Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo

PODIPLOMSKI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA

DOKTORSKI ŠTUDIJ

Kandidatka:

TANJA PREŠEREN, univ. dipl. inž. grad.

VPLIV TOKOVNEGA POLJA NA UČINKOVITOST USEDANJA TRDNIH DELCEV V USEDALNIKU S KONTINUIRNIM DELOVANJEM

Doktorska disertacija štev.: 240

INFLUENCE OF FLOW FIELD ON SEDIMENTATION EFFICIENCY IN A SETTLING TANK WITH CONTINUOUS OPERATION

Doctoral thesis No.: 240

Soglasje k temi doktorske disertacije je dala Komisija za doktorski študij UL
na 18. redni seji 8. junija 2011.

Za mentorja je bil imenovan prof. dr. Franc Steinman, za somentorja
doc. dr. Tom Bajcar, UL FGG in UL FS.

Ljubljana, 18. junij 2014

Ta stran je namenoma prazna.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo

Komisijo za oceno ustreznosti teme doktorske disertacije v sestavi:

- prof. dr. Franc Steinman,
- doc. dr. Tom Bajcar, UL FGG in UL FS,
- izr. prof. Jože Panjan,
- prof. dr. Brane Širok, UL FS,
- izr. prof. dr. Roman Klasinc, TU Graz, upok.,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 20. redni seji 20. aprila 2011.

Poročevalce za oceno doktorske disertacije v sestavi:

- izr. prof. dr. Jože Panjan,
- izr. prof. dr. Roman Klasinc , TU Graz, upok.,
- prof. dr. Matjaž Četina,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 7. redni seji 29. januarja 2014.

Komisijo za zagovor doktorske disertacije v sestavi:

- prof. dr. Matjaž Mikoš, dekan UL FGG, predsednik,
- prof. dr. Franc Steinman, mentor,
- doc. dr. Tom Bajcar, UL FGG in UL FS, somentor,
- izr. prof. dr. Jože Panjan,
- izr. prof. dr. Roman Klasinc , TU Graz, upok.,
- prof. dr. Matjaž Četina,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 11. seji 28. maja 2014.

Ta stran je namenoma prazna.

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana **TANJA PREŠEREN**, univ. dipl. inž. grad., izjavljam, da sem avtorica doktorske disertacije z naslovom **VPLIV TOKOVNEGA POLJA NA UČINKOVITOST USEDANJA TRDNIH DELCEV V USEDALNIKU S KONTINUIRNIM DELOVANJEM**.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 18. junij 2014 …….
(podpis)

Ta stran je namenoma prazna.

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK	**532:004.42(043.3)**
Avtor	**Tanja Prešeren, univ. dipl. inž. grad.**
Mentor	**redni profesor dr. Franci Steinman**
Somentor	**docent dr. Tom Bajcar**
Naslov	**Vpliv tokovnega polja na učinkovitost usedanja trdnih delcev v usedalniku s kontinuirnim delovanjem**
Tip dokumenta	**doktorska disertacija**
Obseg in oprema	**111 str., 22 pregl., 32 sl., 71 graf., 94 en., 9 pril.**
Ključne besede	**naknadni usedalnik, Froudovo densimetrično število, gostotni tokovi, kontinuirno delovanje, čiščenje odpadnih voda, učinkovitost, suspenzija, velikost delca, računalniško podprta vizualizacija toka**

Izvleček

Na modelu naknadnega krožnega usedalnika disertacija obravnava tipične tokovne strukture, ki se vzpostavijo pri dvanajstih različnih kombinacijah hidravlične obremenitve in koncentracije suspenzije na vtoku. Poleg že omenjenih so bili spremenljiv parameter tudi trdni delci, ki so služili kot suspendirana snov. Prva skupina uporabljenih delcev je bila mleta lešnikova lupina, ki je bila na voljo v dveh sestavih glede na strukturo velikosti zrn; drugo skupino so zastopali stekleni delci v treh različnih granulacijah. Trije kontrolni poskusi so se izvedli pri gostotno nevtralnih pogojih z vnosom barvila.

Vsi poskusi so bili snemani z digitalno kamero, iz posnetkov je bil s fotogrametričnim pristopom v vtočnem jašku in v neposredni bližini iztoka določen indikator koncentracije v suspenziji, s pomočjo računalniško podprte vizualizacije pa so bili pridobljeni podatki o tokovnem polju. Pri ponovitvi prve serije poskusov se je izvajalo še vzorčenje suspenzije na vtoku in iztoku.

Velik nabor eksperimentov s skrbno izbranimi parametri je omogočal sistematično obravnavo hidrodinamičnih fenomenov v usedalni komori. Ugotovilo se je, da sta tokovno polje in učinkovitost usedanja trdnih delcev tesno povezana z vrednostjo Froudovega densimetričnega števila Fr_d. Pri vseh poskusih je bil opažen trend naraščanja učinkovitosti s padanjem vrednosti Fr_d. Pri največjih izmed steklenih mikrokroglic in grobo mlete lešnikove lupine se troslojni tok ni pojavil; pri ostalih delcih pa je nizka vrednost Fr_d pogojevala vzpostavitev ugodne troslojne tokovne strukture, pri čemer je bila mejna vrednost Fr_d, nad katero se troslojni tok ne oblikuje več, neodvisna od tipa in velikosti delcev.

BIBLIOGRAPHIC-DOKUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC	**532:004.42(043.3)**
Author	**Tanja Prešeren, B.Sc.**
Supervisor	**Professor Franci Steinman, Ph.D.**
Co-advisor	**Assistant Professor Tom Bajcar, Ph.D.**
Title	**Influence of Flow Field on Sedimentation Efficiency in a Settling Tank with Continuous Operation**
Document type	**Doctoral Dissertation**
Notes	**111 p., 22 tab., 32 fig., 71 graph., 94 eq., 9 app.**
Key words	**secondary settling tank, densimetric Froude number, density currents, continuous operation, wastewater treatment, efficiency, suspension, particle size, computer-aided flow visualization**

Abstract

On a model of a circular secondary settling tank the dissertation deals with typical flow structures that establish at twelve different combinations of hydraulic and solids loading. Another variable parameter beside the already mentioned were also solid particles that served as suspended matter. The first group of used particles was fine ground hazelnut shell that was available in two different compositions of grain size; the second group were glass microbeads in three different granulations. Three control experiments were conducted at neutral density conditions by introducing a dye.

