

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Būvniecības inženierzinātņu fakultāte
Siltuma, gāzes un ūdens tehnoloģijas institūts

Oskars LAUVA

Doktora studiju programmas “Siltuma, gāzes un ūdens inženiersistēmas” doktorants

**LĪDZSVARA IZSKALOJUMA LAIKA NOTEIKŠANA PIE ŪDENS
NEMŠANAS BŪVĒM UPJU PALIENĒS**

Promocijas darba kopsavilkums

**EQUILIBRIUM TIME OF SCOUR NEAR
WATER INTAKES ON RIVER FLOODPLAINS**

Summary of Doctoral Thesis

Zinātniskais vadītājs/Scientific supervisor
Profesors, *Dr.sc.ing.*
B. GJUNSBURGS

RTU Izdevniecība
Rīga 2016

Lauva O. Līdzsvara izskalojuma laika noteikšana pie ūdens ņemšanas būvēm upju palienēs/Equilibrium time of scour near water intakes on river floodplains.

Promocijas darba kopsavilkums. – R.: RTU Izdevniecība, 2016, 47 lpp.

Iespiests saskaņā ar Būvniecības inženierzinātņu fakultātes Promocijas padomes P-12 2016. gada 3. oktobra lēmumu, protokols Nr. 10/2016

Printed according to Civil engineering faculty Promotion Council P-12 decision of 3rd October 2016, protocol No. 10/2016

PATEICĪBA

Šī promocijas darba pabeigšana nebūtu bijusi iespējama bez tik daudzu cilvēku palīdzības un līdzdalības, kuru visu vārdus nav iespējams uzskaitīt. Viņu ieguldītais darbs ir patiesi novērtēts. Tomēr es vēlos izteikt visdziļāko pateicību sekojošajiem cilvēkiem:

Profesoram Borisam Gjunsburgam par atbalstu, eksperta ieteikumiem, sapratni un iedrošinājumu visa manā studiju un pētniecības laikā. Bez viņa pacietības un viedajiem padomiem mans promocijas darbs būtu bijis apgrūtināts.

Kolēģiem no Itālijas, Asociētajam Profesoram Alessio Radiče un Profesoram Frančesko Ballio par nebeidzamo atbalstu, laipno uzņemšanu un izpratni mūsu kopīgo pētījumu veikšanas laikā Milānas Tehniskajā Universitātē.

Maniem vecākiem, vecvecākiem, visiem radiem, draugiem un citiem, kas vienā vai otrā veidā deva savu atbalstu gan morāli, gan finansiāli, gan fiziski.

Liels paldies ikvienam.

ACKNOWLEDGEMENT

The completion of this promotional work could not have been possible without the participation and assistance of so many people whose names may not all be enumerated. Their contributions are sincerely appreciated and gratefully acknowledged. However, I would like to express my deep appreciation and indebtedness particularly to the following:

Professor Boriss Gjunsburgs for his full support, expert guidance, understanding and encouragement throughout my study and research. Without his incredible patience and timely wisdom and counsel, my thesis work would have been a frustrating and overwhelming pursuit.

Associated Professor Alessio Radice and Professor Francesco Ballio for their endless support, kind and understanding spirit during our research projects at Politecnico di Milano.

To my parents, grandparents, all relatives, friends and others who in one way or another shared their support, either morally, financially and physically.

Thank you very much, everyone.

Oskars Lauva

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2016. gada 2. novembrī Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības inženierzinātņu fakultātē, Ķīpsalas ielā 6A, 250. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors, *Dr. habil. sc. ing.* Voldemārs Barkāns
Latvijas Jūras akadēmija, Latvija

Asoc. profesors, *Dr. sc. ing.* Algirdas Radzevičius
Aleksandras Stulginskis University, Lietuva

Asoc. Professore, *Ing.* Jana Pařílková
Brno University of Technology, Czech Republic

APSTIPRINĀJUMS

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

Oskars Lauva (Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, satur ievadu, 5 nodaļas, slēdzienu, literatūras sarakstu, 3 pielikumus, 25 attēlus, 17 tabulas, kopā 90 lappuses. Literatūras sarakstā ir 91 nosaukums.

Satura rādītājs/ Table of contents

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS	7
Tēmas aktualitāte	7
Darba mērķis un uzdevumi	7
Zinātniskā novitāte un lietojums	9
Darba struktūra un apjoms	9
LITERATŪRAS APSKATS	10
METODE LĪDZSVARA IZSKALOJUMA LAIKA NOVĒRTĒŠANAI PIE ŪDENS ŅEMŠANAS BŪVĒM	12
Robežnosacījums	14
Līdzsvara izskalojuma laika aprēķins praksē	14
EKSPERIMENTU IZEJAS DATI	15
Plūsmas vājināšanas pie krasta balstiem eksperimentu izejas dati	15
Nevienmērīgas plūsmas pie cilindriskā balsta eksperimentu izejas dati	15
Ūdens ņemšanas būvju eksperimentu izejas datu apstrāde	15
Ūdens ņemšanas būvju eksperimentu dati	16
Dator-modelēšanas princips	16
REZULTĀTI	16
Plūsmas vājināšana pie krasta balstiem	16
Nevienmērīga plūsma pie cilindriskā balsta	17
Līdzsvara izskalojuma laiks pie ūdens ņemšanas būvēm	18
Dator-modelēto un aprēķināto laika vērtību salīdzinājums	19
Dažādu autoru aprēķinu metožu izskalojuma laika vērtību salīdzinājums	21
Izstrādātās metodes teorētiskā analīze	21
Izstrādātās metodes grafiskā analīze	22
VIETĒJO IZSKALOJUMU NOTEIKŠANA LATVIJAS LIKUMDOŠANĀ	24
SLĒDZIENS	25
GENERAL DESCRIPTION	27
Topicality	27
Research objective and tasks	27
Scientific novelty and application	29
Scope of the doctoral thesis	29
BACKGROUND AND LITERATURE REVIEW	30
METHOD FOR EQUILIBRIUM TIME OF SCOUR EVALUATION AT WATER INTAKES	32
Threshold condition	34
Equilibrium time of scour calculation in practice	34
EXPERIMENT SET-UP	35
Flow-altering method against scour at abutments experiment set-up	35
Live-bed pier scour experiment set-up	35
Water intake experiment set-up processing	35
Water intake experiment data	36
Computer modelling principle	36
RESULTS	37
Flow-altering method against scour at abutments	37
Live-bed pier scour	37

Equilibrium time of scour at water intakes.....	39
Comparison of calculated and computer modeled equilibrium times of scour	39
Comparison of time of scour values computed by different author formulas.....	41
Developed method theoretical analysis	41
Developed method graphical analysis	42
LOCAL SCOUR RECOGNITION IN LATVIAN LEGISLATION.....	44
CONCLUSION	45
Publikāciju saraksts/List of publications	47

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Ekonomisko zaudējumu ziņā Eiropas Vides Aģentūra upju pārplūšanas un vētras identificē kā vispostošākās dabas katastrofas Eiropas Savienībā. Augstu un ļoti augstu plūdu risks laika posmā no 2000. līdz 2012. gadam nav būtiski mainījies. Tomēr tiek prognozēts, ka dēļ izmaiņām klimatā plūdu parādīšanās palielināsies. Galvenais paaugstinātu plūdu parādīšanās iemesls ir ziemas nokrišņu palielināšanās, kas novērojama gandrīz visā Eiropā, izņemot Vidusjūras reģionu.

Neskatoties uz pētnieku ievērojamo ieguldījumu vietējo izskalojumu izpētē, ūdens inženierbūves turpina sabrukt dēļ izskalošanas procesiem. Tiek uzskatīts, ka tās ir daļējas izskalojuma procesu vienkāršošanas sekas, empīrisku metožu piemērošana, nepilnības starp laboratorijas apstākļiem un realitāti dabā, kā arī esošais zināšanu līmenis par plūsmas hidraulikas un izskalojumu sarežģītību.

Līdzsvara izskalojuma laika vērtības tiek izmantotas līdzsvara izskalojuma aprēķinos, kur ir būtiski lietot visprecīzākās laika noteikšanas metodes. Uzticama izskalojuma laika noteikšanas metode var sniegt priekšrocības inženieriem noteikt, kad ir sasniegts līdzsvara izskalojuma dziļums, lai varētu novērtēt ūdens inženierbūves stabilitāti.

Šis darbs ir kā turpinājums iepriekš veiktiem pētījumiem upju hidraulikas jomā, kurus izstrādājuši Rīgas Tehniskās Universitātes, Siltuma, Gāzes un ūdens tehnoloģiju institūta pētnieki: B. Gjunsburgs, R.R. Neilands, R. Neilands un G. Jaudzems. Tālākus pētījumus par gultnes slāņainības ietekmi uz izskalojuma laiku izstrādā E. Govša.

Darba mērķis un uzdevumi

Promocijas darba mērķis ir jaunas līdzsvara izskalojuma laika aprēķinu metodes izstrādāšana pie ūdens ņemšanas būvēm ar un bez plūsmas atdalīšanas pie būves upju palienēs, vienmērīgas plūsmas apstākļos, ņemot vērā sekojošos parametrus: plūsmas saspīestību, vietējo plūsmas ātrumu, gultnes slāņainību, plūdu ilgumu, plūdu secību, plūdu varbūtību, plūdu biežumu, relatīvo izskalojuma dziļumu, densimetrisko Fruda skaitli un vidējo smilšu daļiņu lielumu.

Lai sasniegtu pētījuma mērķi, tika noteikti šādi uzdevumi:

1. Analizēt literatūrā atrodamās līdzsvara izskalojuma laika noteikšanas metodes pie tiltu/krasta balstiem, lai noskaidrotu kādus robežnosacījumus un parametrus izmanto līdzsvara izskalojuma laika aprēķinos;
2. Izstrādāt līdzsvara izskalojuma laika noteikšanas metodi vienmērīgas plūsmas apstākļos pie ūdens ņemšanas būvēm ar un bez plūsmas atdalīšanos pie būves;
3. Ierosināt jaunu hidraulisko robežnosacījumu līdzsvara izskalojuma laika noteikšanai, ņemot vērā plūsmas hidrauliskos parametrus;
4. Izveidot vienkāršotas pieejas secību kā noteikt līdzsvara izskalojuma laiku praksē; izstrādāt elektronisku līdzsvara izskalojuma laika aprēķinu modeli datora vidē;
5. Izpētīt kā plūsmas vājināšana ietekmē līdzsvara izskalojuma dziļumu un laiku pie krasta balstiem;
6. Veikt nevienmērīgas plūsmas eksperimentus pie cilindriskā balsta un izpētīt kā nevienmērīga plūsma ietekmē līdzsvara izskalojuma dziļumu un laiku pie cilindriskā balsta;
7. Izmantojot dator-modelēšanu pagarināt ūdens ņemšanas būvju eksperimentu datus līdz līdzsvara stāvoklim; apkopot dator-modelētos un aprēķinātos datus; analizēt līdzsvara izskalojuma laiku pēc pienākošās plūsmas Fruda skaitļa un plūsmas saspiešanas pakāpes;
8. Salīdzināt dator-modelētās un aprēķinātās līdzsvara izskalojuma laika vērtības, aprēķināt relatīvo kļūdu un uzzīmēt sakritības līkni, lai pārbaudītu izstrādāto metodi;
9. Aprēķināt līdzsvara izskalojuma laikus, izmantojot citu autoru metodes un datus no ūdens ņemšanas būvju eksperimentiem; salīdzināt un analizēt rezultātus;
10. Veikt izstrādātās līdzsvara izskalojuma laika noteikšanas metodes teorētisko analīzi atkarībā no hidrauliskiem un grunts parametriem;
11. Grafiski analizēt hidraulisko un grunts parametru ietekmi uz līdzsvara izskalojuma laiku;
12. Izpētīt vietējo izskalojumu noteikšanas metodes Latvijas likumdošanā.

