

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

Gints JAUDZEMS

Doktora studiju programmas «Siltuma, gāzes un ūdens inženiersistēmas» doktorants

**VAIRĀKKĀRTĒJU PLŪDU IETEKME UZ VIETĒJIEM
IZSKALOJUMIEM PIE ŪDENS TEHNOLOĢIJU BŪVĒM PALIENĀ**

Promocijas darba kopsavilkums

**MULTIPLE FLOOD IMPACT ON THE LOCAL SCOUR AT WATER
ENGINEERING STRUCTURES ON A FLOODPLAIN**

Summary of Doctoral Thesis

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

RTU Izdevniecība
Rīga 2015

Jaudzems G. Vairākkārtēju plūdu ietekme uz vietējiem izskalojumiem pie ūdens tehnoloģiju būvēm palienā/Multiple flood impact on the local scour at water engineering structures on a floodplain.

Promocijas darba kopsavilkums. — R.: RTU Izdevniecība, 2015, 40 lpp.

Iespiests saskaņā ar Promocijas padomes 2015. gada 24. aprīļa lēmumu, protokols Nr. 3/2015.



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā «Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai».

The research has been supported by the European Social Fund within the project «Support for the Implementation of Doctoral Studies at Riga Technical University».

ISBN 978-9934-10-698-9

**PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI
RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2015. gada 18. jūnijā Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības inženierzinātņu fakultātē, Āzenes ielā 16, 250. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

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

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

Asoc. profesore, *ing.* Jana Pařílková
Brno University of Technology, Czech Republic

APSTIPRINĀJUMS

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.

Gints Jaudzems(paraksts)

Datums:

Promocijas darbs uzrakstīts angļu valodā. Tajā ir ievads, 5 nodaļas, secinājumi, literatūras sarakstu, 2 pielikumi, 73 attēli, 9 tabulas, kopā 121 lappuse. Literatūras sarakstā ir 121 nosaukums.

Satura rādītājs /Table of contents

Darba vispārējs raksturojums	5
Tēmas aktualitāte	5
Darba mērķis un uzdevumi	5
Zinātniskā novitāte un pielietojums	6
Darba struktūra un apjoms	7
Literatūras apskats	7
Metode izskalojuma novērtēšanai vairākkārtēju plūdu gadījumā	8
Eksperimentu datu apstrāde un salīdzināšanas rezultāti	10
Testa un aprēķināto rezultātu salīdzinājums izskalojumiem vienmērīgas plūsmas apstākļos	11
Testa un aprēķināto rezultātu salīdzinājums izskalojumiem nevienmērīgas plūsmas apstākļos	11
Vietējā, kritiskā un vidējā plūsmas ātrumu ietekme uz izskalojumu dziļumu	12
Datormodelēšanas rezultāti	13
Plūdu hidrogrāfa formas ietekme	13
Vairākkārtēju plūdu varbūtības ietekme	14
Vairākkārtēju plūdu ilguma ietekme	16
Vairākkārtēju plūdu biežuma ietekme	17
Vairākkārtēju plūdu secības ietekme	19
Secinājumi	20
General description	22
Introduction — Topicality	22
The Aim and Tasks of the Research	22
Scientific Novelty and Application	23
Scope of the Doctoral Thesis	23
Background and Literature review	24
Theory and Method of Scour Evaluation During Multiple Floods	25
Experimental Data Processing and Comparison Results	28
Comparison of Test and Calculated Results of Scour under Steady Flow Conditions	28
Comparison of Test and Calculated Results of Scour under Unsteady Flow Conditions ...	28
Influence of the Local, Critical and Approach Velocities on the Scour Depth	30
Results of Computer Modeling	30
The Influence of the Steepness of Flood Hydrograph	30
The Influence of Multiple Flood Probability	32
The Influence of Multiple Flood Duration	33
The Influence of Multiple Flood Frequency	35
The Influence of Multiple Flood Sequence	36
Conclusions	38
Publikāciju saraksts /List of Publications	40

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Neparedzētu un intensīvu plūdu izraisītu negadījumu skaita pieaugums Eiropā pēdējās desmitgadēs un informācija par vides un ekonomiskajiem zaudējumiem plūdu dēļ apstiprina klimata izmaiņu ietekmi uz šo parādību un nepieciešamību prognozēt iespējamus zaudējumus. Saskaņā ar Eiropas Vides aģentūras informāciju no 1998. līdz 2009. gadam atsevišķos Eiropas reģionos ir reģistrēti līdz pat deviņi plūdu negadījumi tikai vienā desmitgadē vien, un tā ir liecība vairākkārtēju plūdu gadījumiem. Ūdens tehnoloģiju būves (ūdens ņemšanas ietaises, notekūdeņu novadcaurules, cauruļvadu pamati u. c.), kā arī hidrotehniskās būves, piemēram, tiltu balsti, piestātnes, dambji un ceļi, palieņu zonās ir pakļauti vairākkārtēju plūdu ietekmei.

Lielākajā daļā pieņemto aprēķina metožu līdzsvara vai pagaidu izskalojuma dziļuma noteikšanai tiek izmantota caurplūde, kāda prognozēta visintensīvākajā plūdu brīdī. Līdzsvara izskalojuma dziļumu aprēķina metodes ir neierobežotas laikā, pagaidu izskalojuma dziļumu aprēķina metodes — ierobežotas laikā. Reālajos apstākļos plūsmas slodze uz ūdens tehnoloģiju būvju pamatiem atbilst hidrogrāfa formai, un izskalojumi veidojas vairākkārtēju plūdu (ar dažādu varbūtības pakāpi, ilgumu, biežumu un secību) rezultātā. Aprēķinu metodēs vai formulās, neizmantojot šos parametrus, nav iespējams aprēķināt dziļumu izskalojuma bedrei, kas radusies vairākkārtēju plūdu rezultātā. Savukārt vairākkārtēju plūdu ietekmei atbilstoša metode ļautu paredzēt izskalojuma dziļumu pirms, pēc un plūdu laikā, tā sniegtu informāciju par pamatu drošumu un ļautu veikt nepieciešamos aizsardzības pasākumus.

Darba mērķis un uzdevumi

Promocijas darba mērķis ir jaunas metodes izstrādāšana izskalojuma bedres dziļuma, platuma un tilpuma attīstības izvērtēšanai vairākkārtēju plūdu gadījumā un hidraulisko un plūdu parametru ietekmes novērtēšana uz izskalojuma dziļumu pie ūdens tehnoloģiju būvju pamatiem nevienmērīgas plūsmas apstākļos. Lai sasniegtu pētījuma mērķi, tika noteikti šādi uzdevumi:

1. izveidot pārskatu par vietējā izskalojuma aprēķina metodēm vienmērīgas un nevienmērīgas plūsmas apstākļos, lai noskaidrotu parametrus, ko izmanto izskalojuma dziļuma novērtēšanai pie ūdens tehnoloģiju būvēm upes plūsmā;
2. izstrādāt teorētisku metodi vietējā izskalojuma attīstības izvērtēšanai vairākkārtēju plūdu laikā;

3. pamatojoties uz izstrādāto metodi, izveidot jaunu datorprogrammu vietējā izskalojuma modelēšanai pie ūdens tehnoloģiju būvēm nevienmērīgas plūsmas apstākļos vairākkārtēju plūdu laikā ar dažādu varbūtību, ilgumu, biežumu un secību;
4. apstrādāt eksperimentu datus, lai noskaidrotu dažādu plūsmas hidroloģisko parametru un laika ietekmi uz vietējā izskalojuma parametriem;
5. izanalizēt vietējā un kritiskā ātruma izmaiņas nevienmērīgas plūsmas apstākļos, vietējās un vidējās plūsmas mijiedarbību un to, kā tā ietekmē izskalojuma bedres attīstību pie konstrukcijām;
6. izpētīt saistību starp plūdu hidrogrāfa formu un izskalojuma attīstības procesu;
7. veikt reālās plūsmas datormodelēšanu un izpētīt vairākkārtēju plūdu (ar dažādu varbūtības pakāpi, ilgumu, biežumu un secību) ietekmi uz izskalojuma veidošanās procesu pie ūdens tehnoloģiju būvēm.

Zinātniskā novitāte un lietojums

Izmantojot diferenciālvienādojumu grunts daļiņu kustības līdzsvaram tīra ūdens plūsmas apstākļos, tika izstrādāta jauna metode izskalojuma dziļuma aprēķināšanai, kas veidojas pie ūdens tehnoloģiju būvēm vairākkārtēju plūdu laikā. Pirmoreiz tika noteikta vairākkārtēju plūdu varbūtības, ilguma, biežuma un secības ietekme uz izskalojuma attīstību būvju pamatu tuvumā. Tika apstiprināts, ka izskalojuma dziļuma vērtība atšķiras dažādiem vairākkārtēju plūdu scenārijiem. Tiek piedāvāta jauna teorija, kas apstiprina, ka vietējā un kritiskā ātruma izmaiņas ir būtiskas izskalojuma veidošanās procesā un ka vietējam ātrumam, bet ne vidējam plūsmas ātrumam, ir ietekme uz vietējā izskalojuma attīstību. Tika apstiprināta hidrogrāfa līknes slīpuma ietekme uz laiku, kurā tiek sasniegts noteikts izskalojuma dziļums.

Piedāvātā metode atspoguļo situāciju dabā, tāpēc to var izmantot, lai prognozētu izskalojuma dziļuma veidošanos pirms, pēc un plūdu laikā, sniedzot informāciju par ūdens tehnoloģiju būvju drošumu, lai laikus varētu veikt nepieciešamos aizsardzības pasākumus. Metode arī ļauj modelēt izskalojuma veidošanās scenārijus turpmākiem plūdiem ar dažādu varbūtību, ilgumu, biežumu, secību un plūdu hidrogrāfu, ko var izmantot, lai izvērtētu, vai konstrukcija spēs izturēt plūdu radīto slodzi nākotnē.

Ieteikto metodi var izmantot kā agrīnās brīdināšanas sistēmas sastāvdaļu, lai izvērtētu konstrukciju stabilitāti ūdens straumē, izmantojot datus no plūdu prognozēšanas modeļiem, un datus no hidroloģisko mērījumu multisensoru tīkla.

Darba struktūra un apjoms

Promocijas darbā ir ievads, 5 nodaļas, secinājumi, 2 pielikumi, 121 atsauce, 73 attēli, 9 tabulas — kopumā 121 lappuse.

1. nodaļa iekļauj tēmas un literatūras apskatu par vietējā izskalojuma aprēķināšanas metodēm mainīgas un nemainīgas plūsmas apstākļos.

2. nodaļā «Vairākkārtēju plūdu radīta izskalojuma novērtēšanas teorija un metode» tiek piedāvāta jauna metode izskalojuma dziļuma attīstības aprēķināšanai pie ūdens tehnoloģiju būvēm vairākkārtēju plūdu gadījumā.

3. nodaļa «Eksperimentu datu apstrāde un salīdzināšanas rezultāti» iekļauj iepriekš publicētu eksperimentu datu salīdzinājumu ar aprēķinu rezultātiem, pamatojoties uz metodi, kas aprakstīta 2. nodaļā. Apstrādājot eksperimentu datus, tika pētīta un aprakstīta vietējo, kritisko un vidējo plūsmas ātrumu ietekme uz izskalojumu dziļumu.

4. nodaļā «Datormodelēšanas programma» tiek piedāvāta jauna programma laikatkarīgu izskalojumu veidošanās aprēķināšanai un novērtēšanai pie ūdens tehnoloģiju būvju pamatiem upes plūsmā vairākkārtēju plūdu laikā ar dažādu varbūtību, ilgumu, biežumu un secību. Nodaļā aprakstīti datormodelēšanai pieņemtie plūdu hidrogrāfa pamatkritēriji.

5. nodaļā «Datormodelēšanas rezultāti» tiek novērtēta plūdu hidrogrāfa formas un vairākkārtēju dažādas varbūtības, ilguma, biežuma un secības plūdu ietekme uz izskalojuma veidošanos, kā arī aprakstīti un ilustrēti datormodelēšanas rezultāti.

LITERATŪRAS APSKATS

Pēdējās desmitgadēs izskalojuma pagaidu dziļumu un līdzsvara dziļumu ir pētījuši un jaunas metodes izstrādājuši dažādi autori. Lielākajā daļā šo darbu izskalojuma līdzsvara un pagaidu dziļuma aprēķināšanai tiek izmantota plūsmas vērtība plūdu intensīvākajā brīdī; laiks šajās metodēs nav ierobežots, lai aprēķinātu izskalojuma līdzsvara dziļumu, vai arī ir ierobežots, ja tiek veikts pagaidu izskalojuma dziļuma aprēķins. Lielākajā daļā aprakstīto metožu izmanto vidējo plūsmas ātrumu, lai gan vietējos izskalojumus konstrukciju tuvumā veido plūsma ar atbilstošu vietējo ātrumu. Dabīgos apstākļos plūsmas radītā slodze uz ūdens tehnoloģiju būvēm atbilst hidrogrāfa formai, un izskalojumi veidojas vairākkārtēju plūdu ietekmē.

Joprojām ir tikai neliels skaits pētījumu par laikatkarīgiem izskalojumiem balstu tuvumā nevienmērīgas plūsmas apstākļos. Visas piedāvātās metodes fokusējas uz maksimālo izskalojuma vērtību salīdzinājumu, kas aprēķinātas, izmantojot pagaidu izskalojumu metodes vai ņemot vērā mainīgos plūdu apstākļus saskaņā ar plūdu hidrogrāfu. Neskatoties uz salīdzinoši līdzīgiem eksperimentu uzdevumiem, no aprēķinu rezultātiem izrietošie lēmumi

atšķiras. Autoru kopējais secinājums: izskalojumu dziļums, kas ir aprēķināts ar vienkāršām metodēm, būtiski neatšķiras no dziļuma, kas ir aprēķināts, ņemot vērā plūsmas apstākļu izmaiņas; tomēr visos pētījumos tika izmantoti tikai vidējie plūsmas ātrumi.

Literatūras apskatā izceļas turpmāk minētie secinājumi.

- 1) Izskalojuma aprēķināšanai vienmērīgas un nevienmērīgas plūsmas apstākļos tiek izmantots vidējais plūsmas ātrums, lai gan izskalojuma bedri veido vietējās plūsmas vietējais ātrums, virpuļa struktūras izmaiņas un turbulences pieaugums.
- 2) Literatūrā nav plašu pētījumu aprakstu par hidrogrāfa līknes stāvuma saistību ar izskalojuma bedres dziļuma, platuma un tilpuma rādītājiem.
- 3) Pašlaik literatūrā nav pieejamas formulas vai metodes izskalojuma dziļuma aprēķināšanai vairākkārtēju plūdu laikā.
- 4) Literatūrā nav pieejama izskalojumu veidošanās teorētiskā analīze, kurā ņemta vērā vairākkārtēju plūdu ar dažādu varbūtību, ilgumu, secību un biežumu ietekme.

METODE IZSKALOJUMA NOVĒRTĒŠANAI VAIRĀKKĀRTĒJU PLŪDU GADĪJUMĀ

Diferenciālvienādojums sanešu kustības līdzsvaram tīra ūdens plūsmā:

$$\frac{dw}{dt} = Q_s, \quad (1)$$

kur t — laiks, d;
 w — tilpums, m³;
 Q_s — sanešu kustība no izskalojuma bedres, m³/d.