All experiments were filmed with a digital camera. By processing video clips of experiments an indicator of concentration in the inflow and in the vicinity of the effluent was captured by photogrammetric approach and data on flow field was obtained by computer-aided flow visualization. A repetition of the first series was carried out in order to collect samples of inflow and outflow suspension.

A wide set of experiments with carefully chosen parameters enabled a systematic study of hydrodynamic phenomena in the sedimentation chamber. Flow field and clarification efficiency were found out to be closely related to the value of the densimetric Froude number Fr_d. All experiments exhibited trends of growing efficiency when values of the densimetric Froude number Fr_d were decreasing. A three-layer flow structure never occurred when the biggest particle granulation from glass microspheres and when coarse ground hazelnut shell was used. By the rest of the model particles a low value of Fr_d reflected in a formation of favourable three-layer flow structure, whereas the threshold value of Fr_d (when the value is exceeded, the three-layer flow does not develop) was independent from the type or size of the particles.

Ta stran je namenoma prazna.

ZAHVALA

Za pomoč, podporo, potrpežljivost in nasvete pri nastajanju doktorske disertacije se iskreno zahvaljujem prof. dr. Franciju Steinmanu ter somentorju dr. Tomu Bajcarju.

Velika hvala tudi prof. dr. Branetu Široku in njegovi skupini s Fakultete za strojništvo za izredno podopro pri izvedbi poskusov.

Hvala Lojzetu za skrbno izdelan model in hvala Rajku, ki mi je vedno z veseljem priskočil na pomoč, kadar je bilo v laboratoriju treba kaj popraviti.

Hvala vsem bivšim sodelavcem Katedre za mehaniko tekočin na UL FGG: Gašperju R., Sašu, Karin, Andreji, Gašperju Z., Ani, Mateju, Danielu in Andreju za dobro vzdušje, ki smo ga gojili, za smeh, s katerim smo se borili proti stresu.

Hvala tudi vsem prijateljem – Slavku, Vanji, Alenki, Zali, Maši, Aljažu, Tini, Lejki, hvala vsem dobrim ljudem, ki me obdajate.

Velika zahvala gre mojima staršema, ki sta mi že v osnovni šoli pustila veliko svobodo in mi tako omogočila, da sem na prvih korakih izobraževanja zadihala na lastna pljuča in v učenju hitro našla lastno odogovornost in užitek. Mnogi starši govorijo svojim otrokom, da se učijo zase. Vidva mi tega nista nikoli rekla. Ni bilo treba, ker se je to čutilo v vajinih dejanjih. Hvala.

Velika hvala mojim najbližjim, Leonu za razumevanje in podporo, ter sončkoma Patriciji in Svitu, ki sta občutila, da je bila mami zaradi besed, ki so natisnjene med tema platnicama, nekaj časa v drugem svetu.

Ta stran je namenoma prazna.

"*Water is fluid, soft, and yielding.*
But water will wear away rock,
which is rigid and cannot yield.
As a rule, whatever is fluid, soft and yielding
will overcome whatever is rigid and hard.
This is another paradox: what is soft is strong."

– Lao Tse

KAZALO

Bibliografsko-dokumentacijska stran in izvleček IV
Bibliographic-dokumentalistic information and abstract V
Zahvala VII
Kazalo preglednic XII
Kazalo grafikonov XIII
Kazalo slik XVII
Kazalo prilog XIX
List of tables XX
List of graphs XXI
List of figures XXV
List of appendices XXVII
Seznam simbolov XXIX
Slovar strokovnih besed in tujk XXXIV
1 UVOD 1
2 TEORETIČNA IZHODIŠČA 2
2.1 Splošno o usedalnikih 2
2.1.1 Potek čiščenja na čistilni napravi 2
2.1.2 Tipi usedalnikov 3
2.1.3 Dejavniki, ki vplivajo na učinkovitost usedalnikov 4
2.1.4 Optimizacija delovanja usedalnikov 6
2.2 Značilnosti usedanja suspenzij 7
2.2.1 Diskretno usedanje 7
2.2.2 Ovirano usedanje delcev 15
2.2.3 Kyncheva teorija usedanja 19
2.3 Usedalniki s kontinuirnim delovanjem 22
2.3.1 Koncept idealnega usedalnika 22
2.3.2 Gostotni tokovi 24
2.3.3 Brezdimenzijska števila 28
2.3.4 Delovanje usedalnika in Froudovo densimetrično število 30
2.4 Hidravlično modeliranje usedalnikov 32
2.4.1 Hidravlična modelna podobnost 32
2.4.2 Modeliranje suspendirane snovi 35
2.4.3 Prilagoditev modela 37
2.5 Merilne metode 39