Zinātniskā novitāte un lietojums

Tika izstrādāta jauna līdzsvara izskalojuma laika noteikšanas metode pie ūdens ņemšanas būvēm vienmērīgas plūsmas apstākļos. Izstrādāto metodi var izmantot līdzsvara izskalojuma laika aprēķināšanai pie ūdens ņemšanas būvēm ar un bez plūsmas atdalīšanas pie būves, kā arī citām ūdens inženierbūvēm kā tiltu/krasta balstiem, virzītāj dambjiem, aizsprostiem un ceļu daļām, kas atrodas upju palienēs. Kritiskā un vietējā plūsmas ātrumu attiecība tiek piedāvāta kā jauns hidrauliskais robežnosacījums līdzsvara izskalojuma laika aprēķināšanai. Tika piedāvāta jauna teorija, kas apstiprina, ka vietējā un kritiskā plūsmas ātruma izmaiņas ir būtiskas izskalojuma veidošanās procesā, un ka vietējam ātrumam, ne vidējam plūsmas ātrumam ir ietekme uz vietējā izskalojuma attīstību. Tika apstiprināta plūsmas saspīestības pakāpes un vietējā plūsmas ātruma ietekme uz līdzsvara izskalojuma laiku.

Piedāvātā metode sniedz informāciju par laiku, kurā tiks sasniegts noteikts vietējā izskalojuma dziļums, tādējādi dodot iespēju novērtēt būves stabilitāti laikā, mainoties izskalojuma dziļumam. Metode arī ļauj modelēt līdzsvara izskalojuma laiku, palielinoties plūsmas intensitātei un dziļumam.

Ieteikto metodi var izmantot kā līdzsvara izskalojuma laika noteikšanas rīku, kā arī, apvienojumā ar citām izskalojuma dziļuma aprēķinu metodēm, noteikt līdzsvara izskalojuma dziļumu.

Darba struktūra un apjoms

Promocijas darbā ir ievads, 5 nodaļas, slēdziens, 3 pielikumi, 91 literatūras atsauce, 25 attēli un 17 tabulas – kopā 90 lappuses.

1. nodaļa iekļauj tēmas un literatūras apskatu par līdzsvara izskalojuma laika aprēķināšanas metodēm nemainīgas plūsmas apstākļos.

2. nodaļā “Metode līdzsvara izskalojuma laika novērtēšanai pie ūdens ņemšanas būvēm” tiek piedāvāta jauna metode līdzsvara izskalojuma laika noteikšanai pie ūdens ņemšanas būvēm.

3. nodaļa “Eksperimentu izejas dati” iekļauj iepriekš veiktu plūsmas vājināšanas metodes pie krasta balstiem eksperimentu aprakstu, nesen veiktu nevienmērīgas plūsmas pie cilindriskā balsta eksperimentu aprakstu, kā arī iepriekš publicētu ūdens ņemšanas būvju eksperimentu datus.

4. nodaļā “Rezultāti” tiek izklāstīti plūsmas vājināšanas metodes pie krasta balstiem rezultāti, kuros aprakstīta plūsmas vājināšanas ietekme uz izskalojuma dziļumu un laiku; nevienmērīgas plūsmas pie cilindriskā balsta rezultāti, kuros aprakstīta nevienmērīgas plūsmas ietekme uz izskalojuma dziļumu un laiku; kā arī iepriekš publicētu ūdens ņemšanas būvju eksperimentu datu salīdzinājums ar aprēķinu rezultātiem, pamatojoties uz metodi, kas aprakstīta 2. nodaļā. Apstrādājot ūdens ņemšanas būvju datus tika pētīta un aprakstīta Fruda skaitļa un plūsmas saspīestības ietekme uz izskalojuma laiku, aprēķinātas relatīvās kļūdas, pēc kurām tika sastādītas datu sakritības līknes, aprēķinātas izskalojuma laika vērtības pēc citu autoru metodēm un salīdzinātas ar izstrādātās metodes rezultātiem. Veikta izstrādātās metodes teorētiskā un grafiskā analīze, parādot un aprakstot hidraulisko un grunts parametru ietekmi uz līdzsvara izskalojuma laiku.

5. nodaļā “Vietējo izskalojumu noteikšana Latvijas likumdošanā” apkopota informācija par Latvijā pieejamo likumdošanu, ko jāievēro projektējot ūdens inženierbūves.

LITERATŪRAS APSKATS

Izskalojuma dziļuma noteikšana pie ūdens inženierbūvēm ir problēma, kas gadiem nomākusi inženieru prātus. Pēdējos gados ir veikti plaši pētījumi, lai atrastu metodi efektīvai līdzsvara izskalojuma dziļuma noteikšanai pie ūdens inženierbūvēm.

Līdzsvara izskalojuma laiks pie ūdens ņemšanas būvēm vēl nav pētīts.

Tā kā izskalojuma process nekad nebeidzas, tad ir nepieciešams robežnosacījums līdzsvara izskalojuma novērtēšanai. Robežnosacījumi, kas atrodami literatūrā nosaka, ka ir sasniegts līdzsvara izskalojuma dziļums un laiks, ja 24 stundu laikā: (a) izskalojuma dziļums palielinās par mazāk kā 5 % no balsta diametra (Melville un Chiew, 1999); vai (b) par mazāk kā 5 % no pienākošās plūsmas dziļuma vai balsta garuma (Coleman u.c., 2003); vai (c) par mazāk kā 5 % no 1/3 no balsta

diametra (Grimaldi u.c., 2006). Piedāvātie robežnosacījumi ir atkarīgi no fiziskiem plūsmas vai būves parametriem, bet ne no hidrauliskiem plūsmas parametriem. Līdzsvara laiku, t_e definē kā laiku, kas atbilst galvenās izskalojuma fāzes beigām un līdzsvara fāzes sākumam.

Lielākā daļa no līdzsvara izskalojuma laika noteikšanas metodēm ir iegūtas no empīriskām pieejām un dimensiju analīzēm. Raksturīgi, ka līdzsvara izskalojuma laika vienādojumi ir izstrādāti, izmantojot regresijas analīzes no vietējo izskalojumu laboratorijas eksperimentos iegūtiem datiem, kas parasti veikti kanālos ar idealizētiem apstākļiem.

Kaut arī literatūrā atrodami daudzi pētījumi par vietējiem izskalojumiem ap tiltu/krasta balstiem, tomēr izskalojuma laika pētījumi ap tiltu/krasta balstiem vienmērīgas plūsmas apstākļos vēl joprojām ir ierobežotā daudzumā.

Lielākā daļa no līdzsvara izskalojuma laika aprēķinu metodēm ir ierobežotas ar zināmiem plūsmas, grunts vai būves parametriem, līdz ar to metodes nav izmantojamas ārpus noteiktajiem ierobežojumiem. Visizplatītākais noteiktais ierobežojums ir pienākošās plūsmas ātruma un kritiskā ātruma attiecība, tomēr tiek izmantoti arī citi ierobežojumi, kā pienākošās plūsmas ātruma un balsta garuma attiecība vai balsta garuma un smilšu daļiņu vidējā izmēra attiecība.

Literatūras apskatā izceļas tālāk minētie secinājumi:

- 1) Pienākošās plūsmas dziļums un ātrums, balsta garums vai diametrs, smilšu daļiņu vidējais izmērs un blīvums tiek uzskatīti kā pamata parametri līdzsvara izskalojuma laika aprēķinos;
- 2) Literatūrā nav atrodama līdzsvara izskalojuma laika noteikšanas metode pie ūdens ņemšanas būvēm, kurā tiktu ņemti vērā sekojošie parametri: plūsmas saspīestība, vietējais plūsmas ātrums pie būves, plūdu ilgums, plūdu secība, plūdu varbūtība, plūdu biežums, kā arī grunts slāņainība.

METODE LĪDZSVARA IZSKALOJUMA LAIKA NOVĒRTĒŠANAI PIE ŪDENS ŅEMŠANAS BŪVĒM

Sanešu kustības diferenciālvienādojums vienmērīgā plūsmā ir:

$$(1 - p) \frac{dW}{dt} = Q_s, \quad (1)$$

kur p – grunts materiāla porainība;
 W – izskalojuma bedres tilpums pie ūdens ņemšanas būves ar plūsmas atdalīšanos no tās, $(1 - p) \cdot W = 1/6 \pi m^2 h_s^3$ (pie ūdens ņemšanas būves bez plūsmas atdalīšanās $(1 - p) \cdot W = 1/5 \pi m^2 h_s^3$), m^3 (Gjunsburgs u.c., 2006);
 m – izskalojuma bedres nogāzes slīpums;
 h_s – izskalojuma bedres dziļums, m;
 t – laiks, s;
 Q_s – sanešu kustība no izskalojuma bedres, m^3/s .

Ūdens ņemšanas būvēm ar plūsmas atdalīšanos pie būves Vienādojuma (1) kreisā puse var tikt izteikta kā:

$$(1 - p) \frac{dW}{dt} = \frac{1}{2} \pi m^2 h_s^2 \frac{dh_s}{dt} = a h_s^2 \frac{dh_s}{dt}, \quad (2)$$

kur $a = 1/2 \pi m^2$.

Ūdens ņemšanas būvēm bez plūsmas atdalīšanos pie būves Vienādojuma (1) kreisā puse var tikt izteikta kā:

$$(1 - p) \frac{dW}{dt} = \frac{3}{5} \pi m^2 h_s^2 \frac{dh_s}{dt} = a h_s^2 \frac{dh_s}{dt}, \quad (3)$$

kur $a = 3/5 \pi m^2$.

Sanešu kustība tiek noteikta ar Levi (1969) formulu:

$$Q_s = AB \cdot V_l^4, \quad (4)$$

kur A – parametrs Levi (1969) formulā;
 $B = m h_s$ – izskalojuma bedres platums, m;
 V_l – vietējais plūsmas ātrums pie ūdens ņemšanas būves, m/s.

Parametrs A ir atkarīgs no izskalojuma dziļuma, vietējā plūsmas ātruma, kritiskā ātruma, grunts daļiņu izmēra. Aprēķinu gaitā ir jāņem vērā, ka vietējais plūsmas ātrums V_l un kritiskais ātrums V_0 mainās līdz ar izskalojuma dziļuma izmaiņām laikā.

Kritisko plūsmas ātrumu V_0 pie ūdens ņemšanas būves un pie līdzenas gultnes var noteikt pēc Studenitnikov (1964) formulas:

$$V_0 = 1.15 \sqrt{g} \cdot d_i^{0.25} \cdot h_f^{0.25}, \quad (5)$$

kur g – brīvās krišanas paātrinājums, m/s^2 ;
 d_i – gultnes daļiņu izmērs, m ;
 h_f – ūdens plūsmas dziļums palienē, m .

No Vienādojuma (5) tiek izvilktā kvadrātsakne no g un sareizināta ar 1.15, tādējādi iegūstot $3.6 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$, ko ievieto Vienādojumā (5) un iegūst $V_0 = 3.6 d_i^{0.25} h_f^{0.25}$.

Kritisko plūsmas ātrumu V_{0t} pie ūdens ņemšanas būves jebkurā izskalojuma dziļumā var noteikt pēc formulas:

$$V_{0t} = \beta \cdot 3.6 \cdot d_i^{0.25} \cdot h_f^{0.25} \left(1 + \frac{h_s}{2h_f} \right)^{0.25}, \quad (6)$$

kur β – kritiskā plūsmas ātruma samazinājuma koeficients (pēc Rozovskyi, 1956);
 $h_m = h^{0.25} (1 + h_s/2h_f)^{0.25}$ – vidējais izskalojuma bedres dziļums, m .

Izsakot Vienādojumu (1) ar Vienādojumiem (2–3), aizvietojo not mainīgās vērtības un to integrējot tiek iegūta aprēķina formula izskalojuma laika noteikšanai:

$$t_i = 4D_i h_f^2 (N_i - N_0), \quad (7)$$

kur D_i – konstants parametrs noteikta laika ietvaros;
 $N_i = 1/6 \cdot x_i^6 - 1/5 \cdot x_i^5$;
 $N_0 = 1/6 \cdot x_0^6 - 1/5 \cdot x_0^5 = -0.033$ – parametrs, lai aprēķinātu izskalojuma dziļumu iepriekšējā laika solī;
 $x_i = 1 + h_s/2h_f$ – relatīvais izskalojuma dziļums.