Vienādojuma (1) kreisā puse var tikt izteikta kā

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

kur h_s — izskalojuma dziļums, m;
 m — izskalojuma bedres sienas slīpums;
 a — vienāds ar $1/2\pi m^2$.

Sanešu kustība tiek noteikta ar Levi (1969) formulu:

$$Q_s = AB \cdot V_l^4, \quad (3)$$

kur Q_s — sanešu kustība, m³/d;
 B — izskalojuma bedres platums, vienāds ar $m h_s$, m;
 V_l — vietējais ātrums pie ūdens tehnoloģiju būves upes plūsmā, m/s;
 A — parametrs Levi (1969) formulā.

Parametrs A ir atkarīgs no izskalojuma, vietējā ātruma, kritiskā ātruma un grunts daļiņu izmēra. Aprēķina gaitā jāņem vērā, ka vietējais un kritiskais ātrums mainās līdz ar izskalojuma dziļuma izmaiņām laikā, tādēļ šīs vērtības tiek izteiktas ar parametriem V_{lt} — vietējo ātrumu pie noteikta izskalojuma dziļuma un V_{0t} — kritisko ātrumu pie noteikta izskalojuma dziļuma. Izsakot vienādojumu (1) ar vienādojumiem (2–3), aizvietojo mainīgās

vērtības un to integrējot, tiek iegūta aprēķina formula izskalojuma aprēķina parametra N_i noteikšanai:

$$N_i = \frac{t_i}{4D_i h_f^2} + N_{i-1}, \quad (4)$$

kur t_i — laika intervāls noteiktam aprēķina posmam, d;

D_i — konstants parametrs noteikta laika ietvaros;

h_f — ūdens dziļums upes palienā, m.

Izmantojot grafiku $N = f(x)$ aprēķinātajai N_i vērtībai, tiek atrasta x_i vērtība un izskalojuma dziļums noteikta laika intervāla beigās:

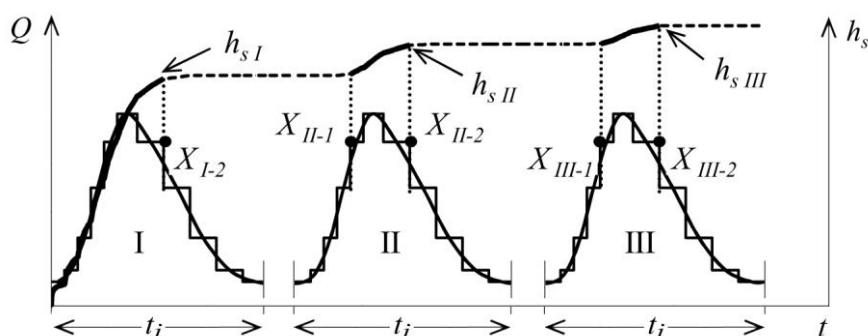
$$h_s = 2h_f(x-1). \quad (5)$$

Pilns aprēķina metodes apraksts izklāstīts pamatdarba 2. nodaļā.

Izejot no tā, tika izstrādāta jauna metode izskalojuma attīstības noteikšanai vairākkārtēju plūdu laikā. Atbilstoši piedāvātajai metodei katru nākamo plūdu hidrogrāfs tiek sadalīts atsevišķos laika soļos, un katrs solis — mazākos laika intervālos.

Laika soļa ietvaros tiek pieņemts vienmērīgs plūsmas režīms. Pirms izskalojuma sākšanās tiek aprēķināts vietējais plūsmas ātrums V_{I-1} un kritiskais ātrums V_{0I} . Plūsmas režīms laika soļa ietvaros tiek pieņemts vienmērīgs, tādēļ izskalojuma dēļ vietējā ātruma V_{It} vērtība samazinās, bet kritiskā ātruma vērtība pieaug. Laika soļa beigās tiek atrastas vietējā ātruma V_{It-1} un kritiskā ātruma V_{0I-1} vērtības un izskalojuma dziļums h_{sI-1} , kas radies pirmajā solī (kur romiešu cipars apzīmē plūdu kārtas skaitli, bet arābu cipars — plūdu soļa kārtas skaitli).

Nākamajam laika solim tiek aprēķinātas jaunas vietējā un kritiskā ātruma vērtības, jo palielinās caurplūde un jāņem vērā izskalojuma dziļums h_{sI-1} , kas izveidojies pirmajā solī. Soļa beigās tiek atrasta h_{sI-2} vērtība un aprēķins turpinās nākamajiem hidrogrāfa soļiem.



Att. 1. Izskalojuma attīstība vairākkārtēju plūdu laikā

Laika soļu ietvaros hidrogrāfa pacēluma līknes daļā vietējais ātrums tiecas samazināties izskalojuma pieauguma dēļ un tajā pašā laikā palielināties, jo pieaug plūsmas

dziļums palienā, caurplūde un maksimālā ūdens uzstādinājuma vērtība. Kritiskā ātruma vērtība palielinās, pieaugot gan plūsmas, gan izskalojuma dziļumam. Hidrogrāfa lejupejošās līknes daļā vietējais ātrums strauji samazinās caurplūdes samazinājuma dēļ, kā arī samazinās kritiskā ātruma vērtība. Izskalojums apstājas kādā hidrogrāfa līknes lejupejošā daļas punktā X_{I-2} , kur vietējais ātrums $V_{lt\ I-n}$ kļūst vienāds ar kritisko ātrumu $V_{0t\ I-n}$ un var tikt noteikts izskalojuma dziļums $h_{s\ I}$, kas sasniegts pirmo plūdu laikā (att. 1). Ņemot vērā izskalojuma dziļumu $h_{s\ I}$, kas sasniegts pirmo plūdu laikā, tiek atrastas jaunas vietējā ātruma $V_{lt\ II}$ un kritiskā ātruma $V_{0t\ II}$ vērtības otro plūdu hidrogrāfa pirmajam laika solim:

$$V_{lt\ II} = \frac{V_{l\ II}}{k \left(1 + \frac{h_{s\ I}}{2h_{f\ II}} \right)}, \quad (6)$$

kur $V_{lt\ II}$ — vietējais ātrums pie izskalojuma dziļuma $h_{s\ I}$, m/s;
 $V_{l\ II}$ — otro plūdu vietējais ātrums, neņemot vērā izskalojumu, m/s;
 $h_{s\ I}$ — pirmo plūdu laikā sasniegtais izskalojuma dziļums, m;
 $h_{f\ II}$ — plūsmas dziļums palienā otro plūdu pirmajā laika solī, m,

un

$$V_{0t\ II} = 3.6d^{0.25} \cdot h_{f\ II}^{0.25} \left(1 + \frac{h_{s\ I}}{2h_{f\ II}} \right)^{0.25}, \quad (7)$$

kur $V_{0t\ II}$ — kritiskais ātrums pie izskalojuma dziļuma $h_{s\ I}$, m/s.

Aprēķins tiek turpināts katram nākamajam hidrogrāfa solim, kamēr tiek sasniegts nosacījums, ka vietējais ātrums $V_{lt\ II}$ ir lielāks nekā kritiskais ātrums $V_{0t\ II}$ un sāk veidoties izskalojums (punkts X_{II-1} , Att.1). Atbilstoši metodei, tiek atrasts izskalojuma dziļums $h_{s\ II}$, kas izveidojas otro plūdu laikā un tiek izmantots trešo plūdu vietējā un kritiskā ātruma aprēķinam.

EKSPERIMENTU DATU APSTRĀDE UN SALĪDZINĀŠANAS REZULTĀTI

Testa rezultātu analīzei tika izmantoti iepriekš publicēti eksperimentu dati. Testi tika veikti 3,5 m platā un 21 m garā ūdens teknē. Eksperimentu dati tika iegūti vaļējas gultnes apstākļos, vienmērīgai un nevienmērīgai plūsmai ar mainīgu plūsmas saspīestības pakāpi. Testos izpildījās noteikums, ka $Fr_R = Fr_f$, kur Fr_R ir Frūda skaitlis palienas upei un Fr_f ir Frūda skaitlis laboratorijas teknei.

Testa un aprēķināto rezultātu salīdzinājums izskalojumiem vienmērīgas plūsmas apstākļos

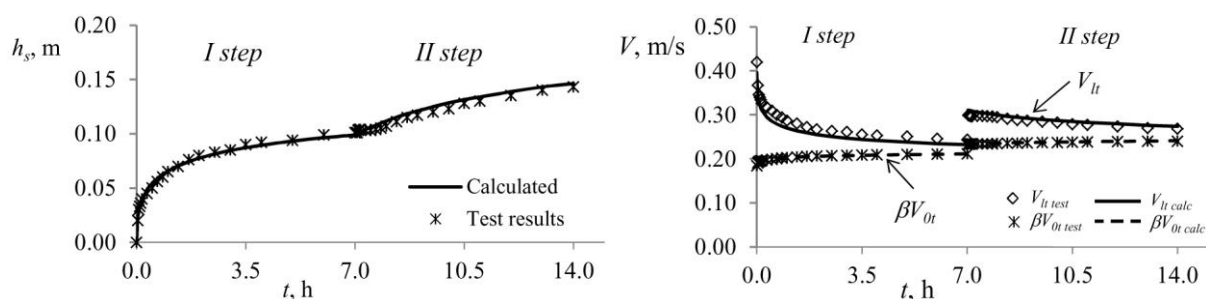
Tika veikta datu apstrāde testa rezultātiem, kas iegūti vienmērīgas plūsmas apstākļos. Tika pētīti un grafikos attēloti šādi procesi: vietējā ātruma V_{lt} un kritiskā ātruma βV_{0t} izmaiņas; izskalojumu dziļuma h_s , platuma B un tilpuma w attīstība; relatīvā vietējā ātruma V_{lt}/V_l un relatīvā kritiskā ātruma V_{0t}/V_0 izmaiņas; izskalojuma attīstība testu laikā ar dažādu caurplūdi; laika ietekme uz izskalojumu dziļumu vienmērīgas plūsmas apstākļos, paildzinot plūsmas ietekmi no septiņām stundām, kas tika izmantotas testos, līdz 28 stundām.

Iepriekš minēto pētījumu rezultāti apstiprina galvenos novērotos faktus, piemēram, lielāks izskalojumu dziļums tiek panākts lielākas caurplūdes gadījumā pie mazāka grunts daļiņu izmēra un ilgākas plūsmas iedarbības. Vienlaikus rezultāti liecina par kritiskā un vietējā ātruma, kā arī relatīvā dziļuma izmaiņām, tādēļ var apstiprināt, ka vietējie izskalošanās procesi pie ūdens tehnoloģiju būvju pamatiem ir saistīti ar nepārtrauktām plūsmas un upes gultnes rādītāju izmaiņām.

Iegūtie rezultāti liecina par svarīgu rādītāju izmaiņām: h_s , V_{lt} , V_{0t} , V_{lt}/V_l un V_{0t}/V_0 , ko izmanto izskalojuma dziļuma aprēķināšanai vienmērīgas plūsmas apstākļos. Tomēr dabā plūdi atbilst hidrogrāfa formai, tādēļ svarīgāk ir pētīt izskalojumu procesu nevienmērīgas plūsmas apstākļos.

Testa un aprēķināto rezultātu salīdzinājums izskalojumiem nevienmērīgas plūsmas apstākļos

Nevienmērīgas plūsmas testi tika veikti diviem hidrogrāfa soļiem ar atšķirīgu caurplūdi. Katra soļa ilgums t bija 7 stundas, un tests nevienmērīgas plūsmas apstākļos ilga 14 stundas. Caurplūde pirmajā un otrajā hidrogrāfa solī palielinājās, kā arī palielinājās Frūda skaitlis vaļējas plūsmas apstākļos un vietējais Frūda skaitlis.



Att. 2. Izskalojumu attīstība (kreisā puse) un vietējā un kritiskā ātruma izmaiņas (labā puse) mainīgas plūsmas apstākļos (TL1 tests)

Attēlā (2) attēlots izskalojumu dziļums (kreisās puses līkne), kā arī vietējā un kritiskā ātruma izmaiņas (labās puses līkne) nevienmērīgas plūsmas apstākļos. Nevienmērīgas

plūsmas apstākļos izskalojuma bedres dziļums, platums un tilpums pirmā soļa laikā attīstās līdzīgi kā vienmērīgas plūsmas apstākļos. Tomēr, palielinoties plūsmai nākamajā solī, izskalojums attīstās intensīvāk (att. 2, kreisās puses grafiks).

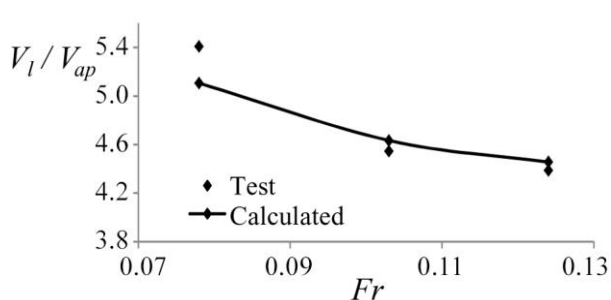
Vietējais ātrums V_{lt} pirmajā solī pakāpeniski samazinās, jo izveidojas izskalojuma bedre (att. 2, labās puses grafiks). Otrā soļa sākumā vietējais ātrums palielinās, jo otrajā solī ir izmantota lielāka plūsma, taču aprēķinā tiek ņemts vērā arī pirmajā solī radītais izskalojuma bedres dziļums. Otrā posma laikā vietējais ātrums atkal pakāpeniski samazinās, jo šajā posmā izskalojumu bedres dziļums turpina pieaugt.

Vienlaikus izskalojuma attīstības laikā nevienmērīgas plūsmas apstākļos kritiskajam ātrumam V_{ot} ir tendence palielināties. Kritiskais ātrums pakāpeniski palielinās gan pirmajā, gan otrajā solī, jo pieaug izskalojuma dziļums. Otrā posma sākumā kritiskais ātrums strauji pieaug, jo strauji pieaug plūsmas dziļums palienē un arī izskalojuma dziļums, kas radies iepriekšējā solī (skat. att. 2 labās puses grafiku).

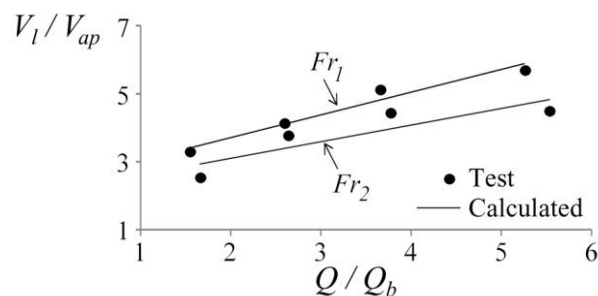
Vietējā un kritiskā ātruma vērtības tiecas izlīdzināties. Izskalojuma rašanās intensitāte ir lielāka, ja ir lielāka attiecība starp vietējo un kritisko ātrumu. Izskalošanās laikā notiek divi vienlaicīgi procesi, kas ietekmē vietējā ātruma izmaiņas mainīgās plūsmas apstākļos. No vienas puses, vietējais ātrums V_{lt} samazinās radušās izskalojuma bedres dēļ, bet, no otras puses, tas pieaug, jo pieaug plūdu intensitāte. Savukārt kritiskais ātrums pieaug, gan palielinoties izskalojuma bedres dziļumam, gan plūsmai.