2.5.1 Določanje koncentracije trdnih delcev 39
2.5.2 Zrnavostna analiza velikosti delcev 43
2.5.3 Določitev tokovnega polja 44
3 RAZISKOVALNO DELO IN METODE 50
3.1 Fizično modeliranje delovanja usedalnika 51
3.1.1 Fizični model usedalnika 51
3.1.2 Suspendirana snov 53
3.1.3 Zasnova eksperimentalnega dela 57
3.1.4 Brezdimenzijska števila 60
3.2 Zajem podatkov in obdelava veličin 64
3.2.1 Vzorčenje 64
3.2.2 Zajem podatkov na podlagi posnetkov poskusa 65
3.2.3 Določitev učinkovitosti 70
4 REZULTATI IN RAZPRAVA 71
4.1 Lastnosti usedanja delcev 71
4.2 Kakovost suspenzije na vtoku in iztoku 73
4.2.1 Vzorčenje 73
4.2.2 Fotogrametrično določen indikator koncentracije 76
4.3 Učinkovitost čiščenja 81
4.4 Tokovna slika v usedalniku 83
4.4.1 Določitev vzorca tokovnega polja z računalniško podprto metodo 86
4.5 Pomen Froudovega densimetričnega števila 89
4.5.1 Froudovo densimetrično število glede na vrsto tokovne slike 89
4.5.2 Zveza med Froudovim densimetričnim številom in učinkovitostjo 93
4.5.3 Primerjava rezultatov študije z ugotovitvami iz literature 94
5 ZAKLJUČEK 96
POVZETEK 99
SUMMARY 101
VIRI 103
PRILOGE 111

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 2.1: Območja režimov toka glede na vrednost Reynoldsovega števila delca 9

Preglednica 2.2: Koeficient upora okroglega delca – empirične zveze 12

Preglednica 3.1: Približne vrednosti karakterističnih premerov delcev za vseh pet obravnavanih mešanic suspendirane snovi 55

Preglednica 3.2: Določitev osnovnih parametrov za poskuse z mleto lešnikovo lupino 58

Preglednica 3.3: Določitev osnovnih parametrov za poskuse s steklenimi delci 58

Preglednica 3.4: Določitev dejanskega pretoka skozi sistem na začetku poskusa, ko je bila gostota dotekajoče sveže suspenzije največja 59

Preglednica 3.5: Pregled začetnih vrednosti teoretičnega Froudovega densimetričnega števila na vtoku pri poskusih z mleto lešnikovo lupino in steklenimi mikrokroglicami 62

Preglednica 3.6: Brezdimenzijska števila niza dvanajstih poskusov 63

Preglednica 3.7: Brezdimenzijska števila niza dvanajstih poskusov 64

Preglednica 4.1: Računsko določene okvirne vrednosti hitrosti diskretnega usedanja delcev karakterističnih premerov za vseh pet suspendiranih snovi 72

Preglednica 4.2: Prostornina usedline po 25 minutah usedanja suspenzije v Imhoffovem liju (rezultati testov za izdelavo kalibracijskih krivulj) 73

Preglednica 4.3: Učinkovitost usedalnika η [%] za primer steklenih mikrokroglic zrnavosti B 81

Preglednica 4.4: Razvrstitev poskusov glede na vrsto tokovne slike (v okviru uporabljene suspendirani snovi so poskusi iz niza razvrščeni glede na začetno vrednost teoretičnega Froudovega densimetričnega števila – padajoče) 90

Preglednica 4.5: Pregled študij, ki so pri obravnavi tokovne slike v usedalniku upoštevale pomen vrednosti teoretičnega Froudovega densimetričnega števila 95

Preglednica A.1: Pregled splošnih podatkov o modelnih delcih p.1

Preglednica B.1: Nabor poskusov, izvedenih na fizičnem modelu usedalnika p.3

Preglednica H.1: Vzorčenje pri poskusih s fino mleto lešnikovo lupino p.29

Preglednica H.2: Vzorčenje pri poskusih z grobo mleto lešnikovo lupino p.30

Preglednica H.3: Vzorčenje pri poskusih s steklenimi kroglicami – zrnavost A p.31

Preglednica H.4: Vzorčenje pri poskusih s steklenimi kroglicami – zrnavost B p.32

Preglednica H.5: Vzorčenje pri poskusih s steklenimi kroglicami – zrnavost C p.33

Preglednica I.1: Fizikalne lastnosti vode (povzeto po Brater et al., 1996) p.34

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 2.1: Koeficient upora okroglih delcev v odvisnosti od Reynoldsovega števila delca 12

Grafikon 2.2: Hitrost usedanja okroglih delcev v vodi pri temperaturi 15 °C 13

Grafikon 3.1: Zrnavostna analiza velikosti delcev v fino in grobo mleti lešnikovi lupini, ki je služila kot suspendirana snov 54

Grafikon 3.2: Zrnavostna analiza velikosti steklenih kroglic (tri različne zrnavosti: A, B in C), ki so služile kot suspendirana snov 55

Grafikon 3.3: Zveza med gostoto suspenzije in masnim deležem trdnih delcev v vodi (upoštevana je gostota vode pri 15 °C) 62

Grafikon 4.1: Hitrosti usedanja delcev, ki so v poskusih služili kot modelna suspendirana snov; vrednosti veljajo za usedanje posameznih delcev ob predpostavki okrogle oblike delca 71

Grafikon 4.2: Porazdelitev hitrosti usedanja delcev, ki so v poskusih služili kot modelna suspendirana snov; vrednosti so računske in veljajo za diskretno usedanje ob predpostavki okrogle oblike delca 72

Grafikon 4.3: Zveza med masnim deležem trdnih delcev in prostornino usedline po 25 minutah usedanja pollitrskega vzorca v Imhoffovem liju (empirične točke in kalibracijske krivulje) 74

Grafikon 4.4: Masni delež delcev v vzorcu na vtoku in iztoku; fino mleta lešnikova lupina: primeri s pretokom 6 l/min 75

Grafikon 4.5: Masni delež delcev v vzorcu na vtoku in iztoku; stekleni delci zrnavosti C: primeri s pretokom 6 l/min 75

Grafikon 4.6: Časovni potek indikatorja koncentracije suspenzije na vtoku; vsi primeri s fino mleto lešnikovo lupino 76

Grafikon 4.7: Časovni potek indikatorja koncentracije v območju v okolici iztočnega preliva; fino mleta lešnikova lupina, pretok skozi sistem 10 l/min 77