Izmantojot Vienādojumu (7) un tajā ievietojot līdzsvara izskalojuma vērtības ir iespējams aprēķināt līdzsvara izskalojuma laiku:

$$t_{equil} = 4D_{equil} h_f^2 (N_{equil} - N_0), \quad (8)$$

kur D_{equil} – līdzsvara izskalojuma vērtība parametram D_i ;
 $N_{equil} = 1/6 \cdot x_{equil}^6 - 1/5 \cdot x_{equil}^5$;
 $x_{equil} = 1 + h_{equil}/2h_f$;
 h_{equil} – līdzsvara izskalojuma dziļums, m .

Pilns aprēķina metodes apraksts izklāstīts pamatdarba 2. nodaļā.

Izmantojot līdzsvara izskalojuma dziļuma vērtību ir iespējams atrast parametru A_{equil} , D_{equil} , N_{equil} vērtības un tālāk noteikt t_{equil} vērtību.

Kad vietējais plūsmas ātrums kļūst vienāds ar kritisko plūsmas ātrumu, tad $A_{equil} = 0$, $D_{equil} = \infty$ un $t_{equil} = \infty$. Ir nepieciešami robežnosacījuma kritēriji, lai varētu aprēķināt līdzsvara izskalojuma laiku pie ūdens ņemšanas būvēm.

Robežnosacījums

Līdzsvara izskalojuma laika aprēķināšanai pie ūdens ņemšanas būvēm ir nepieciešams jauns robežnosacījums, kas atkarīgs no hidrauliskiem plūsmas parametriem. Kritiskās plūsmas un vietējā plūsmas ātruma pie būves attiecība ir ierosināts kā hidrauliskais robežnosacījums līdzsvara izskalojuma noteikšanai pie ūdens ņemšanas būvēm.

Saskaņā ar dator-modelēšanas rezultātiem izskalojums rimst, kad vietējais plūsmas ātrums kļūst vienāds ar kritisko ātrumu, tad līdzsvara izskalojuma laiks ir bezgalīgs. Tika pieņemtas dažādas robežnosacījuma vērtības, lai atrastu labāko datu sakritību starp dator-modelētajām un aprēķinātajām līdzsvara izskalojuma laika vērtībām, kā rezultātā piedāvātais robežnosacījums, kas uzrādīja vislabākos rezultātus ir vienāds ar:

$$\frac{BV_{0t}}{V_{lt}} = \frac{BV_0}{V_l} \left(1 + \frac{h_{equil.}}{2h_f} \right)^{1.25} = 0.985. \quad (9)$$

Līdzsvara izskalojuma laika aprēķins praksē

Ņemot vērā robežnosacījumu no Vienādojuma (9), ir iespējams noteikt līdzsvara izskalojuma laika t_{equil} vērtību, izmantojot šo secību:

- 1) Aprēķināt līdzsvara izskalojuma dziļumu h_{equil} ;
- 2) Izskaitļot parametra A_{equil} vērtību no Levi (1969) formulas, izmantojot iepriekšējā solī aprēķināto līdzsvara izskalojuma dziļuma vērtību h_{equil} ;
- 3) Noteikt parametra D_{equil} vērtību, izmantojot iepriekšējā solī aprēķināto A_{equil} vērtību;
- 4) Aprēķināt relatīvā izskalojuma dziļuma x_{equil} vērtību, izmantojot līdzsvara izskalojuma dziļuma vērtību no 1. soļa;

- 5) Izskaitļot parametra N_{equil} vērtību, izmantojot relatīvā izskalojuma dziļuma x_{equil} vērtību no iepriekšējā soļa;
- 6) Visbeidzot noteikt līdzsvara izskalojuma t_{equil} vērtību, izmantojot h_{equil} , D_{equil} , un N_{equil} vērtības no soļiem 1, 3 un 5.

EKSPERIMENTU IZEJAS DATI

Plūsmas vājināšanas pie krasta balstiem eksperimentu izejas dati

Plūsmas vājināšanas eksperimenti pie krasta balstiem tika veikti Milānas Tehniskās Universitātes, Hidraulikas laboratorijā, Itālijā. Tika izmantots taisnstūra formas kanāls, 5.8 m garš, 0.40 m plats un 0.16 m augsts, ar 0.40 m augstu sanešu tvertni. Izskalojumu eksperimenti tika veikti pie vienmērīgas plūsmas.

Nevienmērīgas plūsmas pie cilindriskā balsta eksperimentu izejas dati

Nevienmērīgas plūsmas eksperimenti pie cilindriskā balsta tika veikti Milānas Tehniskās Universitātes, Hidraulikas laboratorijā, Itālijā. Tika izmantots taisnstūra formas kanāls, 5.8 m garš, 0.40 m plats un 0.16 m augsts, ar 0.40 m augstu sanešu tvertni. Tika veiktas vairākas izmaiņas nevienmērīgas plūsmas apstākļu nodrošināšanai, ka rezultātā kanāla sākumā tika uzstādīts sanešu padevējs, bet kanāla beigās – sanešu ķērājs. Arī sanešu tvertne tika modificēta. Tvertnes pārsedzes vākā tika izveidots pjezometrs, tvertnē tika izbūvēta viltus grīda, uz kuras tika ieklāts smalka filtra audums, kas tika pārklāts ar smilšu maisiem un sanešiem.

Nevienmērīgas plūsmas eksperimenti ar cilindrisku balstu tika veikti pie dažādām plūsmas intensitātēm, kas pārsniedz kritisko plūsmu 1.2, 1.4 un 1.6 reizes.

Ūdens ņemšanas būvju eksperimentu izejas datu apstrāde

Ūdens ņemšanas būvju eksperimenti tika veikti Transporta Izpētes institūtā, Krievijā. Kanāla platums bija 3.5 m, bet garums 21 m.

Atveres attālumi no ūdens ņemšanas būves modeļa līdz otram krastam bija 50, 80, 120, un 200 cm. Plūsmas saspīestības pakāpe Q/Q_b (kur Q ir plūsmas daudzums kanālā, un Q_b ir plūsmas daudzums saspīestajā kanāla daļā) svārstījās robežās no 1.56 līdz 5.69 ar ūdens līmeni palienē 7 cm, un Fruda skaitlis svārstījās robežās no 0.078

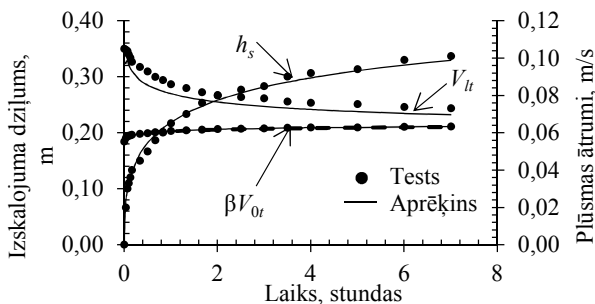
līdz 0.124; kanāla gultnes slīpums bija 0.0012. Eksperimenti tika veikti pie vaļējas plūsmas ar diviem dažādiem smilšu izmēriem.

Ūdens ņemšanas būvju eksperimentu dati

Eksperimentu dati tika ņemti no Gjunsburgs un Neilands (2001) publicētā materiāla, kā arī izskalojuma dziļuma dator-modelēšanai laikā tika izmantota (Gjunsburgs un Neilands, 2006) izskalojuma dziļuma aprēķinu metode.

Dator-modelēšanas princips

Izmantojot datorprogrammu “RoBo” (Gjunsburgs u.c., 2006), ūdens ņemšanas būvju eksperimentu ilgums no 7 stundām tika pagarināts līdz izskalojums sasniedza līdzsvara stāvokli.



Attēls 1. Izskalojuma dziļuma, vietējā un kritiskā plūsmas ātrumu izmaiņas laikā (Tests AL4)

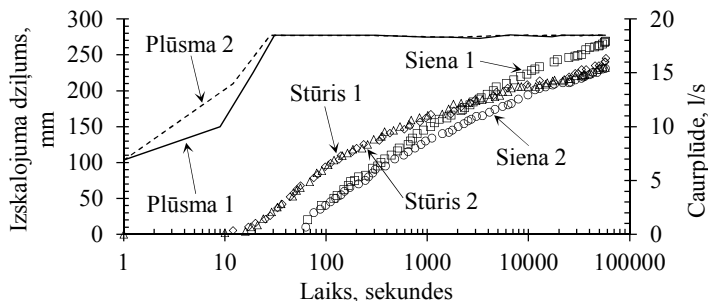
Katra laika intervāla beigās, dēļ izmaiņām izskalojuma dziļumā h_s , mainās gan vietējā plūsmas ātruma V_{lt} , gan kritiskā plūsmas ātruma βV_{0r} vērtības. Palielinoties izskalojuma dziļumam, vietējais plūsmas ātrums samazinās, bet kritiskais – palielinās (Attēls 1).

REZULTĀTI

Plūsmas vājināšana pie krasta balstiem

Salīdzinot eksperimentu rezultātus pie krasta balstiem ar (Tests 2) un bez (Tests 1) plūsmas vājināšanas elementiem var secināt, ka izmantojot plūsmas vājināšanas

elementus galvenokārt tiek samazināts izskalojuma dziļums pie sienas, un nedaudz tiek samazināts izskalojuma dziļums arī pie būves stūra. Izskalojuma bedrei bija jāsasniedz noteikts izskalojuma dziļums ($h_s = 100$ mm), kad plūsmas vājināšanas elementi sāka efektīvi iedarboties uz plūsmu un mazināt izskalojuma intensitāti pie sienas. Pēc 16 stundām, kas bija abu eksperimentu beigu laiks, izskalojuma dziļuma samazinājums pie sienas bija 14 %, bet pie stūra – 5 % (Attēls 2).



Attēls 2. Izskalojuma dziļuma attīstība pie krasta balstiem

Nevienmērīga plūsma pie cilindriskā balsta

Kopumā nevienmērīgas plūsmas eksperimenti tika veikti pie 4 dažādām plūsmas intensitātēm $Q/Q_c = 0.9$, $Q/Q_c = 1.2$, $Q/Q_c = 1.4$, un $Q/Q_c = 1.6$ (kur Q ir plūsmas kanālā, bet Q_c ir kritiskā plūsma). Eksperimentu rezultāti parādīja, ka izskalojuma attīstības fāze ir līdzīga visām nevienmērīgas plūsmas intensitātēm, pirms tiek sasniegta līdzsvara fāze, kur izskalojuma dziļums svārstās ap vidējo vērtību d_s . Izskalojuma dziļuma svārstības notiek dēļ gultnes formām, kas plūst cauri izskalojuma bedrei, gar cilindrisko balstu. Palielinoties plūsmas intensitātei, līdzsvara izskalojuma laiks tiek sasniegts ātrāk, bet izskalojuma dziļums samazinās.

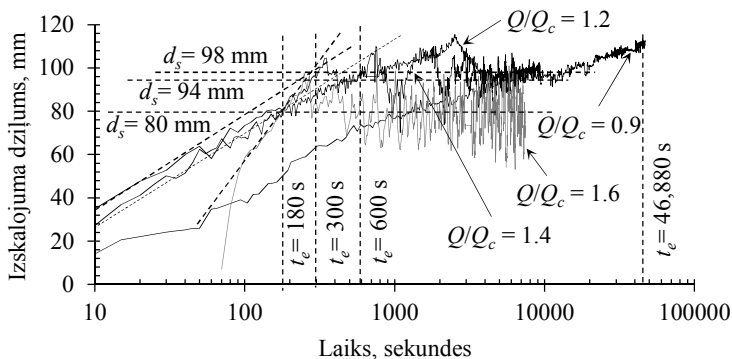
Pie plūsmas intensitātes $Q/Q_c = 1.2$, netika novērotas gultnes formas, sanešu kustība notika daļiņām veļoties, ripojot un slīdot gar gultni.