Vietējā, kritiskā un vidējā plūsmas ātrumu ietekme uz izskalojumu dziļumu

Tika noskaidrots, ka vietējā un vidējā plūsmas ātruma attiecība V_l/V_{ap} ir atkarīga no plūsmas Frūda skaitļa (att. 3). Palielinoties Frūda skaitlim, atšķirība starp vietējo un vidējo plūsmas ātrumu samazinās.



Att. 3. Vietējā un vidējā plūsmas ātruma V_l/V_{ap} attiecības saistība ar Frouda skaitli (AL testi 4, 5, 6)



Att. 4. Vietējā un vidējā plūsmas ātruma attiecības saistība ar plūsmas saspīestības pakāpi.

Vietējā un vidējā plūsmas ātruma attiecība V_l/V_{ap} ir atkarīga no plūsmas saspīestības pakāpes (att. 4). Palielinoties plūsmas saspīestības pakāpei, atšķirība starp vietējo un vidējo plūsmas ātrumu pieaug.

Šajā nodaļā aprakstītie testu rezultāti apstiprināja vietējā ātruma ietekmi uz vietējā izskalojuma attīstību, bet ne vidējā plūsmas ātruma ietekmi, kā pašlaik uzskata dažādi autori.

DATORMODELĒŠANAS REZULTĀTI

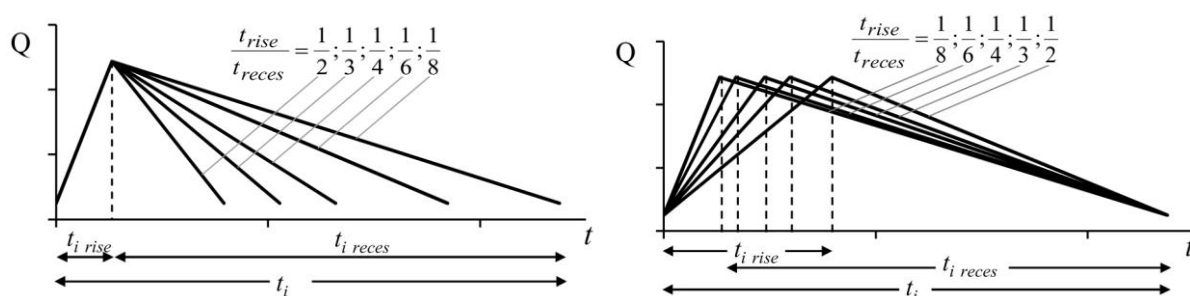
Tika veikta datormodelēšana laikkarīgam izskalojumam, kas veidojas atsevišķu plūdu laikā ar dažādu hidrogrāfa formu, un vairākkārtēju plūdu laikā ar dažādu varbūtību, ilgumu, biežumu un secību. Izejas dati plūdu plūsmas modelēšanai ir pieejami pamatdarba I pielikumā. Rezultāti šajā nodaļā uzrādīti vienam grunts daļiņu izmēram, bet izpēte ir veikta četriem dažādiem izmēriem— $d_i = 0,24$ mm, 0,59 mm, 0,67 mm un 1,0 mm, un salīdzināšanas rezultātu attēli ir pieejami pamatdarba I pielikumā.

Plūdu hidrogrāfa formas ietekme

Tika veikta laikkarīga izskalojuma datormodelēšana, kas radies plūdu laikā ar atšķirīgu hidrogrāfa formu. Hidrogrāfa forma tika mainīta, mainot laiku ūdens līmeņa celšanās un atkāpšanās periodiem. Tika pētīti divi hidrogrāfu formu tipi (att. 5).

Pirmā tipa hidrogrāfu gadījumā ūdens līmeņa celšanās laiks bija nemainīgs, bet kopējais plūdu ilgums t_i atšķīrās, palielinoties plūdu atkāpšanās laikam. Tika modelētas šādas laika attiecības starp hidrogrāfa pieaugošās un krītošās līknes daļām: 1:2, 1:3, 1:4, 1:6 un 1:8 (att. 5, kreisās puses modelis).

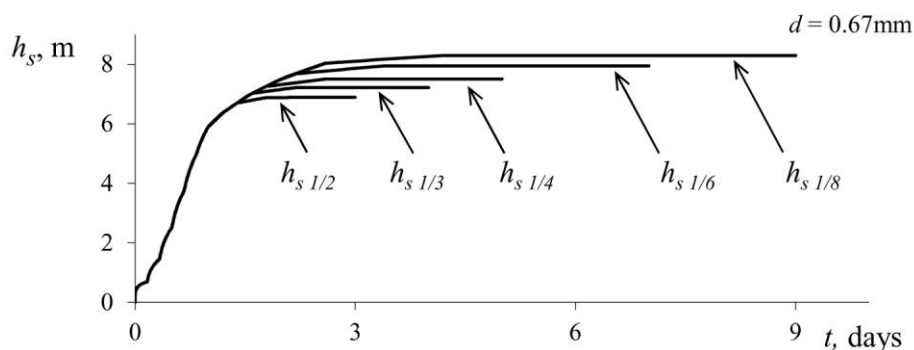
Otrā tipa gadījumā (att. 5, labās puses modelis) plūdu kopējais ilgums bija nemainīgs. Ūdens līmeņa celšanās un atkāpšanās laikiem bija dažādas attiecības, piemēram, 1:2, 1:3, 1:4, 1:6 un 1:8, kur pirmais un otrais skaitlis ir ūdens līmeņa celšanās un atkāpšanās periodu laiks.



Att. 5. Hidrogrāfi ar nemainīgu ūdens līmeņa celšanās laiku (kreisās puses modelis) un hidrogrāfi ar vienādu ilgumu, bet dažādām ūdens līmeņa celšanās un atkāpšanās laiku attiecībām (labās puses modelis)

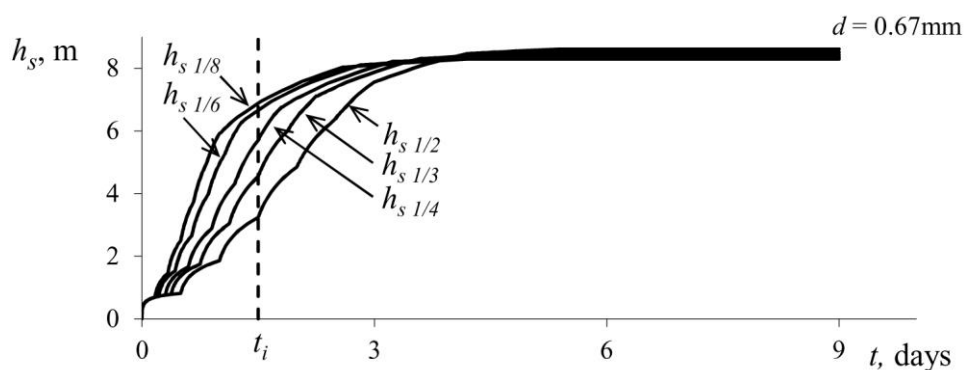
Pirmā tipa hidrogrāfu izpēte (kreisās puses modelis 4. attēlā) apstiprināja: jo ilgāks ir plūdu atkāpšanās periods, jo lielāks to kopējais ilgums un izskalojumu dziļums (att. 6). Tika noskaidrots, ka pat plūdu plūsmas samazināšanās laikā turpinājās grunts daļiņu aizplūde no

izskalojuma bedres, bet tikai tik ilgi, kamēr vietējais ātrums bija lielāks nekā kritiskais ātrums, reizināts ar samazināšanās koeficientu β .



Att. 6. Izskalojumu attīstība atbilstoši trīsstūrveida hidrogrāfiem, ja ūdens līmeņa celšanās laiks ir nemainīgs

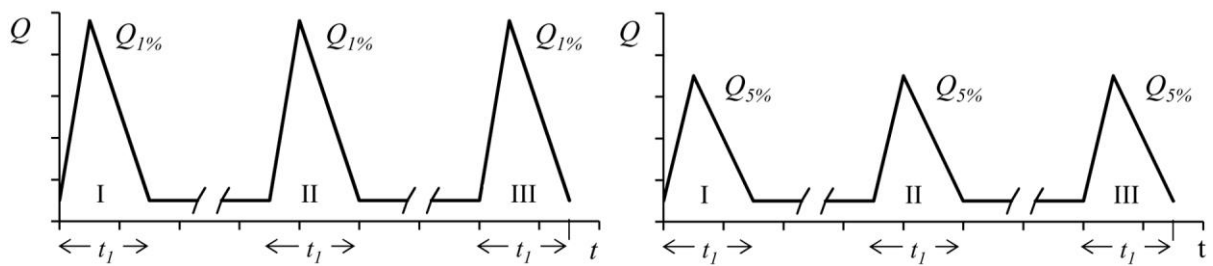
Otrā tipa (att. 5, kreisās puses modelis) hidrogrāfa modelis liecināja, ka tā formas saistība ar radīto izskalojumu dziļumu bija neliela, taču plūdu sākuma stadijā izskalošanās process bija atšķirīgs (att. 7). Pēc vienāda laika t_i plūdu sākumā izskalojuma dziļums bija atšķirīgs dažādu hidrogrāfa slīpumu gadījumā. Jo īsāks bija ūdens līmeņa celšanās laiks, jo dziļāks bija izskalojums. Saskaņā ar aprēķina rezultātiem izskalojums attīstās intensīvāk tādu plūdu laikā, kam atbilstošā hidrogrāfa pacēlums ir stāvāks. Laiks līdz maksimālā dziļuma h_s sasniegšanai dažādu hidrogrāfa formu gadījumā atšķiras. Jo īsāks ir ūdens līmeņa celšanās laiks, jo ātrāk tiek sasniegts izskalojuma dziļums, kas var izveidoties šo plūdu laikā.



Att. 7. Izskalojumu attīstība plūdu gadījumā ar vienādu ilgumu, bet dažādu celšanās un atkāpšanās periodu attiecību hidrogrāfa līknē

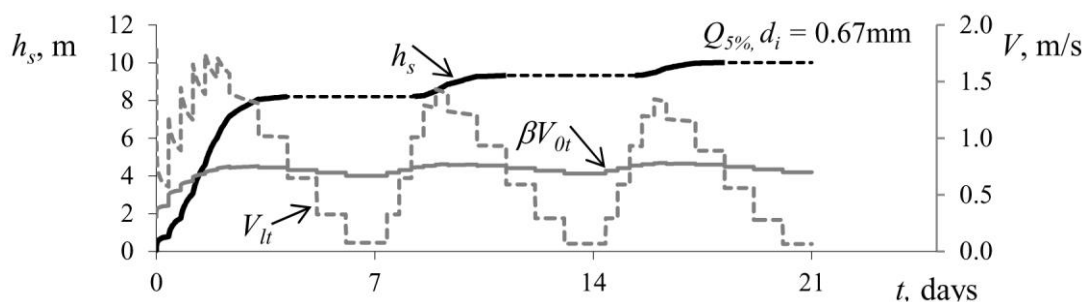
Vairākkārtēju plūdu varbūtības ietekme

Tika izvērtēta vairākkārtēju plūdu varbūtības ietekme uz izskalojumu veidošanos. Tika izmantotas divas plūdu sērijas ar vienādu ilgumu un hidrogrāfa formu, bet katrā modelī tika izmainīts vairākkārtēju plūdu caurplūdums (att. 8).



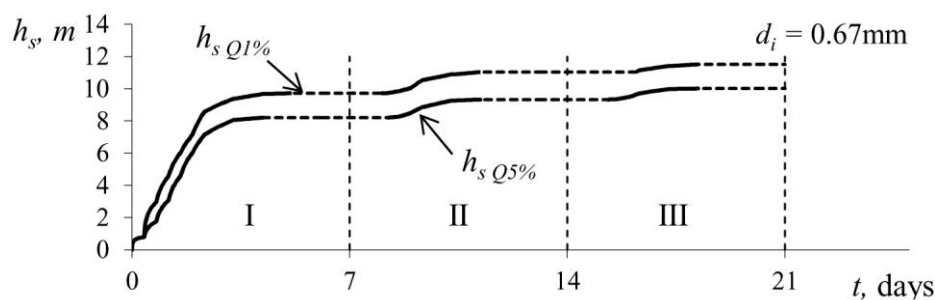
Att. 8. Vairākkārtēji plūdi ar caurplūdi, atbilstošu 1 % un 5 % varbūtībai

Izskalojuma attīstības process un vietējā un kritiskā ātruma izmaiņas vairākkārtēju plūdu laikā ar 5 % varbūtību un septiņu dienu ilgumu ir parādīts attēlā (9). Pelēkās līnijas attēlo vietējā (raustītā līnija) un kritiskā (nepārtrauktā līnija) ātruma izmaiņas. Melnā līnija attēlo izskalojuma veidošanās procesu vairākkārtēju plūdu laikā. Kā redzams attēlā, izskalojums veidojas (melnā, nepārtrauktā līnija h_s) tad, ja vietējais ātrums pārsniedz kritisko, savukārt izskalojuma dziļums saglabājas nemainīgs (melnā, raustītā līnija h_s), ja vietējais ātrums V_{lt} ir vienāds vai mazāks nekā kritiskais ātrums βV_{0t} . Grunts daļiņu izskalošanās intensitāte no izskalojuma bedres samazinās ar katru nākamo plūdu reizi un ir atkarīga no vietējā un kritiskā ātruma attiecības.



Att. 9. Apvienotais izskalojumu veidošanās un ātruma izmaiņu grafiks vairākkārtēju plūdu ar 5 % varbūtību gadījumā

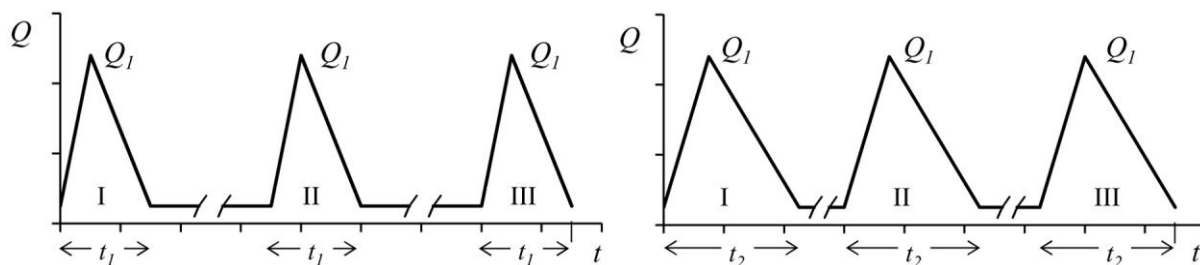
Salīdzinot radīto izskalojuma dziļumu divām vairākkārtēju plūdu sērijām ar vienādu ilgumu un hidrogrāfa formu, bet atšķirīgu caurplūdi ($Q_{1\%}$ un $Q_{5\%}$), tika konstatēts, ka izskalojumu dziļums ir lielāks plūdu sērijās ar zemāku varbūtības pakāpi gadījumā (att. 10). Tika noskaidrots, ka izskalojumu veidošanās intensitāte katras plūdu epizodes laikā saglabājas augstākā līmenī plūdu sērijās ar zemāku varbūtību.