Grafikon 4.8: Časovni potek indikatorja koncentracije v območju v okolici iztočnega preliva; fino mleta lešnikova lupina, pretok skozi sistem 4 l/min 78

Grafikon 4.9: Časovni potek indikatorja koncentracije v območju v okolici iztočnega preliva; stekleni delci zrnavosti C, pretok skozi sistem 4 l/min 78

Grafikon 4.10: Kakovost suspenzije na iztoku: primerjava fotogrametrične določitve indikatorja koncentracije in merjenja koncentracije v vzorcih z metodo usedanja v Imhoffovem liju (primer) 80

Grafikon 4.11: Vsebnost delcev na vtoku: primerjava fotogrametrične določitve indikatorja koncentracije in merjenja koncentracije v vzorcih z metodo usedanja v Imhoffovem liju (primer) 80

Grafikon 4.12: Učinkovitost usedalnika za primere s steklenimi delci zrnavosti A s pretokom 10 l/min 82

Grafikon 4.13: Učinkovitost usedalnika za primere s steklenimi delci zrnavosti B s pretokom 6 l/min 82

Grafikon 4.14: Froudovo densimetrično število na začetku poskusa (nobena od prikazanih vrednosti ni empirično določena; izračunane so bile po enačbi (2.55); razvrstitev glede na tokovno strukturo velja samo za fino mleto lešnikovo lupino in steklene delce zrnavosti A in B) 91

Grafikon 4.15: Zveza med Froudovim densimetričnim številom in učinkovitostjo usedalnika 93

Grafikon A.1: Zrnavostna analiza velikosti delcev v fino mleti lešnikovi lupini p.1

Grafikon A.2: Zrnavostna analiza velikosti delcev v grobo mleti lešnikovi lupini p.1

Grafikon A.3: Zrnavostna analiza velikosti delcev pri steklenih mikrokroglicah zrnavosti A p.2

Grafikon A.4: Zrnavostna analiza velikosti delcev pri steklenih mikrokroglicah zrnavosti A p.2

Grafikon A.5: Zrnavostna analiza velikosti delcev pri steklenih mikrokroglicah zrnavosti A p.2

Grafikon C.1: Porazdelitev računskih hitrosti diskretnega usedanja delcev mlete lešnikove lupine p.5

Grafikon C.2: Porazdelitev računskih hitrosti diskretnega usedanja steklenih delcev p.5

Grafikon D.1: Kalibracijska krivulja fino mlete lešnikove lupine p.6

Grafikon D.2: Kalibracijska krivulja grobo mlete lešnikove lupine p.6

Grafikon D.3: Kalibracijska krivulja steklenih delcev zrnavosti A p.7

Grafikon D.4: Kalibracijska krivulja steklenih delcev zrnavosti B p.7

Grafikon D.5: Kalibracijska krivulja steklenih delcev zrnavosti C p.7

Grafikon E.1: Koncentracije pri poskusih s fino mleto lešnikovo lupino z 0,25 % nazivno koncentracijo p.8

Grafikon E.2: Koncentracije pri poskusih s fino mleto lešnikovo lupino z 0,5 % nazivno koncentracijo p.8

Grafikon E.3: Koncentracije pri poskusih s fino mleto lešnikovo lupino z 1,0 % nazivno koncentracijo p.9

Grafikon E.4: Koncentracije pri poskusih s fino mleto lešnikovo lupino z 2,0 % nazivno koncentracijo p.9

Grafikon E.5: Koncentracije pri poskusih z grobo mleto lešnikovo lupino z 0,25 % nazivno koncentracijo p.10

Grafikon E.6: Koncentracije pri poskusih z grobo mleto lešnikovo lupino z 0,5 % nazivno koncentracijo p.10

Grafikon E.7: Koncentracije pri poskusih z grobo mleto lešnikovo lupino z 1,0 % nazivno koncentracijo p.11

Grafikon E.8: Koncentracije pri poskusih z grobo mleto lešnikovo lupino z 2,0 % nazivno koncentracijo p.11

Grafikon E.9: Koncentracije pri poskusih s steklenimi zrnci granulacije A z 0,25 % nazivno koncentracijo p.12

Grafikon E.10: Koncentracije pri poskusih s steklenimi zrnci granulacije A z 0,5 % nazivno koncentracijo p.12

Grafikon E.11: Koncentracije pri poskusih s steklenimi zrnci granulacije A z 1,0 % nazivno koncentracijo p.13

Grafikon E.12: Koncentracije pri poskusih s steklenimi zrnci granulacije A z 2,0 % nazivno koncentracijo p.13

Grafikon E.13: Koncentracije pri poskusih s steklenimi zrnci granulacije B z 0,25 % nazivno koncentracijo p.14

Grafikon E.14: Koncentracije pri poskusih s steklenimi zrnci granulacije B z 0,5 % nazivno koncentracijo p.14

Grafikon E.15: Koncentracije pri poskusih s steklenimi zrnci granulacije B z 1,0 % nazivno koncentracijo p.15

Grafikon E.16: Koncentracije pri poskusih s steklenimi zrnci granulacije B z 2,0 % nazivno koncentracijo p.15

Grafikon E.17: Koncentracije pri poskusih s steklenimi zrnci granulacije C z 0,25 % nazivno koncentracijo p.16

Grafikon E.18: Koncentracije pri poskusih s steklenimi zrnci granulacije C z 0,5 % nazivno koncentracijo p.16

Grafikon E.19: Koncentracije pri poskusih s steklenimi zrnci granulacije C z 1,0 % nazivno koncentracijo p.17

Grafikon E.20: Koncentracije pri poskusih s steklenimi zrnci granulacije C z 2,0 % nazivno koncentracijo p.17

Grafikon F.1: Časovni potek indikatorja koncentracije iztoka; poskusi s fino mleto lešnikovo lupino z 0,25 % nazivno koncentracijo p.18

