ультразвуковые методы в обследовании несущих конструкций эксплуатируемых зданий. Неразрушающие методы испытаний строительных материалов и конструкций. Министерство народного образования Латвийской Ресублики. РТУ, Рига, 1990
2. Алимов А. Г. Ультразвуковое диагностирование бетонных и железобетонных конструкций гидротехнических сооружений. Энергопрогресс. Гидротехническое строительство №7, 2007
3. Алимов А. Г. Совершенствование теоритических основ ультразвукового диагностирования бетонных и железобетонных конструкций гидротехнических сооружений. Энергопрогресс. Гидротехническое строительство №2, 2007
4. Воронова И. Т., Зарецкий-Феоктистов Г. Г., Рапопорт Ю. М., Анисимов А. И. Особенности измерения скорости распространения ультразвуковых колебаний при поверхностном прозвучивании на малых базах. Неразрушающие методы испытаний строительных

материалов и конструкций. Министерство высшего и среднего специального образования Латвийской ССР. Рига, 1982

5. Галан А. Комбинированный неразрушающий метод определения прочности бетона в изделиях и в конструкциях. Неразрушающие методы испытаний строительных материалов и конструкций. Министерство высшего и среднего специального образования Латвийской ССР. Рига, 1980
6. Глинчиков В. С., Макагонов В. А. О связи между прочностными и акустическими характеристиками бетонов при высоких температурах. Неразрушающие методы испытаний строительных материалов и конструкций. Министерство высшего и среднего специального образования Латвийской ССР. Выпуск 1. Рига, 1974
7. Горшков А. М., Мизрохи Ю. Н., Цинцкиладзе Д. М., Лярский В. П. Контроль твердения бетона ультразвуковым методом. "Бетон и железобетон", №7. 1969
8. Граудиньш В. А., Дзенис В. В., Рутковский А. С. Исследование влияния базы прозвучивания и угла наклона преобразователей на скорость ультразвука в зависимости от вида волновода. Неразрушающие методы испытаний строительных материалов и конструкций. Министерство народного образования Латвийской Республики. РТУ, Рига, 1990
9. Дефектоскоп ультразвуковой низкочастотный "А1220 Монолит". Паспорт. Руководство по эксплуатации: «Акустические контрольные системы», Москва, 2004
10. Джонс Р., Фэкзоару И. Неразрушающие методы испытаний бетонов. Москва, Стройиздат, 1974
11. Дзенис В. В. Применение ультразвуковых преобразователей с точечным контактом неразрушающего контроля. Политехнический институт им. А. Я. Пельше. Рига «Зинатне», 1987
12. Дзенис В. В., Кадлачек В., Галан А., Догналек И. Вопросы геометрической дисперсии ультразвуковых волн в бетоне. Неразрушающие методы испытаний строительных материалов и конструкций. Министерство высшего и среднего специального образования Латвийской ССР. Рига, 1980
13. Дзенис В. В., Васильев В. Г., Зоммер И. Э., Лайвиньш Э. Я., Лусис Ю. Э., Новикс Ю. А. Акустические методы контроля в технологии строительных материалов. Стройиздат, Ленинградское отделение. Ленинград, 1978
14. Дзенис В. В., Лапса В. Х. Ультразвуковой контроль твердеющего бетона. Издательство литературы по строительству, Ленинград, 1971
15. Ермолов И. Н., Ермолов М. И. Ультразвуковой контроль. Учебник для специалистов первого и второго уровней квалификации. Издание третье. Москва, 2000
16. Ермолов И. Н., Алешин Х. П., Потапов А. И. Неразрушающий контроль. Книга 2. Акустические методы контроля. «Высшая школа», Москва, 1991
17. Зарецкий-Феокистов Г. Г., Рапопорт Ю. М., Хейфец А. С. Некоторые вопросы ультразвукового определения модуля упругости крупноструктурных материалов. Неразрушающие методы испытаний строительных материалов и конструкций. Министерство высшего и среднего специального образования Латвийской ССР. Рига, 1980
18. Защук И. В. Электроника и акустические методы испытания строительных материалов. Издательство «Высшая школа», Москва, 1968
19. Зиновьев В. Н. Зависимость скорости (времени) прохождения ультразвука от напряжений в бетоне при статическом одноосном кратковременном сжатии. Известия КГТУ №25. Научный журнал. ОАО «Калининградпромпроект», г. Калининград, Россия, 2012