Att. 10. Izskalojumu attīstības salīdzinājums triju plūdu sērijai ar dažādu varbūtību

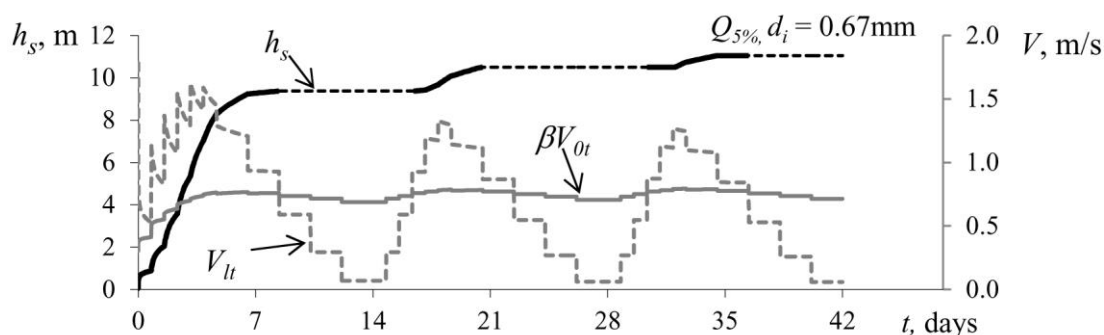
Vairākkārtēju plūdu ilguma ietekme

Vairākkārtēju plūdu ilguma ietekme tika pētīta vairākkārtēju plūdu modeļos ar vienādu caurplūdi un hidrogrāfa formas slīpumu, bet ar atšķirīgu ilgumu (att. 11).



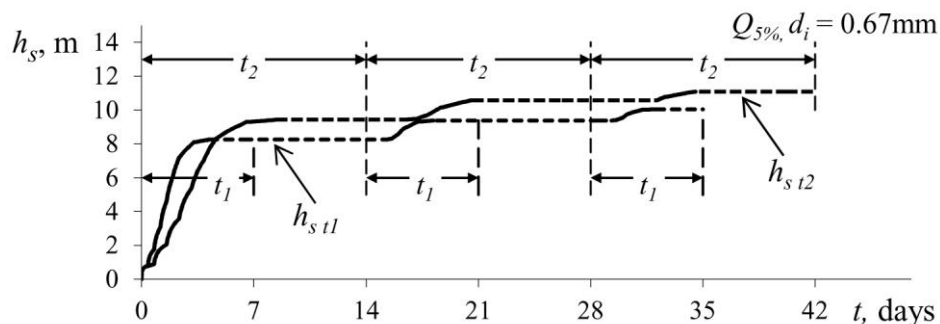
Att. 11. Plūdu sērijas ar vienādu caurplūdi un hidrogrāfa slīpumu, bet atšķirīgu ilgumu

Izskalojuma veidošanās laikā un vietējā un kritiskā ātruma izmaiņas triju plūdu sērijā ar vienādu caurplūdi, hidrogrāfa formu un ilgumu $t = 14$ dienas (att. 11, labās puses modelis) ir attēlotas attēlā (12). Vietējais un kritiskais ātrumi ir attēloti ar pelēkām līnijām, bet melnās līnijas uzrāda izskalošanās procesu. Vairākkārtēju plūdu laikā izskalojumi rodas, ja vietējā ātruma vērtība V_{lt} pārsniedz kritiskā ātruma vērtību βV_{0t} ; izskalojumu bedre intensīvi veidojas pirmo plūdu laikā, bet turpmākos plūdus turpina palielināties tikai zonā ap maksimālo caurplūdi (att. 12).



Att. 12. Izskalojumu veidošanās un ātrumu izmaiņu apvienotais grafiks

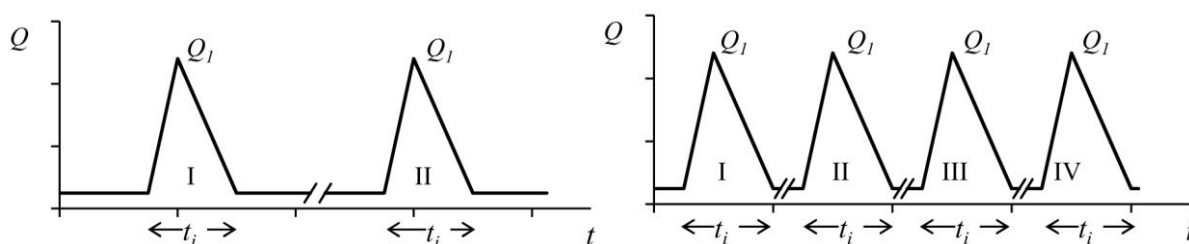
Tika salīdzināta izskalojumu veidošanās un dziļums vairākkārtēju plūdu rezultātā ar 7 un 14 dienu ilgumu saskaņā ar modeļiem, kas atainoti attēlā (11). Redzams — jo ilgāki ir plūdi sērijas ietvaros, jo dziļāks ir to radītais izskalojums (Att.13).



Attē. 13. Triju plūdu sērijas ar 7 vai 14 dienu ilgumu radīta izskalojuma salīdzinājums

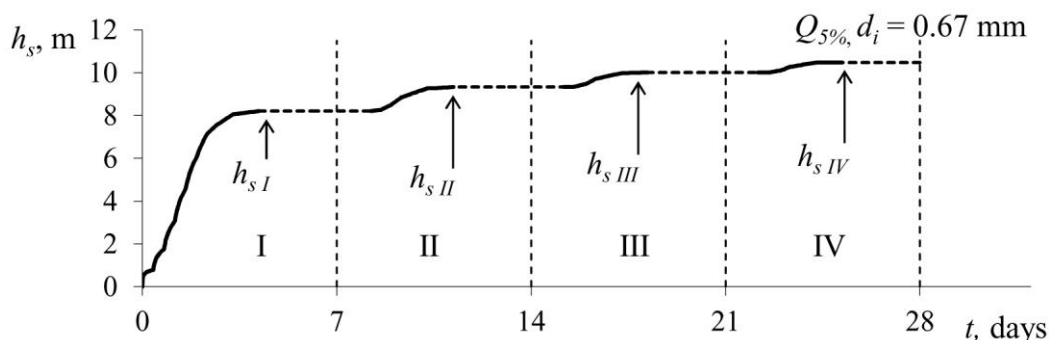
Vairākkārtēju plūdu biežuma ietekme

Tika modelēti vairākkārtēji plūdi ar dažādu biežumu. Tika pieņemts noteikts periods, kurā notiek vairākkārtēji plūdi, un mainīts plūdu biežums šajā periodā (Att.14). Vienā periodā tika modelēti divi, trīs un četri plūdi.



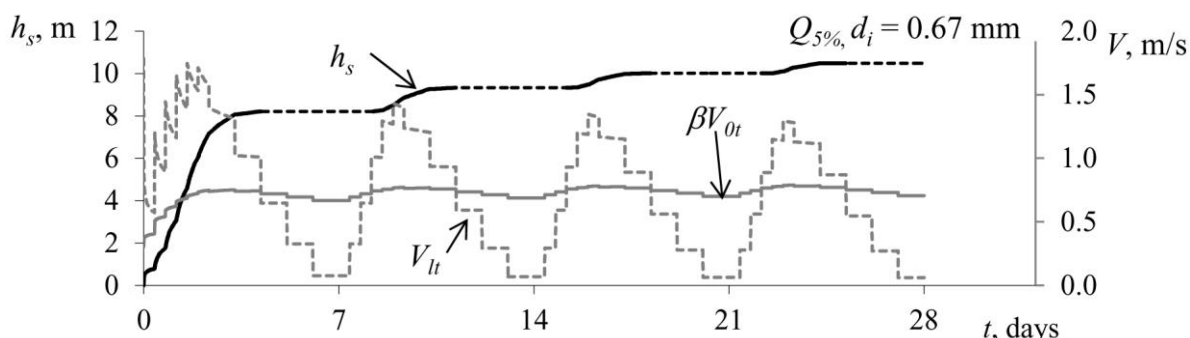
Att. 14. Vairākkārtēji plūdi ar dažādu biežumu; divu un četrus plūdu piemērs ir sniegts attiecīgi kreisajā un labajā pusē vienādā periodā

Lai izpētītu plūdu biežuma ietekmi uz izskalojumu veidošanos, tika izvēlēts, piemēram, piecu gadu periods, un pieņemts, ka šajā periodā notika divi vai četri plūdi ar vienādu varbūtību, ilgumu un hidrogrāfa formu. Tika izvēlēts divu plūdu (ar ilgumu septiņas dienas) modelis un papildināts ar diviem papildu plūdu gadījumiem. Saskaņā ar pieņēmumu, ka izskalojuma dziļums periodā starp plūdiem nemainās, izskalojuma veidošanos var atainot ar vienu grafiku, kurā ir attēlotas izskalojuma dziļuma izmaiņas laikā četrus plūdu sērijas rezultātā (att. 15).



Att. 15. Izskalojumu veidošanās plūdu rezultātā ar dažādu biežumu; h_{sI} līdz h_{sIV} ir izskalojuma dziļums, kas izveidojies attiecīgi pēc pirmajiem līdz ceturtajiem plūdiem.

Izkalošanās intensitāte un izskalojuma bedres papildu dziļums samazinās ar katriem nākamajiem plūdiem. To var izskaidrot ar atšķirības samazināšanos starp vietējo ātrumu V_{lt} un kritisko ātrumu βV_{0r} periodā, kad vietējais ātrums ir lielāks nekā kritiskais (att. 16). Citiem vārdiem sakot, izskalošanās intensitāte samazinās, ja $V_{lt}/\beta V_{0r}$ attiecība tuvojas 1.



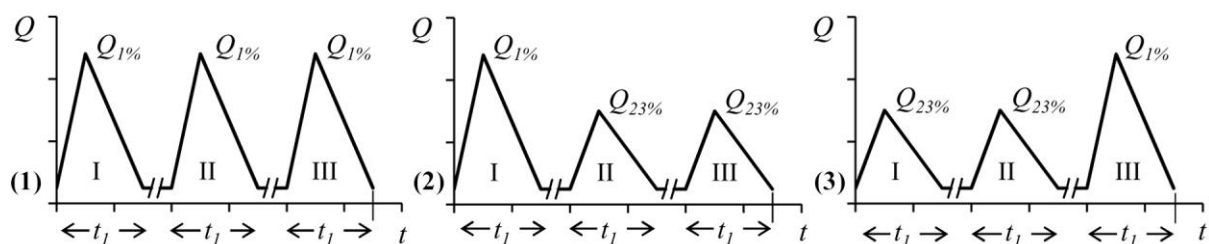
Att. 16. Izskalojumu veidošanās un ātrumu izmaiņu apvienotais grafiks četru plūdu sērijai

Ir redzams, ka plūdu biežuma pieaugums izraisa izskalojuma dziļuma pieaugumu, un no (15) un (16) attēla izriet, ka izskalojuma dziļums pēc diviem plūdiem h_{sII} pieņemtajā periodā ir mazāks nekā h_{sIII} pēc trim plūdiem, kas notikuši tajā pašā periodā, $h_{sIV} > h_{sIII}$ utt. Pēc katriem nākamajiem plūdiem izskalojumu dziļumi summējas, un to summa tuvojas līdzsvara dziļuma vērtībai.

Četru secīgu plūdu (5% varbūtība, septiņu dienu ilgums, $d_i = 0,67$ mm) radītu izskalojuma veidošanās ir atainota (16) attēlā. Līdzsvara izskalojuma dziļums, kas aprēķināts vienam plūdu gadījumam ar iepriekš minētajiem rādītājiem, ir 18,2 m (Neilands, 2008). Samazinoties izskalojuma intensitātei ar katriem nākamajiem plūdiem, iespēja sasniegt aprēķināto līdzsvara dziļumu plūdu sērijas rezultātā ar pieņemto varbūtību ir tikai teorētiska. Būtu jānotiek lielam skaitam vairākkārtēju plūdu ar vienādu varbūtību un ilgumu, lai radītā izskalojuma dziļums sasniegtu aprēķinātā līdzsvara izskalojuma vērtību.

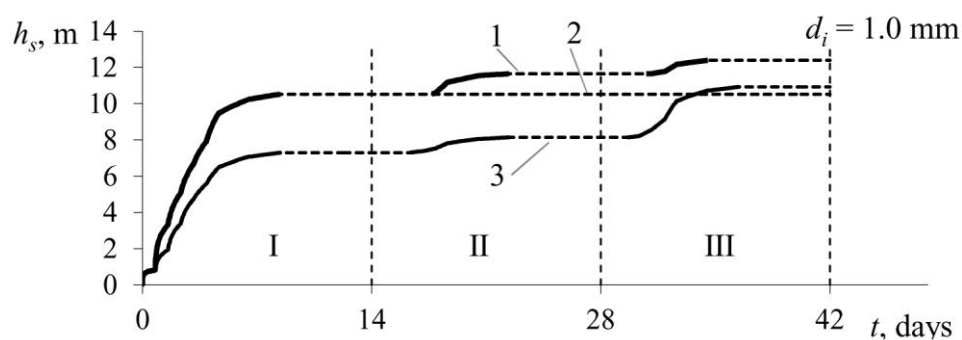
Vairākkārtēju plūdu secības ietekme

Dažādas varbūtības plūdu secības ietekme uz laikkarīga izskalojuma veidošanos tika pārbaudīta saskaņā ar trim scenārijiem (att. 17). Modelis (1) attēlo triju plūdu shēmu ar vienādu varbūtību. Spēcīgi plūdi, pēc kuriem seko divi plūdi ar mazāku caurplūdi, attēloti modelī (2), savukārt divi augstākas varbūtības plūdi, pēc kuriem seko plūdi ar zemu varbūtību, attēloti modelī (3) (att. 17).



Att. 17. Vairāku plūdu sērija ar trim plūdiem ar vienādu varbūtību (1) un dažādu plūdu secību (2, 3).

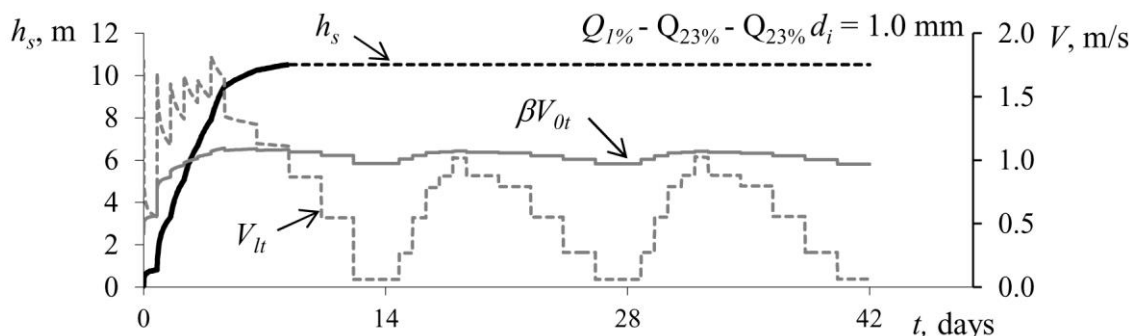
Izskalojuma veidošanos scenārijā, kas atainots (17-1) attēlā, raksturo līkne 1 attēlā (18). Izskalošanās sākas, applūstot palienei, un strauji pastiprinās. Pirmo plūdu laikā radās izskalojuma bedre, tāpēc otrajos plūdos izskalošanās process sākas hidrogrāfa posmā, kad $V_{lt II} \geq \beta V_{ot II}$, un ir īsāks, turpretī trešajos plūdos ātrumi mainās izskalojuma dēļ, kas radies pēc iepriekšējiem diviem plūdiem, un sākas tad, kad $V_{lt III} \geq \beta V_{ot III}$ (att. 18, līkne 1).