Grafikon F.2: Časovni potek indikatorja koncentracije iztoka; poskusi s fino mleto lešnikovo lupino z 0,5 % nazivno koncentracijo p.18

Grafikon F.3: Časovni potek indikatorja koncentracije iztoka; poskusi s fino mleto lešnikovo lupino z 1,0 % nazivno koncentracijo p.19

Grafikon F.4: Časovni potek indikatorja koncentracije iztoka; poskusi s fino mleto lešnikovo lupino z 2,0 % nazivno koncentracijo p.19

Grafikon F.5: Časovni potek indikatorja koncentracije iztoka; poskusi z grobo mleto lešnikovo lupino z 0,25 % nazivno koncentracijo p.20

Grafikon F.6: Časovni potek indikatorja koncentracije iztoka; poskusi z grobo mleto lešnikovo lupino z 0,5 % nazivno koncentracijo p.20

Grafikon F.7: Časovni potek indikatorja koncentracije iztoka; poskusi z grobo mleto lešnikovo lupino z 1,0 % nazivno koncentracijo p.21

Grafikon F.8: Časovni potek indikatorja koncentracije iztoka; poskusi z grobo mleto lešnikovo lupino z 2,0 % nazivno koncentracijo p.21

Grafikon F.9: Časovni potek indikatorja koncentracije iztoka; poskusi s steklenimi delci zrnavosti A z 0,13 % nazivno koncentracijo p.22

Grafikon F.10: Časovni potek indikatorja koncentracije iztoka; poskusi s steklenimi delci zrnavosti A z 0,26 % nazivno koncentracijo p.22

Grafikon F.11: Časovni potek indikatorja koncentracije iztoka; poskusi s steklenimi delci zrnavosti A z 0,52 % nazivno koncentracijo p.23

Grafikon F.12: Časovni potek indikatorja koncentracije iztoka; poskusi s steklenimi delci zrnavosti A z 1,04 % nazivno koncentracijo p.23

Grafikon F.13: Časovni potek indikatorja koncentracije iztoka; poskusi s steklenimi delci zrnavosti B z 0,13 % nazivno koncentracijo p.24

Grafikon F.14: Časovni potek indikatorja koncentracije iztoka; poskusi s steklenimi delci zrnavosti B z 0,26 % nazivno koncentracijo p.24

Grafikon F.15: Časovni potek indikatorja koncentracije iztoka; poskusi s steklenimi delci zrnavosti B z 0,52 % nazivno koncentracijo p.25

Grafikon F.16: Časovni potek indikatorja koncentracije iztoka; poskusi s steklenimi delci zrnavosti B z 1,04 % nazivno koncentracijo p.25

Grafikon F.17: Časovni potek indikatorja koncentracije iztoka; poskusi s steklenimi delci zrnavosti C z 0,13 % nazivno koncentracijo p.26

Grafikon F.18: Časovni potek indikatorja koncentracije iztoka; poskusi s steklenimi delci zrnavosti C z 0,26 % nazivno koncentracijo p.26

Grafikon F.19: Časovni potek indikatorja koncentracije iztoka; poskusi s steklenimi delci zrnavosti C z 0,52 % nazivno koncentracijo p.27

Grafikon F.20: Časovni potek indikatorja koncentracije iztoka; poskusi s steklenimi delci zrnavosti C z 1,04 % nazivno koncentracijo p.27

KAZALO SLIK

Slika 2.1: Shema čistilne naprave 2

Slika 2.2: Sile, ki delujejo na okrogli delec, ki se useda v mirujoči viskozni tekočini 7

Slika 2.3: Hidrodinamične razmere v "idealnem" usedalniku 22

Slika 2.4: Oblika težnostnega toka (povzeto po Benjamin, 1968) 24

Slika 2.5: Troslojna struktura toka v krožnem usedalniku a) troslojna struktura; b) troslojna struktura s kratkim krogotokom (povzeto po van Marle in Kranenburg, 1994) 27

Slika 2.6: Shema analiziranja vsebnosti trdnin v vodi (povzeto po Radojević in Bashkin, 2006) 40

Slika 2.7: Izbrano okno slikovnih pik 43

Slika 2.8: Izračun časovnega odvoda koncentracije: fiksno okno in zaporedne slike v razmaku Δt (Bajcar et al., 2009) 48

Slika 2.9: Določitev krajevne razlike koncentracije: premik okna na posamezni sliki (Bajcar et al., 2009) 48

Slika 3.1: Shema obravnavanega prototipa usedalnika 50

Slika 3.2: Fotografija modela usedalnika 51

Slika 3.3: Shema modela usedalnika 52

Slika 3.4: Mleta lešnikova lupina kot suspendirana snov: levo fini delci, desno grobi delci 53

Slika 3.5: Steklene mikrokroglice kot suspendirana snov: levo granulacija A, na sredini granulacija B, desno granulacija C 54

Slika 3.6: Shema postopka za izdelavo kalibracijskih krivulj, ki povezujejo koncentracijo in prostornino usedline v Imhoffovem liju 65

Slika 3.7: Shema snemanja poskusov; postavitev velja za eksperimente, pri katerih je bila uporabljena mleta lešnikova lupina, ter za kontrolne eksperimente z barvilom 66

Slika 3.8: Shema snemanja poskusov; postavitev velja za eksperimente s steklenimi delci 66

Slika 3.9: Prikaz doseženih barvnih kontrastov pred in po pretvorbi sličic posnetka v črno-belo barvo; od leve proti desni si sledijo primeri pri snemanju z vnosom različnih snovi: primer z barvilom (levo), primer z mleto lešnikovo lupino (na sredini), primer s steklenimi mikrokroglicami (desno) 67

Slika 3.10: Okno slikovnih pik v bližini iztočnega preliva za opazovanje stopnje sivin ter kontrolno okno slikovnih pik 67

Slika 3.11: Uporabniški vmesnik programske opreme za računalniško podprto vizualizacijo tokovnega polja 69