Tiklīdz plūsmas intensitāte tika palielināta līdz $Q/Q_c = 1.4$, sākotnēji sāka veidoties nelielas gultnes formas, kas pamazām auga lielākās, līdz tika sasniegts stabils gultnes formu attīstības līmenis.

Kad plūsmas intensitāte tika palielināta līdz $Q/Q_c = 1.6$, mainījās gultnes formu augstums un garums, tās kļuva augstākas, bet īsākas, samazinājās arī to periods, tā kā mazākās gultnes formas saplūda un veidojās lielākas gultnes formas.

Lai gan eksperimenta ar plūsmas intensitāti $Q/Q_c = 0.9$ ilgums bija 13 stundas, ar to nepietika lai sasniegtu līdzsvara fāzi. Augstāku plūsmas intensitāšu eksperimentu ilgumi bija stipri mazāki, tā kā pie augstākām plūsmas intensitātēm bija grūtāk uzturēt nepieciešamos plūsmas un sanešu kustības apstākļus kanālā, tomēr tajos tika sasniegtas līdzsvara fāzes.

Visiem nevienmērīgas plūsmas eksperimentiem līdzsvara izskalojuma laiks t_e tika noteikts grafiski, sekojot šiem soļiem: (1) līdzsvara izskalojuma dziļumu nosaka iezīmējot horizontālu līniju, kas atbilst vidējai izskalojuma dziļuma vērtībai attiecīgajā līdzsvara fāzē; (2) tiek iezīmēta slīpa līnija, kas atbilst izskalojuma attīstības fāzei un (3) to krustpunkts ir tiek definēts kā līdzsvara izskalojuma laiks, ko attēlo ar vertikālu līniju (Attēls 3). Tā kā $Q/Q_c = 0.9$ eksperimentā netika sasniegts līdzsvara stāvoklis, tad Attēlā 3 ir norādīts šī eksperimenta beigu laiks.



Attēls 3. Logaritmiski attēloti izskalojuma dziļumi pie cilindriska balsta

Līdzsvara izskalojuma laiks pie ūdens ņemšanas būvēm

Nemainoties pienākošās plūsmas ātrumam V un Fruda skaitlim, bet palielinoties plūsmas saspīestībai Q/Q_b , palielinās relatīvais izskalojuma dziļums h_s/h_f , tā kā pieaug arī izskalojuma dziļums h_s . Parametrs D_i , kas atkarīgs no vietējā plūsmas ātruma V_i ,

vidējā smilšu daļiņu izmēra d_{50} un relatīvā izskalojuma dziļuma h_s/h_f , ievērojami samazinās, pieaugot plūsmas saspīestības pakāpei, bet nemainoties pienākošās plūsmas Fruda skaitlim. Parametri X_i un N_i/N_0 , kas atkarīgi no relatīvā izskalojuma dziļuma h_s/h_f , palielinās, pieaugot izskalojuma dziļumam h_s pie nemainīga pienākošās plūsmas Fruda skaitļa, pieaugot plūsmas saspīestībai Q/Q_b . Plūsmas saspīestības koeficients k samazinās, pieaugot plūsmas saspīestībai Q/Q_b pie nemainīga pienākošās plūsmas Fruda skaitļa. Relatīvais plūsmas ātrums $V/\beta V_0$ palielinās, tā kā palielinoties plūsmas saspīestībai Q/Q_b pieaug arī vietējais plūsmas ātrums V_i . Līdzsvara izskalojuma laiks t_e pieaug, ja pie nemainīgas pienākošās plūsmas Fruda skaitļa palielinās plūsmas saspīestība Q/Q_b , tā kā pieaug arī izskalojuma dziļums h_s .

Visu iepriekš minēto parametru izmaiņu tendences, kad nemainās pienākošās plūsmas Fruda skaitlis, bet pieaug plūsmas saspīestība Q/Q_b , ir novērojamas arī tad, kad pieaug pienākošās plūsmas Fruda skaitlis, bet plūsmas saspīestība Q/Q_b nemainās.

Dator-modelēto un aprēķināto laika vērtību salīdzinājums

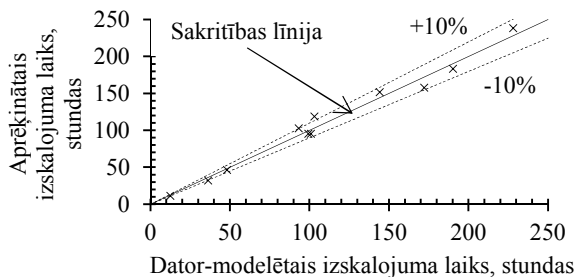
Lai pārbaudītu izstrādāto līdzsvara izskalojuma laika noteikšanas metodi, aprēķinātās izskalojuma laika vērtības tika salīdzinātas ar dator-modelētajām izskalojuma laika vērtībām.

Visiem eksperimentiem tika aprēķināta relatīvā kļūda ε :

$$\varepsilon(\%) = \frac{(t_{form} - t_{comp})}{t_{comp}} \cdot 100, \quad (10)$$

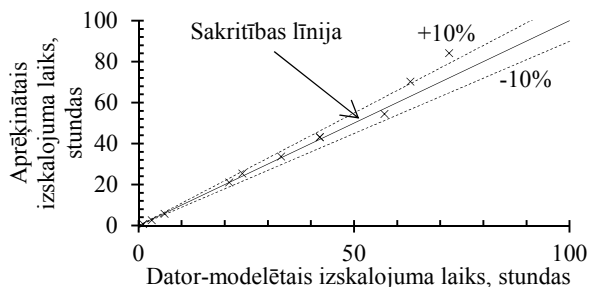
kur t_{form} – izskalojuma laika vērtība aprēķināta ar izstrādāto metodi, stundas;
 t_{comp} – dator-modelēšanā iegūtā izskalojuma laika vērtība, stundas.

Izstrādātās līdzsvara izskalojuma laika noteikšanas metodes rezultāti veido labu sakritību ar dator-modelēšanas rezultātiem pie ūdens ņemšanas būvēm ar plūsmas atdalīšanos pie būves un smilšu graudu izmēru $d_1 = 0.24$ mm, kur vidējā relatīvā kļūda 12 eksperimentiem ir 7.0 % (Attēls 4).



Attēls 4. Aprēķināto un dator-modelēto izskalojuma laika vērtību salīdzinājums pie ūdens ņemšanas būvēm ar plūsmas atdalīšanos pie būves ($d_1 = 0.24$ mm)

Arī pie ūdens ņemšanas būvēm ar plūsmas atdalīšanos pie būves un smilšu graudu izmēru $d_2 = 0.67$ mm aprēķinātie un dator-modelētie izskalojuma laika rezultāti veido labu sakritību, kur 12 eksperimentu vidējā relatīvā kļūda ir 7.4 % (Attēls 5).



Attēls 5. Aprēķināto un dator-modelēto izskalojuma laika vērtību salīdzinājums pie ūdens ņemšanas būvēm ar plūsmas atdalīšanos pie būves ($d_2 = 0.67$ mm)

Tāpat tika aprēķinātas un salīdzinātas relatīvās kļūdas ūdens ņemšanas būvju eksperimentiem bez plūsmas atdalīšanās pie būves, diviem smilšu graudu izmēriem $d_1 = 0.24$ mm un $d_2 = 0.67$ mm, kur vidējās relatīvās kļūdas 12 eksperimentiem ir 6.5 % un 10.4 %, attiecīgi.

Dažādu autoru aprēķinu metožu izskalojuma laika vērtību salīdzinājums

Izmantojot dažādu autoru izskalojuma laika aprēķinu metodes un datus no ūdens ņemšanas būvju eksperimentiem ar plūsmas atdalīšanos pie būves, tika noteiktas izskalojuma laika vērtības.

Kopumā izskalojuma laika aprēķinu rezultāti pēc dažādu autoru metodēm, izmantojot datus no ūdens ņemšanas būvju eksperimentiem ar plūsmas atdalīšanos pie būves parādīja, ka vairumā gadījumu rezultāti ir objektīvi, ja pienākošās plūsmas ātrums ir tuvu kritiskajam ātrumam. Tāpat rezultāti atklāja, ka nevienā no aprēķinu metodēm netiek ņemta vērā plūsmas saspīestības pakāpe un vietējais plūsmas ātrums, kas būtiski atšķiras no pienākošās plūsmas ātruma un var pārsniegt kritisko plūsmas ātrumu pie būves palienē, kamēr pienākošās plūsmas ātrums ir zems.

Izstrādātās metodes teorētiskā analīze

Lai veiktu izstrādātās līdzsvara izskalojuma laika noteikšanas metodes teorētisko analīzi, izskalojuma laika sakarība tika izteikta ar pamat parametriem, kas veido izskalojuma laiku kā funkciju no parametriem, no kuriem izskalojuma laiks ir atkarīgs. Rezultātā izskalojuma laiks ir funkcija, kas atkarīga no sekojošajiem parametriem:

$$t_{equil} = f\left(\frac{Q}{Q_b}; P_k; P_{kb}; \frac{Fr}{i}; \frac{d}{h_f}; \frac{\beta V_0}{V_l}; \frac{h}{h_f}; \frac{h_{equil}}{h_f}\right), \quad (11)$$

kur Q/Q_b – plūsmas saspīestības pakāpe;
 P_k – brīvas plūsmas kinētiskais parametrs saspīestajā daļā;
 P_{kb} – nesaspīestas plūsmas kinētiskais parametrs;
 Fr/i – Fruda skaitļa attiecība pret grunts slīpumu;
 d/h_f – relatīvais grunts daļiņu izmērs;
 $\beta V_0/V_l$ – kritiskā plūsmas ātruma attiecība pret vietējo plūsmas ātrumu;
 h/h_f – relatīvais plūsmas dziļums.

Tika veikta izstrādātās līdzsvara izskalojuma laika aprēķinu metodes teorētiskā analīze atkarībā no hidrauliskiem un grunts parametriem, un tā parādīja, ka līdzsvara izskalojuma laiks ir atkarīgs no: plūsmas saspīestības; brīvas plūsmas kinētiskā

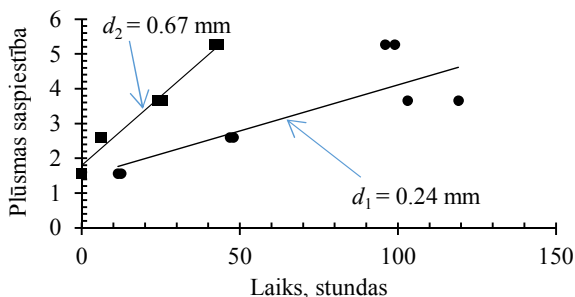
parametra saspīestajā daļā; nesaspīestas plūsmas kinētiskā parametra; Fruda skaitļa attiecības pret grunts slīpumu; relatīvā grunts daļiņu izmēra; kritiskā plūsmas ātruma attiecības pret vietējo plūsmas ātrumu; un relatīvā plūsmas dziļuma.

Izstrādātās metodes grafiskā analīze

Ūdens ņemšanas būvju eksperimentu dati (Gjunsburgs un Neilands, 2001) un izstrādātās metodes aprēķinu rezultāti tika izmantoti, lai grafiski attēlotu hidroaulisko un gultnes parametru ietekmi uz izskalojuma laiku.

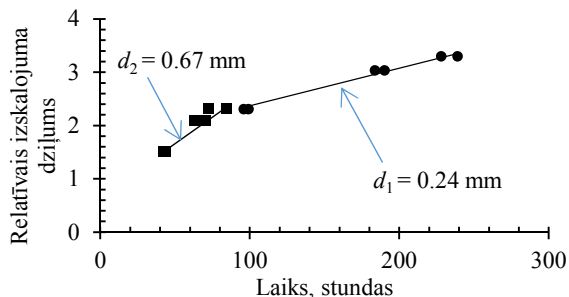
Grafikos attēlotie punkti atbilst aprēķinātajiem un dator-modelētajiem līdzsvara izskalojuma laika punktiem.