Att. 18. Izskalojuma veidošanās laikā vairākkārtējiem plūdiem ar dažādu secību

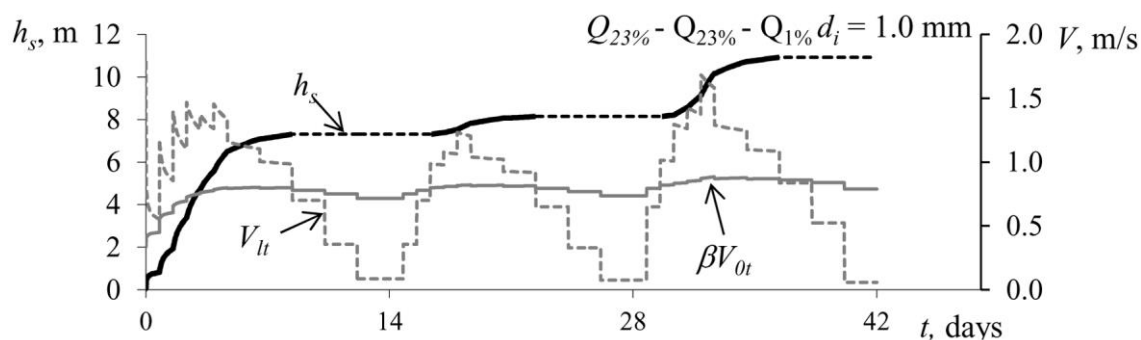
Attēla (18) 2. līkne ataino izskalošanās procesu vairākkārtēju plūdu secības scenārijam, kad spēcīgiem plūdiem seko divi vājāki plūdi (att. 17, modelis 2). Attēlā (19) šim scenārijam atainota izskalojuma veidošanās līkne kopā ar vietējā un kritiskā ātrumu līknēm. Kā redzams attēlā, izskalojums izveidojas pirmo plūdu laikā un paliek nemainīgs divu nākamo plūdu laikā. To var izskaidrot ar vietējā un kritiskā ātruma izmaiņu grafiku (att. 19). Vietējais ātrums V_{lt} samazinās, bet kritiskais ātrums V_{ot} pieaug pirmo plūdu laikā, pieaugot izskalojuma bedrei. Nākamajos plūdos plūsmas intensitāte nav pietiekama, lai izskaloju

grunts daļiņas no izskalojumu bedres, jo V_{lt} ir mazāks nekā βV_{0t} . Otrajos un trešajos plūdos izskalojuma dziļums paliek tāds pats, kāds tas bija pēc pirmajiem plūdiem (att. 19).



Att. 19. Izskalojumu veidošanās un vietējā un kritiskā ātruma izmaiņas plūdu sērijā, kurā spēcīgiem plūdiem seko divi vājāki plūdi

Attēla (18) līkne 3 attēlo izskalošanās procesu vairākkārtēju plūdu secības scenārijam, kad diviem plūdiem ar augstāku varbūtību seko plūdi ar zemāku varbūtību. Izskalojums veidojas atbilstoši vietējā un kritiskā ātruma izmaiņām (att. 20). Tas sākas un attīstās strauji pirmo plūdu laikā. Otrajos plūdus izskalošanās process sākas hidrogrāfa solī, kad $V_{lt II} \geq \beta V_{0t II}$, un ilgst īsāku laiku. Trešajos plūdus izskalošanās sākas hidrogrāfa solī, kad $V_{lt} \geq \beta V_{0t}$, un strauji palielinās caurplūdes dēļ, kas ir daudz lielāka nekā iepriekšējos divos plūdus (att. 20). Izskalojumu veidošanās intensitāti skaidri raksturo laukums, ko iekļauj vietējā un kritiskā ātruma līknes šajā attēlā. Jo lielāka ir vietējā V_{lt} un kritiskā ātruma βV_{0t} starpība, jo intensīvāka ir izskalojuma veidošanās.



Att. 20. Izskalojuma veidošanās un vietējā un kritiskā ātruma izmaiņas plūdu sērijai, kurā diviem plūdiem ar augstu varbūtību seko plūdi ar zemu varbūtību.

SECINĀJUMI

1. Literatūras analīze liecina, ka pašlaik nav pieejama metode izskalojuma aprēķināšanai pie ūdens tehnoloģiju būvēm upju straumē, kas ņemtu vērā vairākkārtēju plūdu ietekmi ekspluatācijas periodā.

2. Tika izstrādāta jauna, teorētiska metode izskalojuma dziļuma, platuma un tilpuma aprēķināšanai pie ūdens tehnoloģiju būvēm upēs nevienmērīgas plūsmas apstākļos, pamatojoties uz diferenciālvienādojumu grunts daļiņu kustības līdzsvaram tīra ūdens plūsmā.
3. Pamatojoties uz izstrādāto aprēķina metodi, tika izveidota datorprogramma, kas ļauj izvērtēt izskalojuma dziļuma izmaiņas vairākkārtēju plūdu ar dažādu varbūtību, ilgumu, biežumu un secību laikā dažādiem scenārijiem.
4. Eksperimentu datu apstrāde liecina par plūsmas saspīestības pakāpes, kā arī tās dziļuma, Frūda skaitļa, vidējā plūsmas ātruma un dažādu vietējā un kritiskā ātruma $\beta V_{0t}/V_{lt}$, V_0/V_{0t} , V_l/V_{lt} attiecību ietekmi uz vietējā izskalojuma veidošanos, un tā sakrīt ar aprēķina rezultātiem.
5. Vietējo un vidējo plūsmas ātrumu grafiku salīdzinājums pie dažādas plūsmas saspīestības pakāpes un Frūda skaitļiem apstiprina, ka vietējais ātrums ir atkarīgs no plūsmas saspīestības pakāpes un maksimālā ūdens uzstādinājuma vērtības un tas ir vairākas reizes lielāks nekā vidējais plūsmas ātrums tekņē; palielinoties Frūda skaitlim un samazinoties plūsmas saspīestības pakāpei, starpība starp vietējo un vidējo plūsmas ātrumu samazinās. Izskalojumu bedri veido vietējais plūsmas ātrums, nevis vidējais plūsmas ātrums, kā uzskata dažādi autori.
6. Pirmoreiz ir aprēķinātas vietējā un kritiskā ātruma izmaiņas nevienmērīgas plūsmas apstākļos; izskalošanās procesā vietējais ātrums samazinās izskalojumu bedres veidošanās dēļ, un vienlaikus pieaug ar caurplūdes pieaugumu; kritiskais ātrums pieaug plūdu pastiprināšanās laikā; izskalojums apstājas tad, kad vietējais un kritiskais ātrums kļūst vienādi.
7. Tika noskaidrots, ka laiks, kurā vienu plūdu gadījumā tiek sasniegts noteikts izskalojuma dziļums, ir atšķirīgs plūdiem ar dažādu hidrogrāfa slīpumu; izskalojuma attīstības intensitāte palielinās, pieaugot hidrogrāfa līknes pacēluma daļas slīpumam.
8. Pamatojoties uz reālu vairākkārtēju plūdu datormodelēšanu dažādos scenārijos, pirmoreiz tika noteikta vairākkārtēju plūdu varbūtības, ilguma, biežuma un secības ietekme uz izskalojuma veidošanos pie ūdens tehnoloģiju būvēm.
9. Tika noskaidrots, ka, samazinoties plūdu varbūtībai, palielinoties ilgumam un biežumam, un pie noteiktas plūdu secības ar dažādu varbūtību, izskalojuma dziļums pie ūdens tehnoloģiju būvēm palielinās.
10. Tika apstiprināts, ka pat liela plūdu (ar pieņemtu varbūtību) skaita gadījumā aprēķināto līdzsvara izskalojuma dziļumu nevar sasniegt un ka tikai neparedzēti plūdi var izraisīt ūdens tehnoloģiju būvju sabrukšanu vietējā izskalojuma dēļ.

GENERAL DESCRIPTION

Introduction — Topicality

The increase of unexpected and flash flood accidents in Europe in the past decade and information about environmental and economic losses caused by flooding confirm the impact of climate change on this phenomenon, and the necessity for predicting the possible damage. According to the European Environment Agency, during the period from 1998 to 2009 up to nine floods accidents were registered in separate regions in Europe, serving the evidence of multiple flood events. Water engineering structures (water intakes, effluent outflows or discharges, pipeline foundations etc.) as well as other hydraulic structures like bridge abutments, piers, dams and roads located in a floodplain area are under the impact of multiple floods.

In most accepted methods, discharge on the peak of the flood is used for computing equilibrium or temporal depth of scour, they are not restricted in time for the whole maintenance period of the structure or restricted in time for the temporal scour estimation; in field conditions, flow loads on water engineering structures are in the form of a hydrograph and the scour is formed by multiple floods with a different probability, duration, frequency, and sequence. These parameters are not accepted in modern methods or formulas, they do not allow for the computing of the depth of the scour formed in time, near water engineering structures during multiple floods, therefore predicting the development of scour depth before, during, or after the floods, proving the safety of the foundations, and taking the necessary protection measures.

The Aim and Tasks of the Research

The aim of this Doctoral Thesis is to work out a new method for the scour hole depth, width and volume evolution in time during multiple floods, and to estimate the influence of hydraulic and flow parameters on the depth of scour near water engineering structures under unsteady flow conditions.

To achieve the research aim, the following tasks have been defined:

1. To make an overview of the methods for calculation of the local scour under steady and unsteady flow conditions, to find out parameters used for evaluation of the scour depth at engineering structures in the river flow;
2. To develop a theoretical method for the local scour evolution during multiple floods;
3. To create a new program based on the developed method for the computer modeling of the local scour at engineering structures under unsteady flow conditions during multiple floods of different probability, duration, frequency and sequence;

4. To process experimental data in order to find the influence of different hydraulic flow parameters and time on the local scour parameters;
5. To analyze the changes in the local and critical velocity under unsteady flow conditions and the local and approach flow interaction and how it influences the scour hole evolution at structures;
6. To study the impact of the form of flood hydrograph on the scour evolution process;
7. To make a computer model of the real flow and to study the impact of multiple floods of different probability, duration, frequency and sequence on the scour process at water engineering structures.

Scientific Novelty and Application

A new method for computing the depth of scour formed in time near water engineering structures during multiple floods has been developed using the differential equation of equilibrium for the bed sediment movement under clear water conditions. The impact of multiple flood probability, duration, frequency and sequence on the scour evolution at the structures foundations has been established for the first time. It has been confirmed that the value of the scour depth is different for various multiple flood scenarios. A new theory has been proposed, which confirms that the interaction of changes in the local and critical velocities is significant in scour formation and that the local velocity rather than the approach flow has an influence on the local scour evolution at the structures. The influence of the hydrograph steepness at the time when the fixed scour depth is reached has been accepted.

Since the proposed method reflects the situation in nature, it can be used for predicting the development of scour depth before, during, or after the floods, proving the safety of the water engineering structures and taking necessary protection measures in due time. The method also allows modeling the scour development scenarios of forthcoming floods with different probability, duration, frequency, sequence, and flood hydrograph that can be used for evaluating whether the construction will be able to withstand the flood impact.

The suggested method can be used as part of an early warning system to evaluate the stability of structures in river flow by using the data from flood forecasting models and multi-sensor networks for the real-time and distributed monitoring of hydrological measurements.

Scope of the Doctoral Thesis

The Thesis consists of: Introduction, 5 Chapters, Conclusions, 2 Appendices, 121 references, 73 figures, 9 tables; its volume is 121 pages.

Chapter 1 provides the background information and literature review on local scour calculation methods under steady flow conditions and the scour development during unsteady flow conditions.

In Chapter 2 “Theory and Method of Scour Evaluation during Multiple Floods”, the new method for computing the development of scour depth in time at the water engineering structures during multiple floods is presented.

Chapter 3 “Experimental Data Processing and Comparison Results” includes a comparison of the previously published experimental data with the results of a calculation based on the method described in Chapter 2. Influence of the local, critical and approach flow velocities on the scour depth is studied by processing experimental data.

Chapter 4 “Computer Modeling Program” presents a new program for calculation and evaluation of time dependent scour development at the foundation of engineering structure in river flow during multiple floods with different duration, probability, frequency and sequence. The basic criteria adopted for the flood hydrographs to perform computer modeling and to investigate the impact of flood hydrographs shape and the influence of multiple floods of different scenarios on the scour process are included in this Chapter.

In Chapter 5 “Results of Computer Modeling”, the influence of the shape of flood hydrograph and the influence of the multiple floods of different probability, duration, frequency and sequence on the scour development in time are evaluated, and the results of computer modeling are presented by figures and described.

BACKGROUND AND LITERATURE REVIEW

During the past few decades, the equilibrium and temporal depth of scour have been studied, and new approaches have been elaborated by different authors. In most of them discharge on the peak of the flood is used for computing equilibrium or temporal depth of scour, they are not restricted in time for the whole maintenance period of the structure or restricted in time for the temporal scour estimation. Most of the methods described include the average approach flow velocity although local scour at constructions is formed by a flow with a velocity near it. Under field conditions, flow loads on water engineering structures are in the form of a hydrograph and the scour is formed by multiple floods.

Investigations dealing with time dependent scour studies at abutments under an unsteady flow are still limited. All the methods proposed are focused on the comparison of the maximum scour value, calculated using temporal scour methods or taking into account varying flow conditions according to the flood hydrograph. Despite the comparatively similar experimental tasks, decisions according to calculation results differ. The common conclusion

shared by the authors is that the scour depth calculated by simple methods and those including changes of flow conditions gives results with an insignificant difference; however, only approach flow characteristics have been used in all studies.

Literature review highlights the following conclusions:

- 1) Approach flow parameters are used for scour calculation under steady or unsteady flow conditions, although local flow modification as local velocity, vortex structures and increased turbulence form the scour hole;
- 2) The influence of the hydrograph steepness on the value of the depth, width and volume of the scour hole is not studied well in literature;
- 3) At present there are no formulae or methods found in literature for scour depth calculation during multiple floods;
- 4) A theoretical analysis of scour development during multiple floods with different probability, duration, sequence and frequency has been not found in literature.

THEORY AND METHOD OF SCOUR EVALUATION DURING MULTIPLE FLOODS

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

$$\frac{dw}{dt} = Q_s, \quad (1)$$

where t — time, d;
 w — volume, m³;
 Q_s — sediment discharge out of the scour hole, m³/d.

The left-hand part of (1) can be written as follows:

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

where h_s — scour depth, m;
 m — steepness of the scour hole;
 a — equal to $1/2\pi m^2$.

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

$$Q_s = AB \cdot V_l^4, \quad (3)$$

where Q — sediment discharge, m³/d;
 B — the width of a scour hole, equal to $m h_s$, m;
 V_l — the local velocity at the water engineering construction, m/s;
 A — a parameter in the Levi (1969) formula.

The parameter A depends on scour, local velocity, critical velocity and the grain size of the bed material. It must be taken into account that the local and critical velocities are changing within changes of scour depth in time and are determined by parameters V_{lt} — the local velocity at any depth of scour and V_{0t} — the critical velocity at any depth of scour.