Slika 3.12: Kvalitativna vizualizacija tokovnih struktur pri visokih koncentracijah suspendiranih delcev z vnosom sledila 69

Slika 4.1: Sekvence zaporednih sličic toka suspenzije za poskuse s pretokom 6 l/min; a) barvilo; b) fino mleta lešnikova lupina: w = 0,25 %; c) fino mleta lešnikova lupina: w = 2,0 %; d) grobo mleta lešnikova lupina: w = 0,25 % nazivna utežna koncentracija; e) grobo mleta lešnikova lupina: w = 2,0 %; f) stekleni delci zrnavosti A: w = 0,13 %; g) stekleni delci zrnavosti A: w = 1,04 %; h) stekleni delci zrnavosti B: w = 0,13 %; i) stekleni delci zrnavosti B: w = 1,04 %; j) stekleni delci zrnavosti C: w = 0,13 %; k) stekleni delci zrnavosti C: w = 1,04 % 83

Slika 4.2: Sekvence zaporednih sličic toka suspenzije za poskuse s fino mleto lešnikovo lupino z nazivno koncentracijo w = 1,0 % (nizi a), b) in c)) ter za poskuse s steklenimi delci zrnavosti B z nazivno koncentracijo w = 0,52 % (nizi d), e) in f)); a) pretok Q = 4 l/min; b) pretok Q = 6 l/min; c) pretok Q = 10 l/min; d) pretok Q = 4 l/min; e) pretok Q = 6 l/min; f) pretok Q = 10 l/min 85

Slika 4.3: Tokovno polje v usedalniku; pretok 4 l/min, fino mleta lešnikova lupina: nazivna utežna koncentracija 0,25%; začetno stanje 86

Slika 4.4: Tokovno polje v usedalniku; pretok 4 l/min, svežo suspenzijo predstavljata voda in barvilo ; začetno stanje 86

Slika 4.5: Shematski prikaz vzorcev troslojnega tokovnega polja a) kratki krogotok; b) polno razvit troslojni tok 87

Slika 4.6: Hitrostno polje v zgornjem delu modela usedalnika: dvoslojni vzorec tokovnega polja ... 88

Slika 4.7: Hitrostno polje v zgornjem delu modela usedalnika: troslojni vzorec tokovnega polja z učinkom kratkega krogotoka; prepoznati je tok v dveh vodoravnih smereh 88

Slika 4.8: Hitrostno polje v zgornjem delu modela usedalnika: polno razvit troslojni vzorec tokovnega polja 88

Slika 4.9: Stanje v usedalniku; pretok 4 l/min; grobo mleta lešnikova lupina; nazivna utežna koncentracija 2 %; začetno stanje. 92

Slika 4.10: Stanje v usedalniku; pretok 4 l/min; steklene kroglice zrnavosti C; nazivna utežna koncentracija 2 %; stanje po šestih minutah. 92

Slika G.1: Sekvence zaporednih sličic toka suspenzije za poskuse s fino mleto lešnikovo lupino z nazivno koncentracijo w = 1,0 % (nizi a), b) in c)) ter za poskuse s steklenimi delci zrnavosti B z nazivno koncentracijo w = 0,52 % (nizi d), e) in f)); a) pretok Q = 4 l/min; b) pretok Q = 6 l/min; c) pretok Q = 10 l/min; d) pretok Q = 4 l/min; e) pretok Q = 6 l/min; f) pretok Q = 10 l/min p.28

KAZALO PRILOG

Priloga A: Splošni podatki o modelnih delcih p.1
Priloga B: Pregled izvedenih eksperimentov p.3
Priloga C: Računske hitrosti usedanja modelnih delcev p.5
Priloga D: Kalibracijske krivulje za analize vsebnosti usedljivih delcev p.6
Priloga E: Grafični prikaz rezultatov vzorčenja p.8
Priloga F: Fotogrametrično določen indikator koncentracije iztoka p.18
Priloga G: Sekvence zaporednih sličic posnetkov poskusov p.28
Priloga H: Vzorčenje na vtoku in iztoku: rezultati in obdelava veličin p.29
Priloga I: Fizikalne lastnosti vode pri različnih temperaturah p.34

LIST OF TABLES

Table 2.1: Flow regime regions regarding the particle Reynolds number *9*

Table 2.2: Drag coefficient correlations for spherical particles *12*

Table 3.1: Approximate values of characteristic diameters of particles for all five used mixtures of settling matter *55*

Table 3.2: Calculation of basic parameters for experiments conducted with ground hazelnut shell *58*

Table 3.3: Calculation of basic parameters for experiments conducted with glass particles *58*

Table 3.4: Calculation of the actual flow through the system at the beginning of the experiment when the density of the inflowing fresh suspension was at its highest level *59*

Table 3.5: Overview of the initial theoretical densimetric Froude number values at the inlet and at the mid cross-section for test runs with ground hazelnut shell and glass microbeads *62*

Table 3.6: Dimensionless numbers of a series of twelve test runs *63*

Table 3.7: Dimensionless numbers of a series of twelve test runs *64*

Table 4.1: Calculated frame values of discrete settling velocities of characteristic diameter particles for all five mixtures of settling matter *72*

Table 4.2: Sludge volume after 25 minutes of suspension's settling in an Imhoff cone (tests results for elaboration of calibration curves) *73*

Table 4.3: Clarifier efficiency η [%] for tests with B granulation glass microspheres *81*

Table 4.4: Classification of test runs regarding to the flow pattern (within one settling matter used test runs are sorted in accordance with the initial value of the theoretical densimetric Froude number – descending) *90*

Table 4.5: Review of studies that took in consideration the value of the theoretical densimetric Froude number when investigating the efficiency or flow pattern in settling tank *95*