Palielinoties plūsmas saspīestībai, pieaug arī līdzsvara izskalojuma laiks, tādējādi jo lielāka plūsmas saspīestības pakāpe, jo lielāks kļūst līdzsvara izskalojuma laiks. Tā kā smalkākas daļiņas ir vieglāk aizskaloj, tad smalkākai smiltij līdzsvara izskalojuma laiks ir lielāks nekā rupjākai smiltij (Attēls 6).



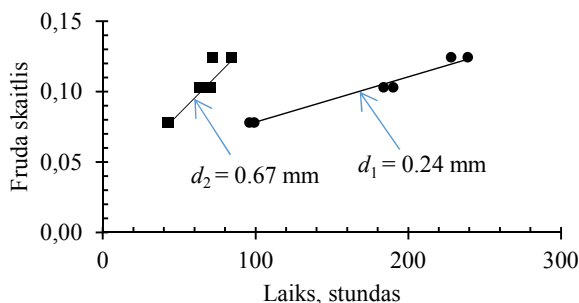
Attēls 6. Plūsmas saspīestības ietekme uz izskalojuma laiku (Testi AL1, AL4, AL7 un AL10 ar diviem smilšu izmēriem $d_1 = 0.24 \text{ mm}$ un $d_2 = 0.67 \text{ mm}$)

Kad izskalojuma process turpinās, palielinās arī relatīvais izskalojuma dziļums, savukārt palielinoties relatīvajam izskalojuma dziļumam, pieaug arī līdzsvara izskalojuma laiks. Rupjākai smiltij relatīvais izskalojuma dziļums ir mazāks, līdz ar to arī līdzsvara izskalojuma laiks ir mazāks, turpretim smalkākai smiltij relatīvais izskalojuma dziļums ir lielāks, kas ietekmē arī izskalojuma laiku (Attēls 7).



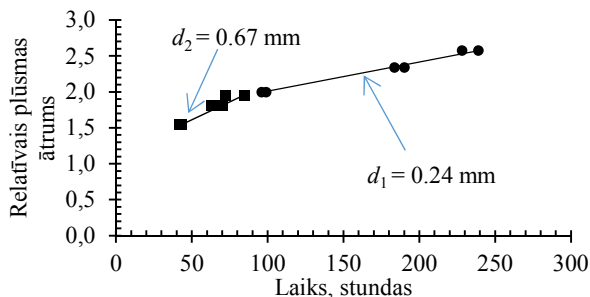
Attēls 7. Relatīvā izskalojuma dziļuma ietekme uz izskalojuma laiku (Testi AL1, AL2 un AL3 ar diviem smilšu izmēriem $d_1 = 0.24$ mm un $d_2 = 0.67$ mm)

Fruda skaitlis raksturo pienākošās plūsmas ātrumu, līdz ar to, pieaugot Fruda skaitlim, pieaug arī līdzsvara izskalojuma laiks; jo lielāks kļūst Fruda skaitlis, jo vairāk pieaug līdzsvara izskalojuma laiks, tā kā izskalojuma process turpina pieaugt. Smalkai smiltij izskalojuma process turpinās ilgāk, līdz ar to līdzsvara izskalojuma laiks ir lielāks nekā rupjākai smiltij (Attēls 8).



Attēls 8. Fruda skaitļa ietekme uz izskalojuma laiku (Testi AL1, AL2 un AL3 ar diviem smilšu izmēriem $d_1 = 0.24$ mm un $d_2 = 0.67$ mm)

Kad vietējais plūsmas ātrums V_l pie ūdens ņemšanas būves pārsniedz grunts kritisko plūsmas ātrumu, sākas izskalojuma process. Tā kā rupjākas daļiņas ir smagākas, ir vajadzīga lielāka enerģija, lai tās aizskaloju, līdz ar to ir vajadzīgs lielāks vietējais plūsmas ātrums nekā smalkākai gruntij, kam ir zemāka kritiskā plūsmas ātruma robeža. Tādējādi pieaugot vietējam plūsmas ātrumam un samazinoties kritiskajam plūsmas ātrumam smalkākām grunts daļiņām, palielinās līdzsvara izskalojuma laiks (Attēls 9).



Attēls 9. Relatīvā plūsmas ātruma ietekme uz izskalojuma laiku (Testi AL1, AL2 un AL3 ar diviem smilšu izmēriem $d_1 = 0.24$ mm un $d_2 = 0.67$ mm)

Tika veikta līdzsvara izskalojuma laika aprēķinu metodes rezultātu grafiskā analīze atkarībā no hidrauliskiem un grunts parametriem, un tā parādīja, ka līdzsvara izskalojuma laiks ir atkarīgs no: plūsmas spāstības; relatīvā plūsmas dziļuma; Fruda skaitļa; un relatīvā plūsmas ātruma.

VIETĒJO IZSKALOJUMU NOTEIKŠANA LATVIJAS LIKUMDOŠANĀ

Latvijā pieejamā likumdošana saistībā ar vietējiem izskalojumiem pie ģeotehniskām būvēm ir ļoti vispārēja un nekonkrēta. Norādījumi un ieteikumi, kas atrodami Latvijas Būvnormatīvos (LBN) un Eirokodeksos ir vairāk informatīvi neskaidri attiecībā uz pasākumiem, kas jāievēro vietējo izskalojumu gadījumā, to novērtēšanu un aprēķināšanu. Likums nosaka, ka Eirokodeksu izmantošana ir obligāta visās ES valstīs no 2011. gada. Tā kā Latvija ir ES dalībvalsts no 2004. gada, tai ir jāizmanto Eirokodeksos noteiktās normas.

Latvijas ģeotehnisko būvju inženieru pieredze rāda, ka attiecībā uz vietējiem izskalojumiem, Latvijā nav pieejami saprotami un augstas kvalitātes materiāli par vietējiem izskalojumiem, kas rakstīti valsts valodā. Tā kā vietējos izskalojumus kā parādību ignorēt nedrīkst, ir nepieciešams tos ņemt vērā jau ģeotehnisko būvju projektu stadijā, tāpēc ir nepieciešams, lai Latvijā tiktu izstrādāts saprotams un paskaidrojošs materiāls par vietējiem izskalojumiem un to noteikšanu, ko varētu izmantot ģeotehnisko būvju inženieri.

SLĒDZIENS

1. Literatūrā piedāvātie robežnosacījumi līdzsvara izskalojuma laika aprēķināšanai ir atkarīgi no fiziskiem plūsmas vai būves parametriem, bet ne no hidrauliskiem plūsmas parametriem.
2. Visbiežāk izskalojuma laika aprēķinu metodēs izmantotie parametri ir: pienākošās plūsmas dziļums un ātrums, balsta garums vai diametrs, smilšu daļiņu vidējais izmērs un blīvums.
3. Literatūrā nav atrodamā līdzsvara izskalojuma laika noteikšanas metode, kurā tiktu ņemti vērā sekojošie parametri: plūsmas saspiesība, vietējais plūsmas ātrums pie būves, plūdu ilgums, plūdu secība, plūdu varbūtība, plūdu biežums, kā arī grunts slāņainība.
4. Izmantojot sanešu kustības diferenciālo vienādojumu tika izstrādāta jauna līdzsvara izskalojuma laika noteikšanas metode pie ūdens ņemšanas būvēm upju palienās.
5. Kritiskās plūsmas un vietējā plūsmas ātruma pie ūdens ņemšanas būves attiecība tika ierosināts kā jaunais hidrauliskais robežnosacījums, kas vienāds ar $\beta V_{0l}/V_{lt} = 0.985$.
6. Izmantojot jauno robežnosacījumu var aprēķināt h_{equil} , A_{equil} , D_{equil} , x_{equil} , N_{equil} vērtības, no kurām var aprēķināt līdzsvara izskalojuma laiku t_{equil} . Tika izstrādāts elektronisks līdzsvara izskalojuma laika aprēķinu modelis datora vidē.
7. Izmantojot plūsmas vājināšanu pie krasta balstiem, samazinās līdzsvara izskalojuma dziļums un laiks.
8. Palielinoties plūsmas intensitātei nevienmērīgas plūsmas apstākļos pie cilindriskā balsta, samazinās līdzsvara izskalojuma dziļums un laiks.
9. Dator-modelēšanas un aprēķinu rezultāti parādīja, ka palielinoties pienākošās plūsmas Fruda skaitlim un plūsmas saspiesībai, līdzsvara izskalojuma laiks palielinās.
10. Dator-modelētās un aprēķinātās līdzsvara izskalojuma laika vērtības veido labu sakritību, vidējās relatīvās kļūdas ietilpst 10 % robežās.
11. Izmantojot dažādu autoru metodes, izskalojuma laika aprēķinu rezultāti parādīja, ka rezultāti ir objektīvi, ja pienākošās plūsmas ātrums ir tuvu kritiskajam.

12. Pēc izstrādātās aprēķinu metodes teorētiskās analīzes, līdzsvara izskalojuma laiks ir atkarīgs no: plūsmas saspīestības; brīvas plūsmas kinētiskā parametra saspīestajā daļā; nespīestas plūsmas kinētiskā parametra; Fruda skaitļa attiecības pret grunts slīpumu; relatīvā grunts daļiņu izmēra; kritiskā plūsmas ātruma attiecības pret vietējo plūsmas ātrumu; un relatīvā plūsmas dziļuma.
13. Pēc izstrādātās aprēķinu metodes rezultātu grafiskās analīzes, līdzsvara izskalojuma laiks ir atkarīgs no: plūsmas saspīestības; relatīvā plūsmas dziļuma; Fruda skaitļa; un relatīvā plūsmas ātruma.
14. Latvijā pieejamās likumdošanas analīze saistībā ar vietējiem izskalojumiem pie ģeotehniskām būvēm parādīja, ka tā ir ļoti vispārēja un nekonkrēta. Ir nepieciešams izstrādāt materiālu par vietējiem izskalojumiem, ko varētu izmantot ģeotehnisko būvju inženieri Latvijā.

GENERAL DESCRIPTION

Topicality

The European Environment Agency (EEA) identifies river flooding together with wind related storms as the most important natural hazards in the EU in terms of economic loss. The spatial distribution of high and very high flood hazard risk did not change significantly from 2002 to 2012. However, flood occurrence is projected to increase even further with climate change. The main reason for high flood occurrence is the general increase in winter precipitation, apparent in almost all regions of Europe except in the Mediterranean.

Despite the significant investment of researchers in local scour investigation, hydraulic structures in rivers still fail due to scouring processes. It is believed that this is partially a consequence of scouring processes simplification, application of empirical methods, inadequacies between laboratory conditions and the reality in nature, and also the present state of knowledge about some aspects of hydraulic and scouring complexity.

Equilibrium time of scour values are used worldwide in equilibrium scour depth calculation methods, where it is essential to use the most precise predictors of time. A reliable time of scour prediction method can give an advantage to engineers, to know when the equilibrium depth of scour has been achieved, to understand the stability of a water engineering structure.

This work is a continuation of previous studies in the field of fluvial hydraulics developed by researchers of the Institute of Heat, Gas and Water technology of Riga Technical University: B. Gjunsburgs, R.R. Neilands, R. Neilands and G. Jaudzems. Further studies on riverbed layering impact on scour development in time are in process and studied by E. Govsha.