Expressing (Eq.1) by (Eqs. 2-3), by substituting variables and integration, the value of parameter N_i can be found:

$$N_i = \frac{t_i}{4D_i h_f^2} + N_{i-1}, \quad (4)$$

where t_i — the time interval, d;
 D_i — a constant parameter in steady flow step;
 h_f — the depth of the floodplain, m.

Using the graph $N = f(x)$ for the calculated value of N_i , we find x_i and the depth of scour at the end of time interval:

$$h_s = 2h_f(x - 1). \quad (5)$$

This resulted in the method derived for the calculation of scour development during multiple floods. At first, flood scour starts from the moment when the floodplain is flooded. According to the method presented, the hydrograph of each subsequent flood wave is divided in time steps.

The steady flow condition is considered within the time step. The local velocity V_{lt} and the critical velocity V_{0t} are found at the start of the scour process. Because of the steady flow conditions taken into consideration, the value of local velocity V_{lt} is reducing and the value of critical velocity V_{0t} is increasing because of the scour within the time step. At the end of time step, values of local velocity $V_{lt \ I-1}$, critical velocity $V_{0t \ I-1}$ and the scour depth developed during the first step $h_{s \ I-1}$ can be found (where the Roman numeral in a subscript of variables indicates number of flood and the Arabic numeral indicates number of time step).

For the second time step, new values of local and critical velocities should be found because of the increased discharge and taking into account the scour depth $h_{s \ I-1}$ evolved in first step. The scour depth $h_{s \ I-2}$ is found at the end of the second time step and calculation continues for further steps.

For time steps in the rising limb of hydrograph, the local velocity leads to a reduction because of the scour and at the same time it increases because the depth of the flow, discharge and backwater value are increasing. The critical velocity is increasing in time from step to step of hydrograph because of the constant increase of the average depth of the flow, including the depth of scour.

At the recession limb, the local velocity is considerably reducing from step to step because of the flood at the same time, the critical velocity is reducing. The scour stops at some point of recession limb of hydrograph X_{I-2} , when the local velocity $V_{lt \ I-n}$ becomes equal

to the critical one $V_{0t I-n}$, and the scour depth $h_{s I}$ reached during the first flood wave can be found (Fig. 1).

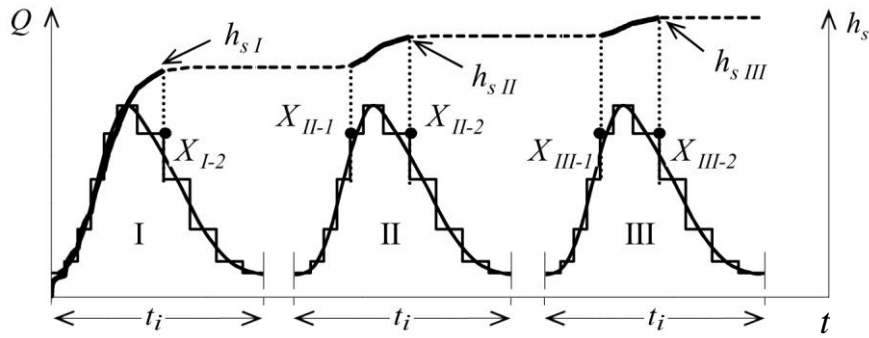


Fig. 1. Scour evolution during multiple floods; I, II and III are a number of floods.

Taking into account the scour depth $h_{s I}$ reached in the first flood, the new values of $V_{lt II}$ and $V_{0t II}$ are found for the first time step of the second flood hydrograph.

$$V_{lt II} = \frac{V_{l II}}{k \left(1 + \frac{h_{s I}}{2h_{f II}} \right)}, \quad (6)$$

where $V_{lt II}$ — local velocity at the depth of the scour hole $h_{s I}$, m/s;
 $V_{l II}$ — local velocity of the second flood, with the flat river bed supposed, m/s;
 $h_{s I}$ — scour depth developed during the first flood, m;
 $h_{f II}$ — depth of the floodplain of the second flood, m,

and

$$V_{0t II} = 3.6d^{0.25} \cdot h_{f II}^{0.25} \left(1 + \frac{h_{s I}}{2h_{f II}} \right)^{0.25}, \quad (7)$$

where $V_{0t II}$ — critical velocity at the depth of the scour hole $h_{s I}$, m/s.

The calculation is continued for each time step while the condition when the local velocity $V_{lt II}$ is higher than the critical one $V_{0t II}$ is found and the scour starts (point X_{II-1} , Fig. 1).

Because of the scour that evolved during the previous flood, the scour process starts only at the sufficient flood discharge when the local velocity is higher than the critical one. According to the method presented, the scour depth achieved during the second flood $h_{s II}$ is found. The scour stops at the point of the recession limb of hydrograph X_{II-2} , when the local velocity $V_{lt II-n}$ becomes equal to the critical one $V_{0t II-n}$.

For the third flood, the scour depth that developed during the second flood $h_{s, II}$ is taken into account and the new values of the local and critical velocities found, while $V_{lt, II-n} > V_{0t, II-n}$. The scour starts at some point X_{III-1} of the rising limb of hydrograph and stops on recession limb at some point X_{III-2} when condition $V_{lt, II-n} = V_{0t, II-n}$ is reached.

EXPERIMENTAL DATA PROCESSING AND COMPARISON RESULTS

The test results have been processed by using previously published experimental data. The tests have been carried out in a 3.5 m wide and 21 m long flume. Experimental data obtained in the flumes under open flow conditions, as well as experimental data for steady and unsteady flow conditions are presented in Chapter 3 of the Doctoral Thesis. The condition that $Fr_R = Fr_f$ has been fulfilled in tests, where Fr_R and Fr_f are the Froude numbers for the plain river and for the flume, respectively.

Comparison of Test and Calculated Results of Scour under Steady Flow Conditions

Data processing of the test results for steady flow conditions has been made and the following processes studied and presented by figures: changes in the local velocity V_{lt} and critical velocity βV_{0t} ; evolution of scour depth h_s , width B and volume w in time; changes of the relative local velocity V_{lt}/V_l and the relative critical velocity V_{0t}/V_0 in time; the scour development during tests with different discharge; the influence of the duration on the scour depth under steady flow conditions by extending the duration of the flow impact from 7 hours used in tests to 28 hours.

Results of the above-mentioned studies confirm the observed main facts, i. e., a higher scour depth is reached due to a higher discharge, with less sediment size and by longer flow impact. At the same time, the results have shown changes in critical and local velocities and relative depth of scour in time; therefore, it can be confirmed that the local scour process at the foundations of engineering structures is connected to continuous changes of the flow and river bed parameters.

The achieved results describe the changes of important parameters: h_s , V_{lt} , V_{0t} , V_{lt} / V_l and V_{0t} / V_0 used for scour depth calculation under steady flow conditions. However, in nature, a flood is in the form of a hydrograph; therefore, it is more important to study the scour process under unsteady flow conditions.

Comparison of Test and Calculated Results of Scour under Unsteady Flow Conditions

Duration t was 7 hours at each stage or 14 hours for the whole test under unsteady flow conditions. The discharge at the first and second stage of the hydrograph increased, as

well as the Froude number of the flow at open flow conditions and the local Froude number increased.

In Fig. 2 scour depth (left graph) as well as changes of local and critical velocities in time (right graph) under unsteady flow conditions are presented. For unsteady flow conditions the depth, width and volume of the scour hole at the initial stage — during the first step — develops similarly as under steady flow conditions. However, when the discharge increases for the next step of unsteady flow, the intensity of the scour development also increases (left graph of Fig. 2).

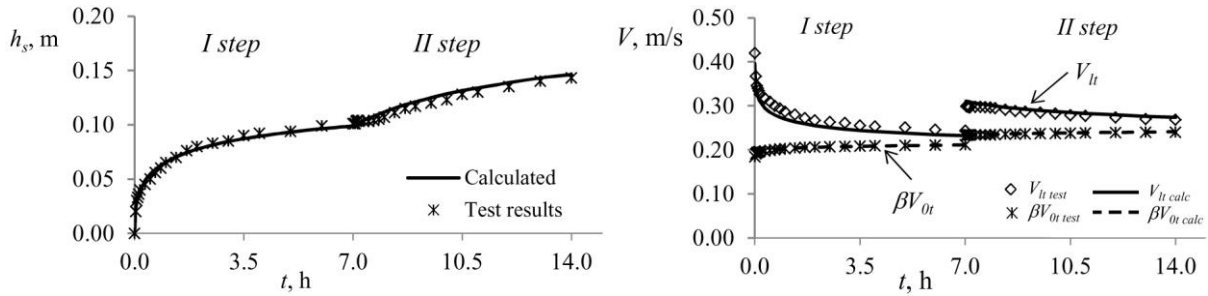


Fig. 2. Scour development in time (left side) and the changes of local and critical velocities in time (right side) under unsteady flow conditions (test TL1).

The local velocity V_{lt} gradually reduces in time at the first step because of the developed scour hole (right graph of Fig. 2). At the beginning of the second step, the local velocity increases because of the higher discharge value used for the second step, but also it takes into account the influence of the scour hole formed in the first step. During the second step, the local velocity reduces again because of the scour hole formed in this period.

At the same time, the critical velocity V_{0t} tends to increase during scour development under unsteady flow conditions. The critical velocity gradually increases in the first or second step because of the increased depth of scour. At the beginning of the second step, the critical velocity rises rapidly because of the rapid increase of the depth on the floodplain and the scour depth developed in the previous step (right graph of Fig. 2).

The values of the local and critical velocities tend to approach one other. The intensity of scour development is higher for the higher ratio between local and critical velocities. There are two simultaneous processes during the scour that affect local velocity changes in time under unsteady flow conditions. On the one hand, the local velocity V_{lt} is reducing because of the developed scour hole; on the other hand, it is increasing because of the increasing discharge during floods. The critical velocity is increasing because of an increase in the depth of scour and the increasing discharge during floods.

The dependence of the changes in the relative depth of scour h_s/h_f in time on the ratios $\beta V_{0t}/V_{lt}$, V_{lt}/V_l and V_{0t}/V_0 is presented in the Doctoral Thesis.

Influence of the Local, Critical and Approach Velocities on the Scour Depth

It has been found that the ratio V_l/V_{ap} (local to approach velocity) is dependent on the Froude number of the flow (Fig. 3). With an increased Froude number, the difference between local and approach velocity of the flow is decreasing.

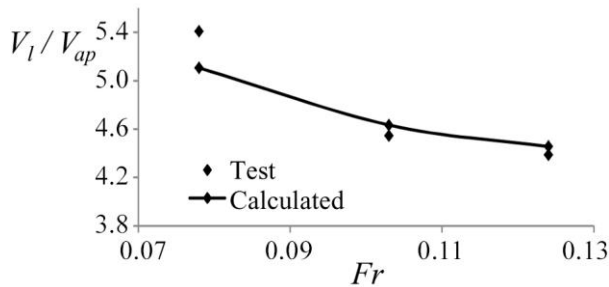


Fig. 3. Ratio of the local to approach flow velocity V_l/V_{ap} versus Froude number (Tests AL 4,5,6).

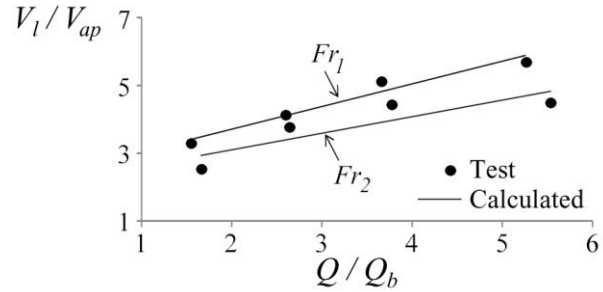


Fig. 4. Ratio of the local to approach flow velocity versus contraction rate of the flow.

The ratio V_l/V_{ap} (local to approach velocity) is dependent on the contraction rate of the flow (Fig. 4). With an increased contraction rate, the difference between local and approach velocity of the flow increases.

The research on the test results described in this chapter has confirmed the influence of the local velocity on the local scour evolution at the structures, rather than the influence of the approach flow velocity as it is accepted now by different authors.

RESULTS OF COMPUTER MODELING

The computer modeling of the time-dependent scour during a single flood with different shape of a hydrograph or during multiple floods with different probability, duration, frequency and sequence has been performed. Initial data of flow parameters used for flood time steps are presented in Appendix I of the Doctoral Thesis. In this Chapter, the results are presented for the one sediment size, but investigation is made on four different sizes $d_i = 0.24$ mm, 0.59 mm, 0.67 mm and 1.0 mm, and figures of comparison results are presented in Appendix I of the Doctoral Thesis.

The Influence of the Steepness of Flood Hydrograph

The computer modeling of the time-dependent scour during floods with different shapes of a hydrograph have been performed. The shape of the hydrograph has been changed by time of the rising and recession parts of the flood. Two types of the hydrograph shape have been studied (Fig. 5).

For the first type of hydrograph, the rising time of the flood has the same value, but the flood duration t_i is different because of an increase in recession time. The ratios between the time of rising and recession parts of the hydrograph are: 1:2, 1:3, 1:4, 1:6 and 1:8 (left model in Fig. 5).

For the second type (right model in Fig. 5), the duration of the flood is the same. The ratios between the time of the rising and recession parts of the flood are different, for example, 1:2, 1:3, 1:4, 1:6 and 1:8, where the first and second numbers are the rising and recession time periods of the flood.

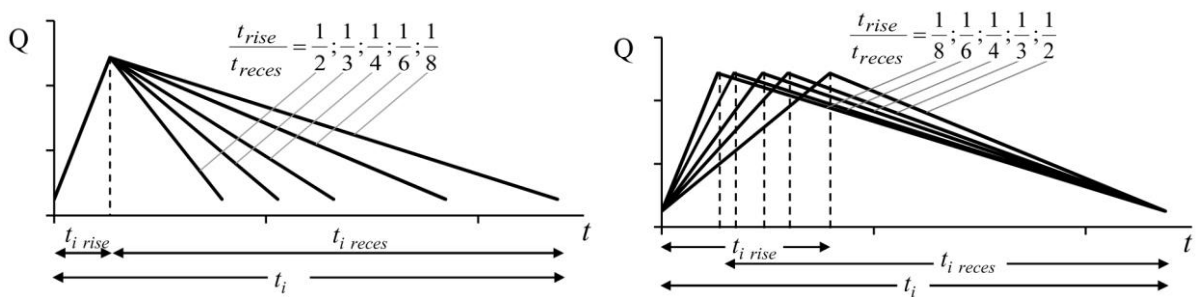


Fig. 5. Hydrographs with constant time of rising part of the flood (left model) and hydrographs with equal duration, but different time ratio between the rising and recession parts of the flood (right model).

Investigation of the first type of the hydrograph (left model in Fig. 5) confirmed that the higher the recession time of floods, the greater their duration, and the greater the scour depth (Fig. 6).

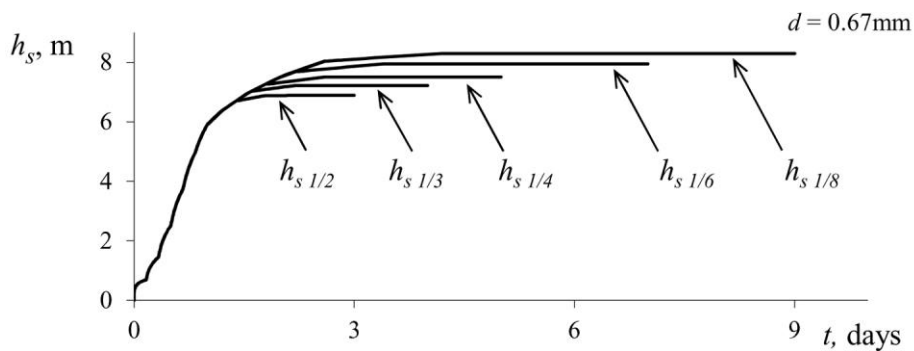


Fig. 6. Scour development with time for triangle-shaped hydrographs at constant time of the rising part.