20. Иносов В. Л., Городжа А. Д. Оперативный контроль забивных железобетонных свай. Неразрушающие методы испытаний строительных материалов и конструкций. Министерство высшего и среднего специального образования Латвийской ССР. Рига, 1980
21. Инструкция по контролю качества бетона с помощью ультразвукового прибора типа УКБ-1, ДУК-20, УКБ-1М. Научно-исследовательский институт строительных конструкций Госстроя СССР. Киев, 1964
22. Каплан А. С., Грапп В. Б. Определение прочности ультразвуковым методом при испытании бетона на морозостойкость. Использование ультразвуковых поверхностных волн для контроля прочности бетона. Неразрушающие методы испытаний строительных материалов и конструкций. Министерство высшего и среднего специального образования Латвийской ССР. Выпуск 1. Рига, 1974
23. Клюевский Б. В. Изменение физико-механических свойств тяжелого бетона в процессе тепловлажностной обработки. Неразрушающие методы испытаний строительных материалов и конструкций. Министерство высшего и среднего специального образования Латвийской ССР. Рига, 1980
24. Коревицкая М. Г. Неразрушающие методы контроля качества железобетонных конструкций. Учебное пособие. — Москва: "Высшая школа", 1989
25. Коротков С. Н., Коскин Е. С., Бабилова Г. Н. Исследование некоторых свойств бетона и производственный опыт контроля прочности сборных железобетонных изделий с помощью ультразвука. Исследования по бетону и железобетону. Сборник статей VII. Издательство Академии наук Латвийской ССР. Рига, 1963
26. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости. Издание четвертое. Москва "Наука". Главная редакция Физико-математической литературы, 1987.
27. Лапса В. Х. Ультразвуковой импульсный метод контроля качества строительных материалов и конструкций. Учебное пособие. — Рига: Редакционно-издательский отдел МИПКСНХ ЛатвССР, 1981
28. Межгосударственный стандарт России ГОСТ 10060.1-95 Бетоны. Базовый метод определения морозостойкости. 1996
29. Межгосударственный стандарт России ГОСТ 17624-87. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности. 1988
30. Межгосударственный стандарт России ГОСТ 26134-84 Бетоны. Ультразвуковой метод определения морозостойкости. 1985
31. Межгосударственный стандарт России ГОСТ 12730.2-78. Бетоны. Метод определения влажности. 1980
32. Межгосударственный стандарт России ГОСТ 12730.3-78. Бетоны. Метод определения водопоглощения. 1980
33. Методические указания по определению прочности бетона ультразвуковым методом по ГОСТ 17624. ВНИИР. Москва, 2004
34. Нельсон И. А. Влияние некоторых технологических факторов на методику проведения ультразвукового контроля качества бетона. Исследования по бетону и железобетону. Сборник статей VII. Издательство Академии наук Латвийской ССР. Рига, 1963
35. Новикс Ю. А., Граудиньш В. А. Влияние ширины образцов на скорости распространения продольных и изгибных волн. Неразрушающие методы испытаний строительных материалов и конструкций. Министерство высшего и среднего специального образования Латвийской ССР. Рига, 1982