Research objective and tasks

The objective of this research is to develop a new equilibrium time of scour evaluation method for water intakes with and without flow separation at the structure on river floodplains at steady-flow and clear-water scour conditions, by combining

into methodology the following scour-control parameters: flow contraction, local flow velocity, bed stratification, flood duration, flood sequence, flood probability, flood frequency, relative depth of scour, densimetric Froude number and median size of the sand. To achieve the research objective, the following tasks are defined:

1. Analyze literature for time of scour calculation methods at piers and abutments to find out what kind of threshold criteria and which parameters are being used in equilibrium time of scour calculations;
2. Work out a calculation method for equilibrium time of scour at steady-flow conditions for water intakes with and without flow separation at the structure;
3. Propose a new hydraulic threshold condition for equilibrium time of scour calculation, considering hydraulic parameters of the flow;
4. Develop a simple approach sequence how to calculate equilibrium time of scour in practice; create an electronic equilibrium time of scour calculation model in computer environment;
5. Research how flow-altering method affects equilibrium time of scour and depth of scour at abutments;
6. Carry out live-bed pier scour experiments to investigate how live-bed conditions and bedforms affect equilibrium time of scour and depth of scour at a pier;
7. Using computer modeling prolong the duration of water intake experiments until the equilibrium stage; collect computer modelled and calculated equilibrium time of scour data; analyze equilibrium time of scour by approach flow Froude number and contraction rate of the flow;
8. Compare calculated equilibrium time of scour values with computer modeled time of scour values, calculate the percent relative error, and draw a line of agreement to verify the developed equilibrium time of scour evaluation method;
9. Compute time to equilibrium scour values using different author calculation methods found in the literature with data from water intake tests; compare and analyze the results;
10. Theoretically analyze hydraulic and riverbed parameter impact in the proposed equilibrium time of scour calculation method for water intakes;

11. Graphically analyze hydraulic and riverbed parameter influence on equilibrium time of scour;
12. Explore local scour evaluation methods in Latvian legislation.

Scientific novelty and application

A new equilibrium time of scour evaluation method for water intakes at steady-flow and clear-water conditions was worked out. Suggested method can be applied to river water intakes with and without flow separation at the structure at steady-flow and clear-water conditions, as well as, other water engineering and hydraulic structures like bridge abutments, piers, guide banks, dams and roads located on river floodplain area. Ratio of the recalculated critical flow velocity to the local one at the head of the water intake was proposed as the hydraulic threshold criterion in equilibrium time of scour calculation. A new theory has been proposed, which confirms that the interaction of changes in local and critical flow velocities is significant in scour formation and that the local flow velocity rather than the approach flow velocity has an influence on the local scour evolution at hydraulic structures. Flow contraction rate and local flow velocity influence on equilibrium time of scour was confirmed.

The proposed method provides information on time, when certain local scour depth will be achieved, thus making it possible to evaluate the stability of a structure during changes in scour depth. This method also allows to model time of scour with increasing flow intensity and depth.

The proposed method can be used as an equilibrium time of scour estimation tool, as well as in combination with other scour depth evaluation methods.

Scope of the doctoral thesis

Promotional work consists of: introduction, 5 chapters, conclusion, 3 appendixes, 91 references, 25 figures, 17 tables, and together 90 pages.

Chapter 1 provides the background information and literature review on time of scour calculation methods under steady flow conditions.

In Chapter 2 “Method for equilibrium time of scour evaluation Atwater intakes”, the new method for computing equilibrium time of scour at water intakes is presented.

Chapter 3 “Experimental set-up” includes previously performed flow-altering at abutments experiment description, recently carried out live-bed pier scour experiment description, as well as previously published water intake experiment data.

Chapter 4 “Results” presents flow-altering method against scour at abutments experiment results, where flow-altering effects on equilibrium time of scour and depth of scour are described; live-bed pier scour experiment results, where live-bed conditions effect on equilibrium time of scour and depth of scour at a pier is described; comparison of previously published water intake experiment data with calculations based on the method described in Chapter 2. Influence of Froude number and flow contraction on time of scour is studied by processing experimental data. Calculated relative errors and lines of agreement are shown. Calculation results using different author calculation methods are analyzed and compared with the proposed method. A theoretical and graphical analysis of the proposed method is shown, describing hydraulic and riverbed parameter influence on equilibrium time of scour.

Chapter 5 “Local scour recognition in Latvian legislation” contains information about legislation available in Latvia to be followed when designing water engineering structures.

BACKGROUND AND LITERATURE REVIEW

Estimation of scour depth at hydraulic structures is a problem that has troubled engineers for many years. In recent years, an extensive research has been aimed at finding methods to efficiently calculate the expected equilibrium scour depth levels at hydraulic structures.

Equilibrium time of scour at water intakes has not been studied yet.

Since the scouring process at hydraulic structures is never ending, threshold criteria are used for equilibrium time of scour evaluation. Threshold criteria, proposed and known from the literature are, when in a 24 hours’ period: (a) the depth of scour increases less than 5% of the pier diameter (Melville & Chiew, 1999); or (b) less than 5% of the flow depth or abutments length (Coleman et al., 2003); or (c) less than 5%

of the 1/3 of the pier diameter (Grimaldi et al., 2006). The proposed threshold criteria for equilibrium time of scour known from the literature are only depending on the size of the hydraulic structure, and not on hydraulic parameters of the flow. Time to equilibrium, t_e is defined as the time corresponding to the end of the principal phase, and the onset of the equilibrium phase.

Most of the equilibrium time of scour estimation methods available in the literature are derived from empirical approaches and dimensional analyses. Typically, the equations for equilibrium time of scour calculations were developed using regression analyses from data acquired from local scour experiments, usually conducted in flumes with idealized conditions.

Although many studies on local scour around bridge piers and abutments have been found in the literature, investigations dealing with time of scour at piers and abutments under steady flow conditions are still limited.

Most of the equilibrium time of scour evaluation methods are restricted to certain flow, soil and structures conditions, which makes them unusable outside the defined boundary conditions. The most common boundary condition is the ratio of the approach flow velocity to the critical flow velocity, nevertheless the ratio of approach flow depth to abutments length and the ratio of abutments length to median size of the sand are also being used as boundary conditions in equilibrium time of scour evaluation methods.

Literature review revealed the following:

- 1) Approach flow depth, approach flow velocity, critical flow velocity, abutment length/pier diameter, sand grain size and sand density are considered as the basic parameters in equilibrium time of scour calculation;
- 2) According to literature analysis no method for equilibrium time of scour calculation at water intakes can be found, where the following parameters are being taken into consideration: contraction rate of the flow, local flow velocity near the structure, flood duration, flood sequence, flood probability, flood frequency, and bed stratification.

METHOD FOR EQUILIBRIUM TIME OF SCOUR EVALUATION AT WATER INTAKES

The differential equation of equilibrium for the bed sediment movement in clear-water conditions has the form:

$$(1 - p) \frac{dW}{dt} = Q_s, \quad (1)$$

where p – porosity of riverbed material;

W – volume of the scour hole at a water intake with flow separation at the structure, $(1 - p) \cdot W = 1/6 \pi m^2 h_s^3$ (at a water intake without flow separation at the structure $(1 - p) \cdot W = 1/5 \pi m^2 h_s^3$), m^3 (Gjunsburgs et al., 2006);

m – steepness of the scour hole;

h_s – scour depth, m;

t – time, s;

Q_s – sediment discharge out of the scour hole, m^3/s .

For water intakes with flow separation at the structure the left-hand part of Eq. (1) can be written as:

$$(1 - p) \frac{dW}{dt} = \frac{1}{2} \pi m^2 h_s^2 \frac{dh_s}{dt} = a h_s^2 \frac{dh_s}{dt}, \quad (2)$$

where $a = 1/2 \pi m^2$.

For water intakes without flow separation at the structure the left-hand part of Eq. (1) can be written as:

$$(1 - p) \frac{dW}{dt} = \frac{3}{5} \pi m^2 h_s^2 \frac{dh_s}{dt} = a h_s^2 \frac{dh_s}{dt}, \quad (3)$$

where $a = 3/5 \pi m^2$.

The sediment discharge was determined by the Levi (1969) formula:

$$Q_s = AB \cdot V_l^4, \quad (4)$$

where A – a parameter in the Levi (1969) formula;

$B = m h_s$ – describes the width of the scour hole, m;

V_l – local flow velocity at the water intake, m/s.

The parameter A depends on scour, local flow velocity, critical velocity and grain size of the bed material. It must be taken into account that the local flow velocity V_l and critical flow velocity V_0 are changing within the changes of scour depth in time.

The critical flow velocity V_0 at the water intake at plain bed can be determined by the Stutenitcnikov (1964) formula:

$$V_0 = 1.15\sqrt{g} \cdot d_i^{0.25} \cdot h_f^{0.25}, \quad (5)$$

where g – acceleration due to gravity, m/s^2 ;
 d_i – grain size of the bed material, m ;
 h_f – water depth in the floodplain, m .

From Eq. (5) calculating the square root of g and multiplying it by 1.15 we get $3.6 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$, afterwards this is inserted into Eq. (5) and $V_0 = 3.6d_i^{0.25}h_f^{0.25}$. The critical flow velocity V_{0t} at the water intake for any depth of scour h_s and for the flow bended by the structure is:

$$V_{0t} = \beta \cdot 3.6 \cdot d_i^{0.25} \cdot h_f^{0.25} \left(1 + \frac{h_s}{2h_f}\right)^{0.25}, \quad (6)$$

where β reduction coefficient of the critical flow velocity (after Rozovskyi, 1956);
 $h_m = h^{0.25}(1 + h_s/2h_f)^{0.25}$ – mean depth of the scour hole, m .

Expressing Eq. (1) by Eqs. (2–3), by substituting variables and integration time of scour value can be found:

$$t_i = 4D_i h_f^2 (N_i - N_0), \quad (7)$$

where D_i – constant parameter in short time interval;

$$N_i = 1/6 \cdot x_i^6 - 1/5 \cdot x_i^5;$$

$N_0 = 1/6 \cdot x_0^6 - 1/5 \cdot x_0^5 = -0.033$ – parameter to calculate scour formed during the previous time step;

$$x_i = 1 + h_s/2h_f \text{ – relative depth of scour.}$$

Using Eq. (7) and inserting equilibrium values for all the parameters it is possible to find equilibrium time of scour:

$$t_{equil} = 4D_{equil} \cdot h_f^2 (N_{equil} - N_0), \quad (8)$$

where D_{equil} – equilibrium value for parameter D_i ;

$$N_{equil} = 1/6 \cdot x_{equil}^6 - 1/5 \cdot x_{equil}^5;$$

$$x_{equil} = 1 + h_{equil}/2h_f;$$

h_{equil} – equilibrium scour depth, m .

A full description of the calculation method can be found in Chapter 2 of the thesis.

Using value h_{equil} it is possible to find values A_{equil} , D_{equil} , N_{equil} and finally t_{equil} .

When the local flow velocity V_{lt} becomes equal to the recalculated critical flow velocity βV_{0t} , then $A_{equil} = 0$, $D_{equil} = \infty$ and $t_{equil} = \infty$. Criteria to evaluate the threshold are needed to appoint to calculate equilibrium time of scour near water intakes.

Threshold condition

A new threshold criterion is needed to be proposed, depending on hydraulic parameters of the flow in order to calculate the equilibrium time of scour values for water intake structures. Ratio of the recalculated critical flow velocity to the local flow velocity at the head of the water intake is proposed as the hydraulic threshold criterion in equilibrium time of scour calculations for water intakes.

According to the computer-modeling results the scour stops when the local flow velocity V_{lt} becomes equal to the recalculated critical flow velocity βV_{0t} and the equilibrium is equal to infinity. Different values of the threshold condition were presumed for equilibrium time of scour calculation in order to find the best fit between computer modeled and calculated equilibrium time of scour values. As a result, the proposed equilibrium time of scour calculation threshold criterion for water intakes that showed the best agreement is equal to:

$$\frac{\beta V_{0t}}{V_{lt}} = \frac{\beta V_0}{V_l} \left(1 + \frac{h_{equil.}}{2h_f} \right)^{1.25} = 0.985 . \quad (9)$$

Equilibrium time of scour calculation in practice

After acquiring the threshold criterion from Eq. (9), it is possible to calculate t_{equil} and the sequence of that is the following:

- 1) Calculate equilibrium depth of scour h_{equil} ,
- 2) Calculate parameter from the Levi (1969) formula A_{equil} using the calculated value of h_{equil} from previous step;
- 3) Calculate parameter D_{equil} using the calculated A_{equil} value from previous step;
- 4) Calculate the relative depth of scour x_{equil} using the calculated value of h_{equil} from first step;

- 5) Calculate parameter N_{equil} using the calculated value of x_{equil} from previous step;
- 6) And finally calculate equilibrium time of scour t_{equil} using values h_{equil} , D_{equil} , and N_{equil} from steps 1, 3 and 5.