It has been found that even during the reduction of flood discharge the removal of sediments from scour-hole continues, but only while the local velocity is higher than critical velocity multiplied by a reduction coefficient.

The second type (left model in Fig. 5) of the hydrograph model indicates that the influence of its shape on the scour depth reached during flood is small, but the scour process

is different at the initial stage (Fig. 7). After an equal period of time t_i at the beginning of the flood, the depth of scour is not the same for different hydrograph shapes. The shorter the time of the rising part of the floods, the greater the depth of scour. According to the calculation results, the scour depth develops more intensively during the floods with a higher slope of the rising limb of hydrograph. The time when the maximum depth h_s is reached, varies for different shapes of the hydrograph. The shorter the time of the rising part of the floods, the faster the maximum scour depth is reached.

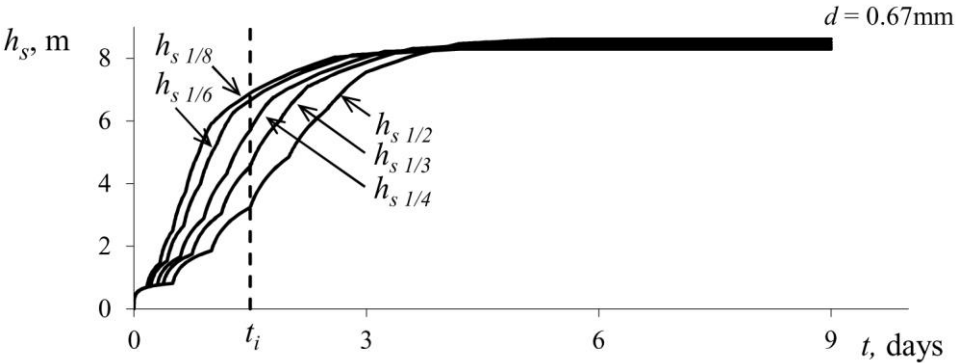


Fig. 7. Scour development for floods with an equal duration and a different ratio between the rising and recession parts of hydrograph.

The Influence of Multiple Flood Probability

The influence of probability on scour development during multiple floods has been evaluated. Two series of floods with similar duration and hydrograph shape have been used; however, the discharge of multiple floods has been changed for each model (Fig. 8).

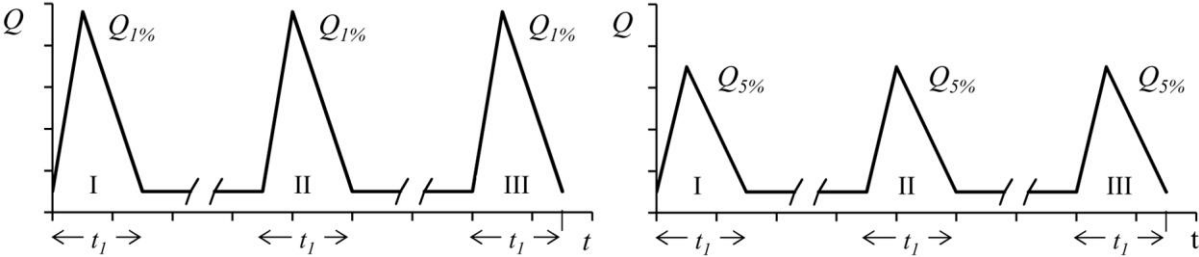


Fig. 8. Multiple floods with discharge of 1 % probability and 5 % probability.

The scour evolution process and changes in local and critical velocities during multiple floods of 5 % probability and 7-day duration is presented in Fig. 9. The grey lines display changes in the local (dashed line) and critical (continuous line) velocities. The black line displays the scour evolution process during multiple floods. As can be seen from Fig. 9, scour develops (black continuous line h_s) when the local velocity exceeds the critical one, and the depth of the scour hole remains the same (black dashed line h_s) when the local velocity V_{lt}

is equal or less than the critical velocity βV_{0r} . The intensity of sediment discharge out of the scour hole reduces with each flood and depends on the relation of the local velocity and critical velocity.

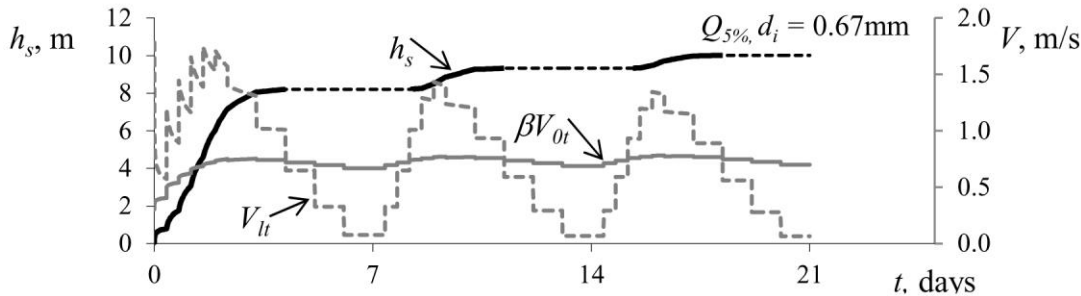


Fig. 9. Joined chart of scour development and velocity changes during multiple floods of 5 % probability.

The influence of multiple flood probability on local scour development has been evaluated using two series of floods with similar duration and hydrograph shape but with different discharge. The discharge of the first flood series has been used according to 5 % probability, and the processes of scour development and velocity changes are described. The discharge of the second series of multiple floods has been used according to 1 % probability. The scour depth has been found for each series of floods. The results have been compared and it has been found that the scour depth is greater for the flood series of lower probability (Fig. 10). It has been found that the intensity of scour development within each flood remains higher for flood series of lower probability.

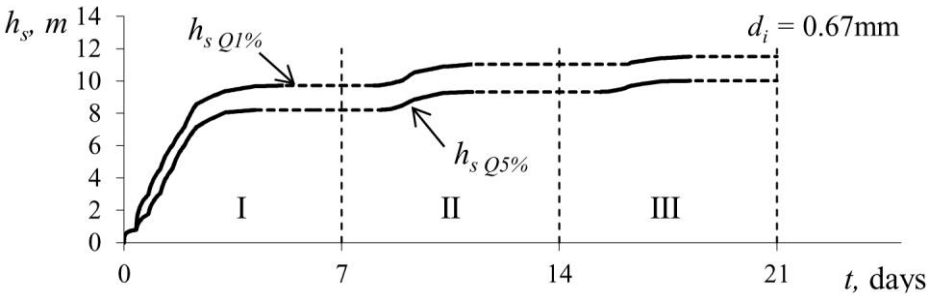


Fig. 10. Scour development during a series of three floods with different probability.

The Influence of Multiple Flood Duration

The influence of multiple flood duration has been studied for a model of multiple flood series. Two series of foods with the same discharge and time ratio between rising and recession parts of hydrograph have been used, but with different durations (Fig. 11).

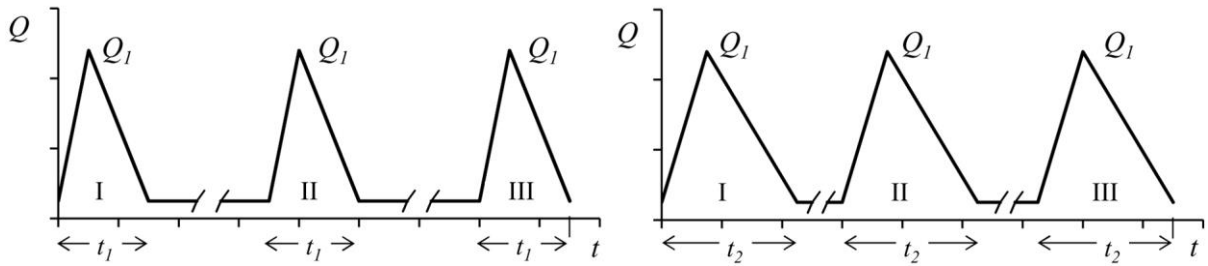


Fig. 11. Flood series with the same discharge and time ratio between rising and recession parts of hydrographs, but with different durations.

The time-dependent scour development and changes in the local and critical velocities in a series of three floods with similar discharge, hydrograph shape and duration $t = 14$ days (right-side model in Fig. 11) are illustrated in Fig. 12. The local and critical velocities are shown by the grey lines, and the black lines describe the scour process. During multiple floods the scour develops when the value of local velocity V_{lt} exceeds the value of critical velocity βV_{0i} ; scour hole develops intensely during the first flood, but the continuation of scour development proceeds only in an area around the peak discharge of the following floods.

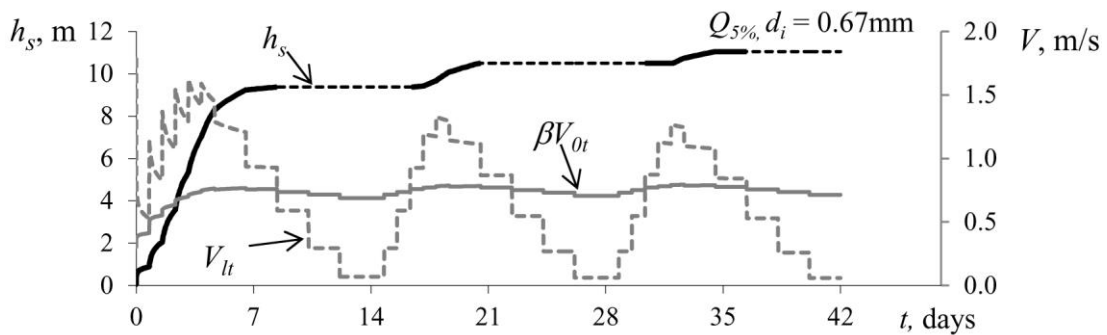


Fig. 12. Joined chart of scour development and changes in velocities.

The scour development and the depth of scour during multiple floods of 7-day and 14-day duration according to the model presented in Fig. 11 have been compared. It can be seen that the greater duration of the floods in the series, the deeper the scour depth (Fig. 13).

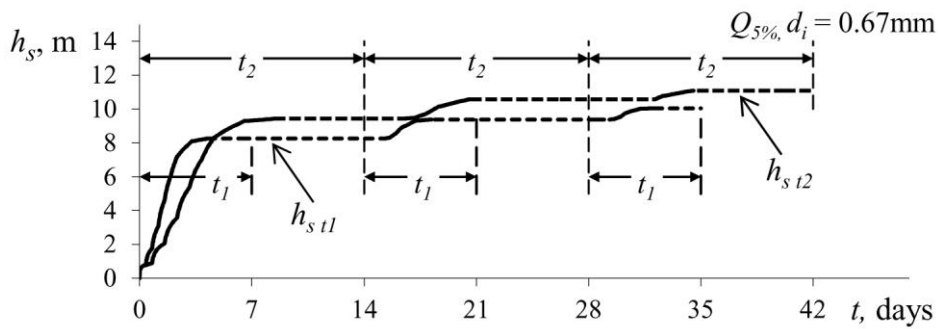


Fig. 13. Scour depth for three following floods with 7-day or 14-day duration.

The Influence of Multiple Flood Frequency

Multiple floods with different frequency have been modeled. The period of multiple floods is assumed to be similar; however, the number of floods is changed during this time (Fig. 14). Two, three and four floods have been modeled during the equal period of multiple floods.

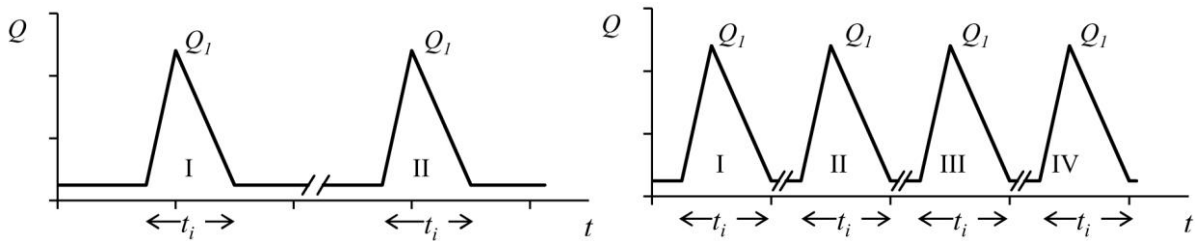


Fig. 14. Multiple floods with different frequency; example of two and four floods is presented on the left and right sides, respectively, during a similar period of multiple floods.

To investigate the influence of the flood frequency on the scour development in time, a period of, for example, 5 years has been chosen and assumed that during this period two or four floods of the same probability, duration and the shape of hydrograph have occurred. The model of the series of two floods with 7-day duration has been chosen and supplemented by two additional flood events. According to the assumption that scour depth remains the same between floods, the scour development can be described by one chart of time-dependent changes in the depth of scour for the series of four floods (Fig. 15).

The scour development intensity and additional depth of scour hole reduce with each subsequent flood. It can be explained by the reduction of difference in the local velocity V_{lt} and the critical velocity βV_{0t} in the period when the local velocity is higher than the critical one (Fig. 16). In other words, the scour intensity reduces when the ratio $V_{lt}/\beta V_{0t}$ approaches 1.

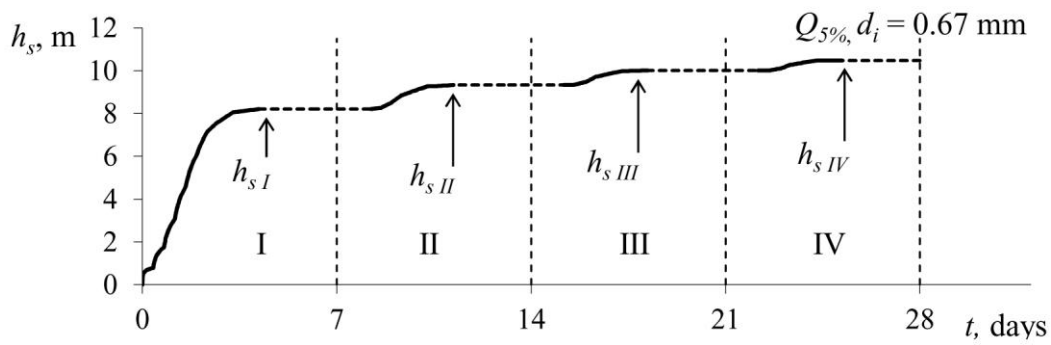


Fig. 15. Scour development in time for floods with different frequencies; h_{sI} to h_{sIV} are scour depths reached after the first to the fourth flood, respectively.