Table A.1: Overwiew of general data on model particles *p.1*

Table B.1: Test runs executed on the physcal settling tank model *p.3*

Table H.1: Sampling – experiments with fine ground hazelnut shell *p.29*

Table H.2: Sampling – experiments with coarse ground hazelnut shell *p.30*

Table H.3: Sampling – experiments with glass microbeads – granulation A *p.31*

Table H.4: Sampling – experiments with glass microbeads – granulation B *p.32*

Table H.5: Sampling – experiments with glass microbeads – granulation C *p.33*

Table I.1: Physical properties of water (source: Brater et al., 1996) *p.34*

LIST OF GRAPHS

Graph 2.1: Drag coefficient for spherical particles as a function of particle Reynolds number.....12

Graph 2.2: Settling velocity of spherical particles at a water temperature of 15°C.....13

Graph 3.1: Distribution of particle size of fine and coarse ground hazelnut shell used as settling matter 54

Graph 3.2: Distribution of particle size of glass microspheres (three different granulations: A, B and C) used as settling matter 55

Graph 3.3: Correlation between suspension density and mass concentration of solid particles in water (values apply to density of water at 15 °C) 62

Graph 4.1: Settling velocities of particles that served as a settling matter in experiments; the values apply to discrete particle settling and assuming a round shape of particle.....71

Graph 4.2: Distribution of settling velocities of particles that served as a settling matter in experiments; the values are calculated and apply to discrete particle settling assuming round shape of the particle.....72

Graph 4.3: Dependence between mass fraction of solid particles and sludge volume after 25 minutes of settling of a half litre sample in an Imhoff cone (empirical data and calibration curves) 74

Graph 4.4: Time series of mass concentration in influent and effluent samples; fine ground hazelnut shell: cases with volume flow rate of 6 l/min 75

Graph 4.5: Time series of mass concentration in influent and effluent samples; C granulation glass particles: cases with volume flow rate of 6 l/min.....75

Graph 4.6: Time series of the concentration indicator of the influent concentration; all experiments with fine ground hazelnut shell 76

Graph 4.7: Time series of the concentration indicator in the region near the effluent weir; fine ground hazelnut shell, the flow rate in the system set to 10 l/min.....77

Graph 4.8: Time series of the concentration indicator in the region near the effluent weir; fine ground hazelnut shell, the flow rate in the system set to 4 l/min.....78

Graph 4.9: Time series of the concentration indicator in the region near the effluent weir; fine ground hazelnut shell, the flow rate in the system set to 10 l/min.....78

Graph 4.10: Quality of the effluent: comparison of photogrammetric determination of concentration index and concentration measurements in samples by means of settling in the Imhoff cone (an example) 80

Graph 4.11: Particle fraction in influent: comparison of photogrammetric determination of concentration index and concentration measurements in samples by means of settling in the Imhoff cone (an example) 80

Graph 4.12: Clarifier efficiency for experiments with A granulation glass particles with flow rate of 10 l/min.....82

Graph 4.13: Clarifier efficiency for experiments with B granulation glass particles with flow rate of 6 l/min.....82

Graph 4.14: Densimetric Froude number at the beginning of the experiment (the demonstrated values were not evaluated empirically; they have been calculated according to the equation (2.55); classification regarding the flow structure applies only to fine ground hazelnut shell and glass particles of A and B granulation) 91

Graph 4.15: Correlation between the densimetric Froude number and clarifier's efficiency 93

Graph A.1: Distribution of particle size of fine ground hazelnut shell p.1

Graph A.2: Distribution of particle size of coarse ground hazelnut shell p.1

Graph A.3: Distribution of particle size of glass microbeads of the A granulation p.2

Graph A.4: Distribution of particle size of glass microbeads of the A granulation p.2

Graph A.5: Distribution of particle size of glass microbeads of the A granulation p.2

Graph C.1: Distribution of calculated values of discrete settling velocities of ground hazelnut shell particles p.5

Graph C.2: Distribution of calculated values of discrete settling velocities of glass particles p.5

Graph D.1: Calibration curve of fine ground hazelnut shell p.6

Graph D.2: Calibration curve of coarse ground hazelnut shell p.6

Graph D.3: Calibration curve of A granulation glass particles p.7

Graph D.4: Calibration curve of B granulation glass particles p.7

Graph D.5: Calibration curve of C granulation glass particles p.7

Graph E.1: Concentrations at experiments with fine ground hazelnut shell of 0.25 % nominal concentration p.8

Graph E.2: Concentrations at experiments with fine ground hazelnut shell of 0.5 % nominal concentration p.8

Graph E.3: Concentrations at experiments with fine ground hazelnut shell of 1.0 % nominal concentration p.9

Graph E.4: Concentrations at experiments with fine ground hazelnut shell of 2.0 % nominal concentration p.9

Graph E.5: Concentrations at experiments with coarse ground hazelnut shell of 0.25 % nominal concentration p.10

Graph E.6: Concentrations at experiments with coarse ground hazelnut shell of 0.5 % nominal concentration p.10

Graph E.7: Concentrations at experiments with coarse ground hazelnut shell of 1.0 % nominal concentration p.11

Graph E.8: Concentrations at experiments with coarse ground hazelnut shell of 2.0 % nominal concentration p.11

Graph E.9: Concentrations at experiments with A granulation glass microbeads of 0.25 % nominal concentration p.12

Graph E.10: Concentrations at experiments with A granulation glass microbeads of 0.5 % nominal concentration p.12

Graph E.11: Concentrations at experiments with A granulation glass microbeads of 1.0 % nominal concentration p.13

Graph E.12: Concentrations at experiments with A granulation glass microbeads of 2.0 % nominal concentration p.13

Graph E.13: Concentrations at experiments with B granulation glass microbeads of 0.25 % nominal concentration p.14

Graph E.14: Concentrations at experiments with B granulation glass microbeads of 0.5 % nominal concentration p.14

Graph E.15: Concentrations at experiments with B granulation glass microbeads of 1.0 % nominal concentration p.15