EXPERIMENT SET-UP

Flow-altering method against scour at abutments experiment set-up

The flow-altering method against scour at abutments experiments were run at the Hydraulic Engineering Laboratory of the Politecnico di Milano, Italy. A rectangular channel 5.8 m long with a cross section 0.40 m wide and 0.16 m deep and a sediment tank 0.40 m deep was used in the experiments. Experiments were conducted at clear-water conditions.

Live-bed pier scour experiment set-up

The live-bed (LB) pier scour experiments were run at the Hydraulic Engineering Laboratory of the Politecnico di Milano, Italy in a rectangular channel 5.8 m long with a cross section 0.40 m wide and 0.16 m deep and a sediment tank 0.40 m deep. Several modifications were made to the channel for its ability to run live-bed experiments. A sediment feeder was constructed at the beginning of the channel and a sediment catcher was installed in the outlet tank. Also the sediment tank was modified. The lid was equipped with a piezometer, a false floor with a fine screen and a platform for the cylinder were installed in the tank, and then the tank was filled with bags of sand and additional a filling material.

Live-bed pier scour experiments were run at three different flow intensities, which exceeded the critical flow 1.2, 1.4 and 1.6 times.

Water intake experiment set-up processing

Tests for water intakes were carried out at the Transport Research Institute (Russia) in a flume 3.5 m wide and 21 m long.

The openings of the water intake model were 50, 80, 120, and 200 cm (see Figure 3.5). Flow contraction rate Q/Q_b (where Q is the flow discharge, and Q_b is the discharge in the bridge opening under open-flow conditions) varied from 1.56 to 5.69

for the floodplain depth of 7 cm, and the Froude numbers varied from 0.078 to 0.124; the slope of the flume was 0.0012. Experiments were run under open-flow conditions and two sand sizes.

Water intake experiment data

Experiment data by Gjunsburgs & Neilands (2001) and method for estimation of scour development in time during floods by Gjunsburgs & Neilands (2006) were used for computer modelling of scour depth development in time.

Computer modelling principle

By using computer program “RoBo” (Gjunsburgs et al., 2006), the duration of water intake laboratory tests of 7 hours was prolonged until the scour depth development stopped and the equilibrium stage was reached.

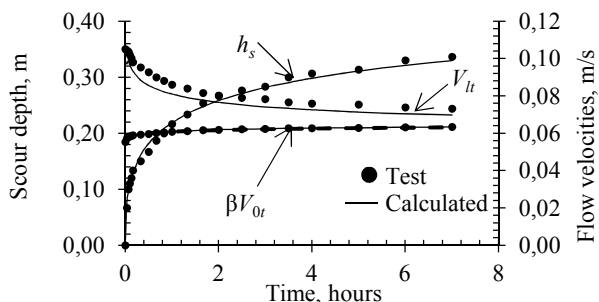


Figure 1. Change of local and critical flow velocities during scour development in time (Test AL4)

At the end of each time interval there is a change in local flow velocity and in critical flow velocity, because of the changes in scour hole in the previous time interval. With an increase of scour depth h_s , local flow velocity V_{lt} decreases, but critical flow velocity V_{0r} increases (Figure 1).

RESULTS

Flow-altering method against scour at abutments

Comparing the results from Test 1 (unprotected abutment) with Test 2 (threaded abutment) it is clear that the threads protect the wall and not the nose, nevertheless in the end the scour depth in Test 2 was less than in Test 1 (see Fig. 2).

It looks like the scour hole needed to reach a certain scour depth before the threads started to weaken the flow to protect the wall from scouring, whereas a noticeable difference between Test 1 and Test 2 appears after the scour depth at the wall had reached 100 mm. At the end of Test 2 with the threaded abutment the reduction of scour depth at the wall was considerably good in compare with the scour depth at the unprotected abutment. At the end of Test 2, after 16 hours, total scour depth reduction at the wall was 14 %, at the nose 5 % (Figure 2).

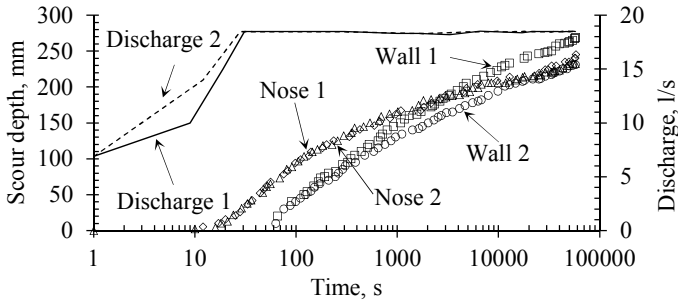


Figure 2. Comparison of scour depth evolution in time at the abutments

Live-bed pier scour

In total 4 different flow intensities were used for pier scour experiments $Q/Q_c = 0.9$, $Q/Q_c = 1.2$, $Q/Q_c = 1.4$, and $Q/Q_c = 1.6$ (where Q is flow discharge, and Q_c is critical discharge for sediment motion). Live-bed experiments are characterized by a similar behavior in the development phase before they reach the equilibrium stage, where the scour depth oscillates around mean scour depth value d_s . The oscillations occur because of the bedforms passing by the scour hole and the pier.

As the ratio of U/U_c increases, the equilibrium time is reached faster with decreasing scour depth value d_s .

For the LB experiments with $Q/Q_c = 1.2$, no actual bedforms were evident at this stage, the sediments were moving along the bed.

As soon as the flow discharge was increased to $Q/Q_c = 1.4$, the sediment bed started to evolve and change from smaller bedforms (ripples) to bigger ones (dunes) until stable conditions were reached.

When the discharge was increased to $Q/Q_c = 1.6$, dune height and length started to change, namely dunes got higher, shorter and also dune period decreased as the smaller bedforms started to merge with each other and create bigger ones.

Although the total duration of experiment $Q/Q_c = 0.9$ was 13 hours, it still was not enough to reach the equilibrium stage. Higher flow intensity experiments were much shorter, since it was more difficult to maintain the proper channel conditions for these tests, nevertheless equilibrium stage was reached in these tests.

For all live-bed pier scour tests P1 to P6 the equilibrium time t_e was easily and robustly estimated by the following steps: (1) the equilibrium scour depth is determined by drawing a mean horizontal line representing the mean scour depth in the equilibrium phase and (2) a line is drawn fitting the scour data in the rising phase, and its interception with the line representing equilibrium scour depth is defined as the equilibrium scour time (see Figure 3). Since in test $Q/Q_c = 0.9$ equilibrium stage was not achieved, time in Figure 3 corresponds to the total duration of the test.

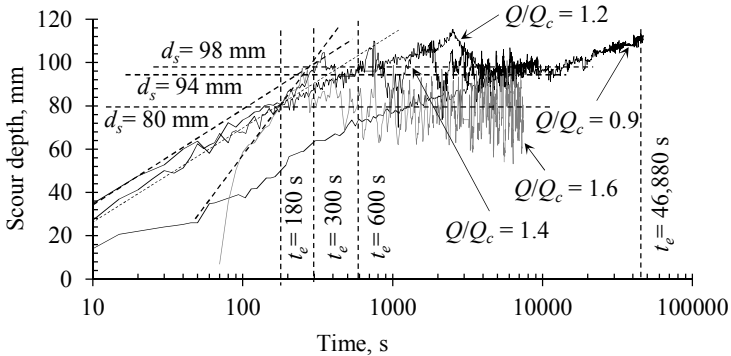


Figure 3. Temporal development of scour at pier

Equilibrium time of scour at water intakes

For the same approach flow velocity V and approach flow Froude number, but increasing contraction rate of the flow Q/Q_b , relative depth of scour h_s/h_f is increasing as the scour depth h_s is increasing as well. Parameter D_i , which depends from local flow velocity V_i , mean sand grain size d_{50} and relative depth of scour h_s/h_f is significantly decreasing with the increase of contraction rate of the flow Q/Q_b at the same approach flow Froude number. Parameters X_i and N_i-N_0 , which depend from relative depth of scour h_s/h_f are increasing as the scour depth h_s increases as well with the same approach flow Froude number and increasing contraction rate of the flow Q/Q_b . Flow contraction coefficient k decreases as the contraction rate of the flow Q/Q_b increases for the same approach flow Froude number. Relative velocity of the flow $V_i/\beta V_0$ is increasing as the local flow velocity V_i is increasing with increasing contraction rate of the flow Q/Q_b and the same approach flow Froude number. Equilibrium time of scour t_e is increasing as the scour depth h_s keeps increasing as well for the same approach flow Froude number and increasing flow contraction Q/Q_b . All of the before mentioned parameter trends when the approach flow Froude number is not changing, but the contraction rate of the flow Q/Q_b is increasing are observed also when the approach flow Froude number is increasing at the same flow contraction rate Q/Q_b .

Comparison of calculated and computer modeled equilibrium times of scour

To verify the suggested equilibrium time of scour evaluation methods, calculated time of scour values were compared to computer modeled equilibrium time of scour values. A percent relative error ε was calculated for each of the tests:

$$\varepsilon(\%) = \frac{(t_{form} - t_{comp})}{t_{comp}} \cdot 100, \quad (10)$$

where t_{form} – equilibrium time of scour calculated by the developed method, days;
 t_{comp} – computer modeled equilibrium time of scour, days.

Calculated values of equilibrium time of scour show a good agreement with the computer modeled equilibrium time of scour values for tests at water intakes with flow separation at the structure, with sand grain size $d_1 = 0.24$ mm, where the average percent relative error for 12 experiments is 7.0 % (Figure 4).

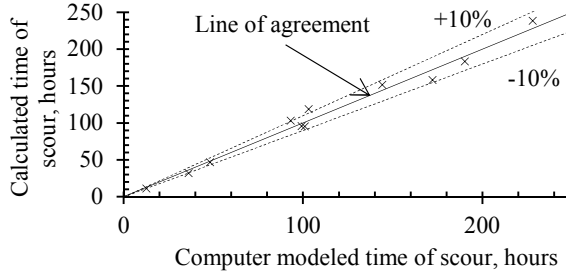


Figure 4. Comparison of calculated and computer modeled equilibrium times of scour at water intakes with flow separation at the structure ($d_1 = 0.24$ mm)

For tests at water intakes with flow separation at the structure, and with sand grain size $d_2 = 0.67$ mm the calculated values of equilibrium time of scour also show a good agreement with the computer modeled equilibrium time of scour values, where the average percent relative error for 12 experiments is 7.4 % (Figure 5).

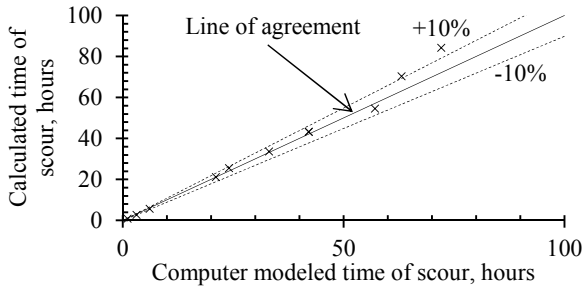


Figure 5. Comparison of calculated and computer modeled equilibrium times of scour at water intakes with flow separation at the structure ($d_2 = 0.67$ mm)

Relative errors of water intake experiments without flow separation at the structure were also estimated, for both sand grain sizes $d_1 = 0.24$ mm and $d_2 = 0.67$ mm, where the average percent relative errors for 12 experiments were 6.5 % and 10.4 %, respectively.