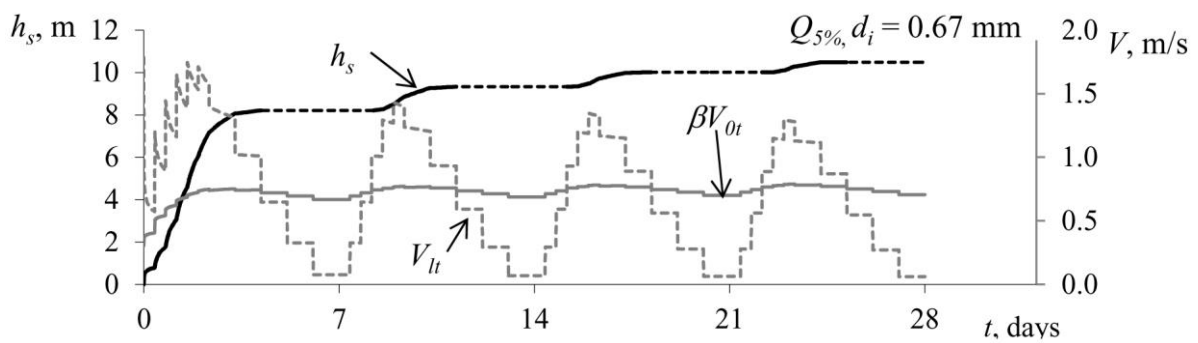


Fig. 16. Joined chart of scour development and changes in velocity for a series of four floods.

It is obvious that an increase in the frequency of the floods is accompanied by an increase in the scour depth, and it follows from Figs. 15 and 16 that the scour depth after two floods h_{sII} at an accepted period of time is less than that h_{sIII} after three floods occurred during the same period, $h_{sIV} > h_{sIII}$ etc. After every flood, the depths of scour are summed up, and they tend to reach towards the value of the equilibrium depth.

The scour evolution of the four subsequent floods (probability of 5 %, duration of 7 days, $d_i = 0.67$ mm) is presented in Fig. 16. The equilibrium depth calculated for one flood with the aforementioned parameters is 18.2 m (Neilands, 2008). As intensity of the sediment removal decreases with each forthcoming flood, the possibility to achieve the equilibrium depth by the series of floods of the accepted probability seems to be only theoretical. It is because a large number of floods with same probability and duration should follow in order for the developed scour depth to reach the calculated equilibrium depth.

The Influence of Multiple Flood Sequence

The influence of the sequence of floods with a different probability on the time-dependent scour development has been examined according to three scenarios (Fig. 17). Model 1 shows a scheme of three floods of the same probability. The high flood followed by

two lower floods in model 2 and two floods with higher probability are followed by the flood with less probability in model 3 of Fig. 17.

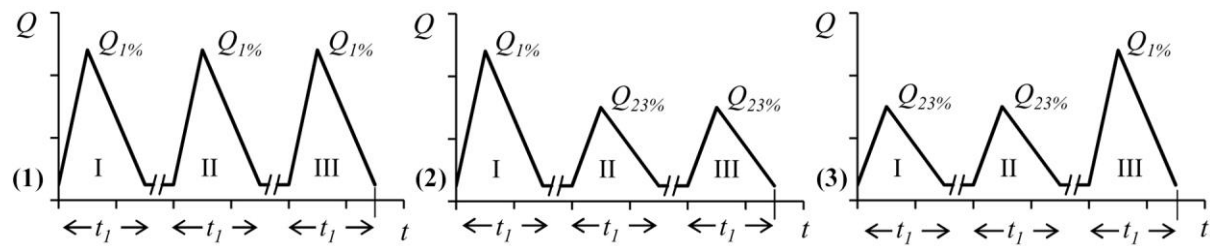


Fig. 17. Multiple flood series with three floods of the same probability (1) and with different sequence of floods (2, 3).

The scour development for the scenario described in Fig. 17-1 presents curve 1 in Fig. 18. The scour starts when the floodplain is flooded and increases rapidly. Because of the scour hole developed during the first flood, in the second flood, the scour process starts at the step of hydrograph when $V_{lt II} \geq \beta V_{0r II}$ and has less duration, while for the third flood the velocities change due to the scour developed after the two previous floods, and it begins at $V_{lt III} \geq \beta V_{0r III}$ (Fig. 18, curve 1).

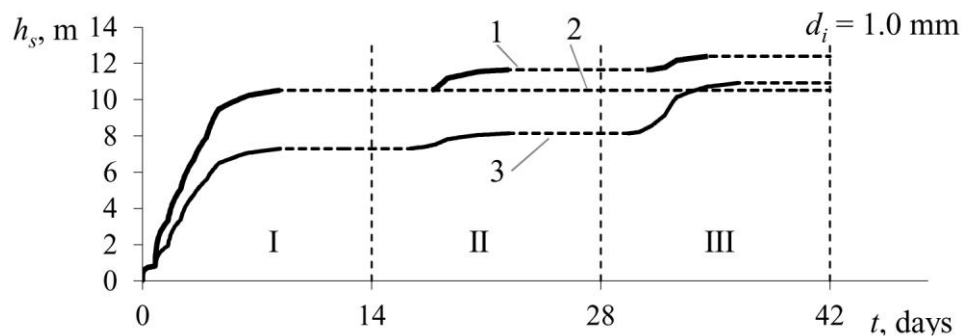


Fig. 18. Scour development in time for floods of different sequences.

The curve 2 in Fig. 18 shows the scour process of a multiple flood sequence scenario when the high flood is followed by two lower floods (Model 2 in Fig. 17). Figure 19 presents a scour evolution curve joined with curves of the local and critical velocities. As it can be seen from Fig. 19, the scour depth develops during the first flood and remains the same. There is no change in the depth of the scour hole during two forthcoming floods.

An explanation of it can be described by a chart of changes in the local and critical velocities (Fig. 19). The local velocity V_{lt} reduces, but the critical velocity V_{0r} increases because of the scour depth developed during the previous flood. In the next flood, the capacity of the flow is not sufficient enough to remove sediments out of the scour hole, and

V_{lt} is less than βV_{0t} . In the second and third floods, the scour depth remains the same, as after the first flood (Fig. 19).

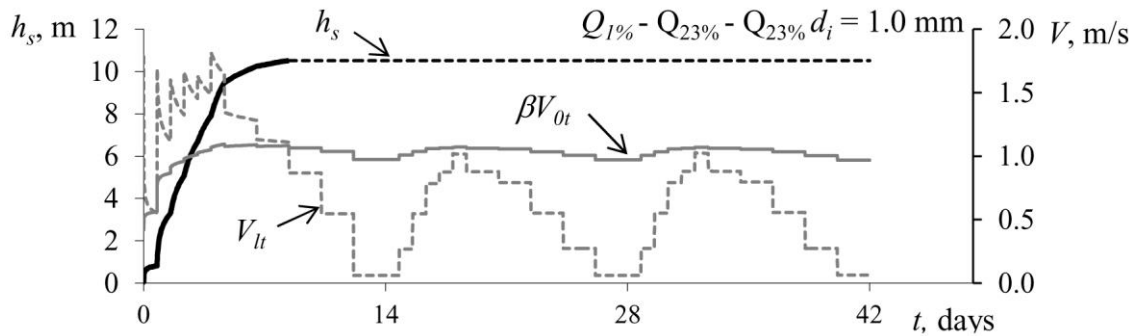


Fig. 19. Scour development and changes in local and critical velocities for a series of floods when the high flood is followed by two lower floods.

Curve 3 in Fig. 18 shows the scour process of a multiple flood sequence scenario when two floods with higher probability are followed by the flood with less probability. Scour develops according to the changes in the local and critical velocities (Fig. 20). It starts and develops rapidly during the first flood. In the second flood, the scour process starts at the step of the hydrograph when $V_{lt II} \geq \beta V_{0t II}$ and has less duration. In the third flood, the scour starts at the step of hydrograph when $V_{lt} \geq \beta V_{0t}$ and develops rapidly due to the discharge of the flow, which is much higher than during the previous two floods (Fig. 20). The intensity of scour development is well presented by the area surrounded by the curves of the local velocity and critical velocity in this figure. The higher the local velocity V_{lt} is compared to the critical one βV_{0t} , the more intense scour development is.

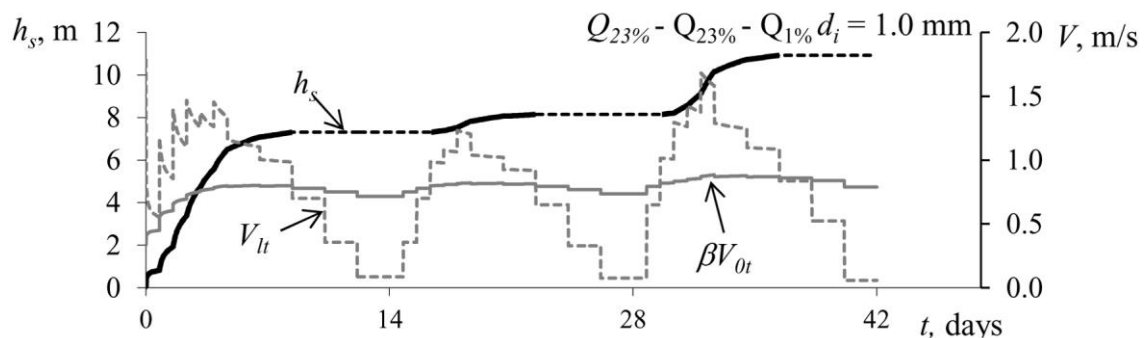


Fig. 20. Scour development and changes in local and critical velocities for a series of floods when two lower floods are followed by the high flood.

CONCLUSIONS

1. The survey of literature has demonstrated that at present there is no method for scour calculation at water engineering structures in river flow that takes into account the influence of multiple floods during the period of exploitation.

2. A differential equation of the bed sediment movement has been used and a new theoretical method has been developed for computing scour depth, width and volume at engineering structures in river flow under unsteady flow conditions.
3. Based on the developed method for the computer modeling of the local scour at engineering structures under unsteady flow conditions, a computer program has been created allowing one to evaluate the changes of the scour depth during multiple floods of different scenarios.
4. Processing of the experimental data shows the influence of the contraction rate of the flow and its depth, Froude number, approach flow velocity and different ratios of the local and critical velocities $\beta V_{0t}/V_{lt}$, V_0/V_{0t} , V_t/V_{lt} on the local scour evolution and it corresponds with the calculated results.
5. The comparison graphs of the local and approach velocities at different rates of the flow contraction and Froude numbers confirm that the local velocity depends on the flow contraction rate and the maximum backwater value and is several times higher than the approach velocity in the flume; with an increased Froude number and with a decreased contraction rate, the difference between local and approach velocity of the flow is decreasing. The local velocity forms a scour hole, rather than the approach flow as it is accepted by different authors.
6. For the first time, the relative local and critical velocity changes under unsteady flow conditions are described and calculated; in the scour process the local velocity decreases due to the formation of the scour hole and at the same time increases with the growth of the discharge; the critical velocity increases during flood intensification; erosion stops when the local velocity and the critical velocity becomes equal.
7. It has been found that the time when maximum scour is reached during a single wave flood differs for hydrographs of various steepness; the intensity of scour evolution increases by the increase of the slope of the hydrograph raised part.
8. The effect of multiple flood probability, duration, frequency and sequence on the scour at water engineering structures in flow is established for the first time, based on the results of the computer modeling for a real recurrent flood in different scenarios.
9. It has been found that with less probability, increased duration and frequency of the floods, and certain sequences of different probability, the scour depth at the foundations of water engineering structures increases.
10. It has been confirmed that even with a high frequency of floods of accepted probability the equilibrium depth of scour cannot be reached and only unexpected flood event can be the source of failure of water engineering structures caused by local scour.

PUBLIKĀCIJU SARAKSTS / LIST OF PUBLICATIONS

1. Gjonsburgs B., Neilands R., Bārdiņš A., Jaudzems G. Flood Damage Risk Assessment for Hydraulic Structures in River Floodplain // Eleventh International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering, Maķedonija, Ohrid, 1.–5. septembris, 2009. Ohrid: University Ss. Cyril and Methodius, Faculty of Civil Engineering, 2009, 47.–57. lpp.
2. Gjonsburgs B., Jaudzems G., Govša J. Influence of the Flow and Bed Parameters on the Scour at Bridge Structures // Proc. from First IAHR European Congress, Lielbritānija, Edinburgh, 4.–6. maijs, 2010. Edinburgh: Heriot-Watt University-School of the Built Environment, 2010, 53.–58. lpp.
3. Gjonsburgs B., Jaudzems G., Govša J. Assessment of Flood Damage Risk for Abutments in River Floodplains // Proc. of the International Conference on Fluvial Hydraulics River Flow 2010, Vācija, Braunschweig, 8.–10. septembris, 2010. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau, Federal Waterways Engineering and Research Institute, 2010, 1185.–1192. lpp.
4. Gjonsburgs B., Jaudzems G., Govša J. Scour at Elliptical Guide Banks under Stratified Bed Conditions: Equilibrium Stage // International Scientific Conference People, Buildings and Environment 2010, Čehija, Krtiny, 10.–12. novembris, 2010. Brno: Akademické Nakladatelství Cerm, 2010, 24.–30. lpp.
5. Gjonsburgs B., Jaudzems G., Govša J. Hydrograph Shape Impact on the Scour Development with Time at Engineering Structures in River Flow // RTU Zinātniskie raksti. Construction Science. Nr. 11, 2010, 6.–12. lpp.
6. Gjonsburgs B., Jaudzems G., Govša J. Flood Duration and Hydrograph Shape Impact on Scour near Hydraulic Structures // Current Events in Hydraulic Engineering, Polija, Gdansk, 5.–8. septembris, 2011. Gdansk: Gdansk University of Technology Publishers, 2011, 143.–149. lpp.
7. Gjonsburgs B., Jaudzems G., Govša J. Multiple Floods Impact on Scour at Engineering Structures // Proc. of 6th International Conference on Scour and Erosion, Francija, Paris, 27.–31. augusts, 2012. Paris: Societe Hydrotechnique de France, 2012, 747.–754. lpp.
8. Jaudzems G., Govša J., Gjonsburgs B. Multiple Flood as the Cause of Failure of Engineering Structures in River Flows // Proc. of International Scientific Conference People, Buildings and Environment 2012, Čehija, Lednice, 7.–9. novembris, 2012. Brno: Brno University of Technology, 2012, 548.–557. lpp.
9. Gjonsburgs B., Govša J., Jaudzems G. Influence of the River Bed Stratification on Scour at Foundations // Proc. of the 35th IAHR World Congress, Ķīna, Chengdu, 8.–13. septembris, 2013. Chengdu: IAHR, Ministry of WR China, 2013, 1.–9. lpp.
10. Gjonsburgs B., Jaudzems G., Govša J. Elliptical Guide Banks Scour: Equilibrium Stage // Rural Development 2013: The Sixth International Scientific Conference Proc., Lietuva, Kaunas, 28.–29. novembris, 2013. Kaunas: Aleksandras Stulginskis University Akademija, Kaunas district, Lithuania, 2013, 256.–264. lpp.
11. Gjonsburgs B., Govša J., Jaudzems G. Riverbed Layering Impact on Scour at the Abutments // 7th Int. Conference on Fluvial Hydraulics, RIVER FLOW 2014, Šveice, Lausanne, 3.–5. septembris, 2014. London: CRC Press/Balkema, 2014, 1463.–1468. lpp.
12. Jaudzems G., Gjonsburgs B. Scour, Local and Critical Velocities at the Abutments on Plain Rivers // Proc. of International Scientific Conference People, Buildings and Environment 2014, Čehija, Kroměříž, 15.–17. oktobris, 2014. Brno: 2014, 245.–252. lpp.