36. Рутковский А. С., Новикс Ю. А. Влияние шероховатости поверхности и армирования на скорость распространения ультразвука. Неразрушающие методы испытаний строительных материалов и конструкций. Министерство высшего и среднего специального образования Латвийской ССР. Рига, 1980
37. Рутковский А. С., Трибис В. В. Опыт контроля прочности бетона железобетонных изделий и конструкций на ЖБК-3 гор. Риги МПСМ Латвийской ССР. Неразрушающие методы испытаний строительных материалов и конструкций. Министерство высшего и среднего специального образования Латвийской ССР. Рига, 1980
38. Стависки Б., Новикс Ю. А., Рутковский А. С. Исследование однородности пропаренного бетона при помощи продольных и поверхностных ультразвуковых волн. Неразрушающие методы испытаний строительных материалов и конструкций. Министерство высшего и среднего специального образования Латвийской ССР. Рига, 1982
39. Филипсонс В. О., Новикс Ю. А. Натурные обследования качества бетонного покрытия ультразвуковым методом. Неразрушающие методы испытаний строительных материалов и конструкций. Министерство высшего и среднего специального образования Латвийской ССР. Рига, 1976
40. Филипсонс В. О. Влияние армирования на результаты определения скорости распространения поверхностных ультразвуковых волн в железобетоне. Использование ультразвуковых поверхностных волн для контроля прочности бетона. Неразрушающие методы испытаний строительных материалов и конструкций. Министерство высшего и среднего специального образования Латвийской ССР. Выпуск 1. Рига, 1974
41. Филипсонс В. О., Новикс Ю. А. Использование ультразвуковых поверхностных волн для контроля прочности бетона. Неразрушающие методы испытаний строительных материалов и конструкций. Министерство высшего и среднего специального образования Латвийской ССР. Выпуск 1. Рига, 1974
42. Шевалдыкин В. Г., Самокрутов А. А., Козлов В. Н. Новые аппаратурно-методические возможности ультразвукового прозвучивания композитов и пластмасс. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. №4, том 64, 1998
43. Шевалдыкин В. Г., Самокрутов А. А., Козлов В. Н. Ультразвуковые НЧ пьезопреобразователи с сухим точечным контактом и их применение для НК. <http://www.acsys.ru/article/ultrazvukovye-nch-pezipreobrazovateli-s-sukhim-tochechnym-kontaktom-i-ikh-primenenie-dlya-nk/>
44. Шубенкин П. Ф., Баженов Ю. М. К вопросу испытания бетона ультразвуковым импульсным способом. Исследования по бетону и железобетону. Сборник статей VII. Издательство Академии наук Латвийской ССР. Рига, 1963
45. Тестер ультразвуковой "УК 1401". Паспорт. Руководство по эксплуатации: «Акустические Контрольные Системы», Москва, 2005
46. Указания по неразрушающему контролю качества строительных материалов, изделий и конструкций акустическим импульсным методом. У-1-79. Госстрой Латвийской ССР. Рига, 1979
47. Уржумцев Ю. С., Латишенко В. А. О точности и пределах применения акустических методов испытания бетонов. Исследования по бетону и железобетону. Сборник статей VI. Издательство Академии наук Латвийской ССР. Рига, 1961
48. Ужполявичюс Б. Б. Неразрушающие методы контроля и оценка прочности бетона в железобетонных конструкциях. Издательство "Мокслас", Вильнюс, 1982

### **Par promocijas darba autoru**

Uldis Lencis ir dzimis 1975. gada 21. februārī Jūrmalā, Latvijā. Rīgas Tehniskās universitātes (RTU) Būvniecības fakultātē 2001. gadā iegūts inženierzinātņu maģistra grāds būvniecībā (*Mg. sc. ing.*), bet 2002. gadā — inženiera kvalifikācija būvniecībā.

Pašreizējās darba vietas: RTU Būvniecības inženierzinātņu fakultātes Materiālu un konstrukciju institūta pētnieks; RTU Ēku un inženiertehnisko būvju diagnostikas zinātniski pētnieciskās laboratorijas pētnieks; RTU Būvmateriālu laboratorijas kvalitātes vadītājs.

### **About the Author**

Uldis Lencis was born on 21 February 1975 in Jurmala, Latvia. In 2001 and 2002, he received a Master's Degree in Civil Engineering (Mg.sc.ing.) and a Qualification of Civil Engineer at Riga Technical University (RTU), Faculty of Civil Engineering.

Current workplaces: RTU Faculty of Civil Engineering, Institute of Materials and Structures, Researcher; RTU Scientific Research Laboratory for Diagnostic Study of Buildings and Engineering Structures, Researcher; RTU Laboratory of Building Materials, Quality Manager.

## APSTIPRINĀJUMS / DECLARATION OF ACADEMIC INTEGRITY

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

I hereby declare that the Doctoral Thesis submitted for the review to Riga Technical University for the promotion to the scientific degree of Doctor of Engineering Science is my own and does not contain any unacknowledged material from any source. I confirm that this Doctoral Thesis has not been submitted to any other university for the promotion to any other scientific degree.

Uldis LENCIS .....(Paraksts / signature)

Datums / date: .....

Promocijas darbs uzrakstīts latviešu valodā. Darbā ir ievads, 5 nodaļas, secinājumi un rekomendācijas, 78 attēli, 53 tabulas, literatūras saraksts ar 99 apskatītajiem avotiem un 3 pielikumi. Darbam kopumā ir 144 lappuses.

The Doctoral Thesis has been written in Latvian. It contains introduction, 5 chapters, conclusions, proposals, bibliography with 99 reference sources and 3 appendices. It has been illustrated by 78 figures and 53 tables. The volume of the Doctoral Thesis is 144 pages.