Comparison of time of scour values computed by different author formulas

Calculations of equilibrium time of scour, t_e were made by different author formulas and data from experiments at water intakes with flow separation at the structure.

In general, equilibrium time of scour estimation results from different author formulas, using the data from water intake tests with flow separation revealed, that mostly the estimations are reliable, when the approach flow velocity is close to the critical flow velocity; it also revealed that none of these methods take into consideration the changes in flow contraction and the local flow velocity, which is not the same as the mean approach flow velocity and it can exceed the critical flow velocity at the structure in the floodplain, even if the mean approach flow velocity in the main channel is well below the critical flow velocity.

Developed method theoretical analysis

To analyze the equilibrium time of scour estimation method for water intakes, time of scour equation is transformed to a form that shows clearly that it contains dimensionless parameters and characteristics of the flow and riverbed. As a result, equilibrium time of scour is a function of the following parameters:

$$t_{equil} = f\left(\frac{Q}{Q_b}; P_k; P_{kb}; \frac{Fr}{i}; \frac{d}{h_f}; \frac{\beta V_0}{V_l}; \frac{h}{h_f}; \frac{h_{equil}}{h_f}\right), \quad (11)$$

where Q/Q_b – flow contraction rate;

P_k – kinetic parameter of flow in contraction in open-flow conditions;

P_{kb} – kinetic parameter of the open flow in natural conditions;

Fr/i – ratio of the Froude number to the river slope;

d/h_f – dimensionless sand grain size;

$\beta V_0/V_l$ – relative velocity of the flow;

h/h_f – relative depth of the flow.

Theoretical analysis of the developed equilibrium time of scour calculation method was made and it showed that equilibrium time of scour depends on flow contraction rate, kinetic parameter of flow in contraction in open-flow conditions,

kinetic parameter of the open flow, ratio of the Froude number to the river slope, dimensionless sand grain size, ratio of the recalculated critical flow velocity to the local flow velocity, relative flow depth, and relative scour depth.

Developed method graphical analysis

Laboratory experiment data (Gjunsburgs & Neilands, 2001) and calculation results of the suggested equilibrium time of scour estimation method for water intakes with and without flow separation at the structure were used to show the impact of hydraulic and riverbed parameters on equilibrium time of scour.

The points in the graphs indicate the calculated and computer modeled equilibrium points, where equilibrium time and scour have been achieved.

When the flow contraction rate increases, equilibrium time of scour increases as well, consequently the greater the contraction rate of the flow value is, the greater the equilibrium time of scour value becomes. Since finer sand particles are more easily scoured away, it takes longer time to achieve equilibrium stage, than it is with coarser sand (Figure 6).

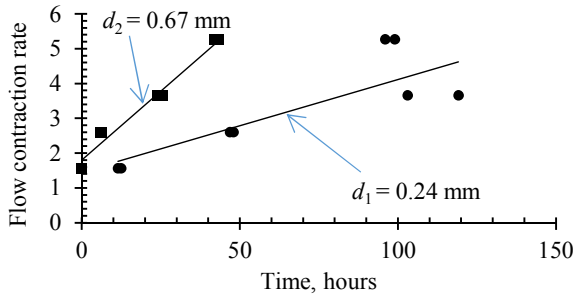


Figure 6. Contraction rate of the flow impact on equilibrium time of scour (Tests AL1, AL4, AL7 & AL10 with two sand grain sizes $d_1 = 0.24$ mm and $d_2 = 0.67$ mm)

When the scouring process continues in the scour hole, it takes longer time to achieve time to equilibrium scour. In the case of coarse sand, the depth of scour is achieved faster, thus resulting in a lesser relative depth of scour and at the same time lesser time to equilibrium scour, however with fine sand on the contrary, it takes more time to achieve equilibrium scour depth (Figure 7).

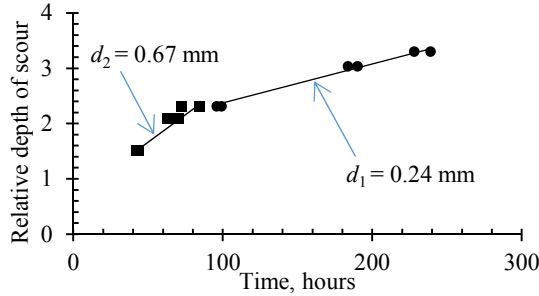


Figure 7. Relative depth of scour impact on equilibrium time of scour (Tests AL1, AL2 & AL3 with two sand sizes $d_1 = 0.24$ mm and $d_2 = 0.67$ mm)

Froude number characterizes the approach flow velocity, therefore with an increase in Froude number, there is also an increase in equilibrium time of scour; the greater the Froude number value becomes, the further the scouring process continues in the scour hole, resulting also in an increased equilibrium time of scour. With fine sand the equilibrium time is greater, the scouring process takes longer to achieve the equilibrium stage than with a coarse sand (Figure 8).

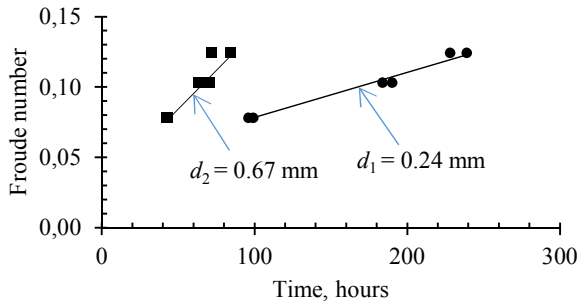


Figure 8. Froude number influence on equilibrium time of scour (Tests AL1, AL2 & AL3 with two sand sizes $d_1 = 0.24$ mm and $d_2 = 0.67$ mm)

When local flow velocity V_l at the water intake exceeds the critical value of sediment movement, the scouring process begins. Since coarse sand particles are heavier, it takes more energy to scour them away, therefore a greater local flow velocity is needed than in the case of finer sand with lesser critical flow velocity value. Thus with an increase of local flow velocity and a decrease in critical flow velocity, the equilibrium time of scour increases (Figure 9).

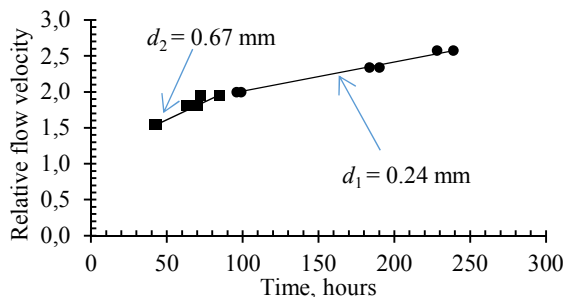


Figure 9. Relative velocity of the flow influence on equilibrium time of scour (Tests AL1, AL2 & AL3 with two sand grain sizes $d_1 = 0.24$ mm and $d_2 = 0.67$ mm)

Graphical hydraulic and riverbed parameter dependence analysis of the developed equilibrium time of scour calculation method results was made and it showed that equilibrium time of scour depends on: flow contraction rate; relative depth of scour; Froude number; and relative velocity of the flow.

LOCAL SCOUR RECOGNITION IN LATVIAN LEGISLATION

Legislation related to local scour at geotechnical structures available in Latvia is general and unspecific. Guidelines and recommendations that are found in Latvian Building Normatives (LBN) and Eurocodes are more informative and uncertain in respect of measures to be followed in cases of local scour, their evaluation and calculation. The law states that the use of Eurocodes is mandatory in all EU countries as of 2011. As Latvia is an EU member state since 2004, it is subject to follow Eurocodes.

Latvian geotechnical structure designer experience shows that in relation to local scour, there are no understandable and high quality materials available in Latvia, which are written in the national language. Since local scour phenomenon should not be ignored, it is necessary to take into account the maximum depth of scour in the design phase of geotechnical structures, therefore there is a need to develop a material that could be used by geotechnical structure designers in Latvia.

CONCLUSION

1. The proposed threshold criteria for equilibrium time of scour known from the literature are only depending on the size of the hydraulic structure, and not on hydraulic parameters of the flow.
2. The most common parameters used in equilibrium time of scour calculation methods are: approach flow depth; approach flow velocity; critical flow velocity; abutment length or pier diameter; median size of the sand; and sand density.
3. No method for equilibrium time of scour calculation at water intakes can be found, where the following parameters are being taken into consideration: contraction rate of the flow, local flow velocity near the structure, flood duration, flood sequence, flood probability, flood frequency, and bed stratification.
4. The differential equation of the bed sediment movement was used and a new equilibrium time of scour evaluation method for water intakes with and without flow separation at the structure in river floodplains was worked out.
5. Ratio of the recalculated critical flow velocity to the local one at the head of the water intake was proposed as the hydraulic threshold criterion in equilibrium time of scour calculation, equal to $\beta V_{0d}/V_{lt} = 0.985$.
6. Using the new threshold criterion and following this sequence, values h_{equil} , A_{equil} , D_{equil} , x_{equil} , N_{equil} and finally time to equilibrium scour t_{equil} can be calculated. An electronic time to equilibrium scour calculation model was created.
7. Using flow-altering method against scour at abutments, results in equilibrium depth of scour and time of scour reduction.
8. As the ratio of approach flow velocity to critical flow velocity increases at live-bed scour conditions, equilibrium time of scour is reached faster with decreasing scour depth value.
9. Calculated and computer modeled water intake test data revealed that with an increase in flow contraction rate and with an increase in approach flow Froude number, equilibrium time of scour increases as well.
10. Calculated and computer modeled equilibrium time of scour value comparison showed good agreement, the calculated average relative errors are within 10 %.

11. Different author time of scour calculation method results revealed, that mostly the estimations are reliable, when the approach flow velocity is close to the critical flow velocity.
12. Theoretical analysis of the developed calculation method showed that equilibrium time of scour depends on: flow contraction rate; kinetic parameter of flow in contraction in open-flow conditions; kinetic parameter of the open flow; ratio of the Froude number to the river slope; dimensionless sand grain size; ratio of the recalculated critical flow velocity to the local flow velocity; relative flow depth; and relative scour depth.
13. Graphical hydraulic and riverbed parameter dependence analysis of the developed calculation method results showed that equilibrium time of scour depends on: flow contraction rate; relative depth of scour; Froude number; and relative velocity of the flow.
14. Legislation analysis related to local scour at geotechnical structures available in Latvia showed, that it is general and unspecific. There is a need to develop a material that could be used by geotechnical structure designers in Latvia.

Publikāciju saraksts/List of publications

1. Radice A., and Lauva O. On Flow-Altering Countermeasures for Scour at Vertical-Wall Abutment// Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics. – 2013. – Vol. 59. – pp. 137-153.
2. Gjunsburgs B., Govsha J., and Lauva O. Scour at layered river bed: reason of the structures failure// The 9th International Conference Environmental Engineering. – Vilnius, Lithuania. – 2014. – 7 p.
3. Gjunsburgs B., Lauva O., and Neilands R. Equilibrium time of scour near structures in plain rivers// The 9th International Conference Environmental Engineering. – Vilnius, Lithuania. – 2014. – 7 p.
4. Gjunsburgs B., and Lauva O. Time of scour at elliptical guide banks// 2nd International Workshop on Hydraulic Structures: Data Validation. – Coimbra, Portugal. – 2015. – pp. 97-104.
5. Gjunsburgs B., and Lauva O. Time of Scour at Steady Flow Conditions at Structures in Plain Rivers// 7th Eastern European Young Water Professionals Conference. – Belgrade, Serbia. – 2015. – 8 p.
6. Lauva O., and Gjunsburgs B. Scour duration at structures at steady flow conditions// 7th International Scientific Conference Rural development 2015: Towards the Transfer of Knowledge, Innovations and Social Progress. – Kaunas, Lithuania. – 2015. – 6 p.
7. Lauva O., Klive G., and Gjunsburgs B. Evaluation of Time of Scour at Guide Banks in Plain Rivers// 2nd International Conference Innovative Materials, Structures and Technologies. – Riga, Latvia. – 2015. – 9 p.