Graph E.16: Concentrations at experiments with B granulation glass microbeads of 2.0 % nominal concentration p.15

Graph E.17: Concentrations at experiments with C granulation glass microbeads of 0.25 % nominal concentration p.16

Graph E.18: Concentrations at experiments with C granulation glass microbeads of 0.5 % nominal concentration p.16

Graph E.19: Concentrations at experiments with C granulation glass microbeads of 1.0 % nominal concentration p.17

Graph E.20: Concentrations at experiments with C granulation glass microbeads of 2.0 % nominal concentration p.17

Graph F.1: Time series of the indicator of concentration of the effluent; experiments with fine ground hazelnut shell of 0.25 % nominal concentration p.18

Graph F.2: Time series of the indicator of concentration of the effluent; experiments with fine ground hazelnut shell of 0.5 % nominal concentration p.18

Graph F.3: Time series of the indicator of concentration of the effluent; experiments with fine ground hazelnut shell of 1.0 % nominal concentration p.19

Graph F.4: Time series of the indicator of concentration of the effluent; experiments with fine ground hazelnut shell of 2.0 % nominal concentration p.19

Graph F.5: Time series of the indicator of concentration of the effluent; experiments with coarse ground hazelnut shell of 0.25 % nominal concentration p.20

Graph F.6: Time series of the indicator of concentration of the effluent; experiments with coarse ground hazelnut shell of 0.5 % nominal concentration p.20

Graph F.7: Time series of the indicator of concentration of the effluent; experiments with coarse ground hazelnut shell of 1.0 % nominal concentration p.21

Graph F.8: Time series of the indicator of concentration of the effluent; experiments with coarse ground hazelnut shell of 2.0 % nominal concentration p.21

Graph F.9: Time series of the indicator of concentration of the effluent; experiments with A granulation glass particles of 0.13 % nominal concentration p.22

Graph F.10: Time series of the indicator of concentration of the effluent; experiments with A granulation glass particles of 0.26 % nominal concentration p.22

Graph F.11: Time series of the indicator of concentration of the effluent; experiments with A granulation glass particles of 0.52 % nominal concentration p.23

Graph F.12: Time series of the indicator of concentration of the effluent; experiments with A granulation glass particles of 1.04 % nominal concentration p.23

Graph F.13: Time series of the indicator of concentration of the effluent; experiments with B granulation glass particles of 0.13 % nominal concentration p.24

Graph F.14: Time series of the indicator of concentration of the effluent; experiments with B granulation glass particles of 0.26 % nominal concentration..... p.24

Graph F.15: Time series of the indicator of concentration of the effluent; experiments with B granulation glass particles of 0.52 % nominal concentration..... p.25

Graph F.16: Time series of the indicator of concentration of the effluent; experiments with B granulation glass particles of 1.04 % nominal concentration..... p.25

Graph F.17: Time series of the indicator of concentration of the effluent; experiments with C granulation glass particles of 0.13 % nominal concentration..... p.26

Graph F.18: Time series of the indicator of concentration of the effluent; experiments with C granulation glass particles of 0.26 % nominal concentration..... p.26

Graph F.19: Time series of the indicator of concentration of the effluent; experiments with C granulation glass particles of 0.52 % nominal concentration..... p.27

Graph F.20: Time series of the indicator of concentration of the effluent; experiments with C granulation glass particles of 1.04 % nominal concentration..... p.27

LIST OF FIGURES

Figure 2.1: Wastewater treatment plant flow diagram. 2

Figure 2.2: Forces acting on a settling spherical particle in a quiescent viscous fluid 7

Figure 2.3: Hydrodynamic conditions in an "ideal" settling tank 22

Figure 2.4: Form of gravity current (adopted from Benjamin, 1968) 24

Figure 2.5: Three-layer structure in a circular settling tank a) three-layer structure; b) three-layer structure with short circuiting (adopted from van Marle and Kranenburg, 1994) 27

Figure 2.6: Analysis scheme for solids in water (adopted from Radojević and Bashkin, 2006) 40

Figure 2.7: The chosen window of pixels 43

Figure 2.8: Calculation of the time derivative of concentration: fixed window, sequence of images (Bajcar et al., 2009) 48

Figure 2.9: Determination of spatial difference in concentration: window moves over a single image (Bajcar et al., 2009) 48

Figure 3.1: Schematic view of the investigated settling tank prototype 50

Figure 3.2: Photo of the model settling tank 51

Figure 3.3: Schematic view of a model settling tank 52

Figure 3.4: Ground hazelnut shell as suspended matter: fine particles on the left, coarse particles on the right 53

Figure 3.5: Glass microbeads as suspended matter: granulation A on the left, granulation B on the middle, granulation C on the right 54

Figure 3.6: Scheme of procedure of elaboration of calibration curves that connect concentrations and sludge volume in the Imhoff sedimentation cone 65

Figure 3.7: Scheme of the shooting set-up; this configuration was used for filming the experiments with ground hazelnut shell and for control experiments with dye 66

Figure 3.8: Scheme of the shooting set-up; the configuration applies to experiments with glass particles 66

Figure 3.9: Colour contrasts before and after conversion of bitmap to greyscale colour scheme; examples of frames from filming with different introduced matter, from left to right: an example with dye (left), an example with ground hazelnut shell (in the middle); an example with glass microspheres (right) 67

Figure 3.10: Window of pixels near the effluent to observe the average greyscale levels, and control window of pixels 67

Figure 3.11: User interface of the software for computer-aided flow visualization 69

Figure 3.12: Qualitative visualization of flow structures at high suspended solids concentrations by introducing a tracer 69

Figure 4.1: Sequence of consequent images of suspension flow for the experiment with a flow rate of 6 l/min; a) dye; b) fine ground hazelnut shell: w = 0.25 %; c) fine ground hazelnut shell: w = 2.0%; d) coarse ground hazelnut shell: w = 0.25 %; e) coarse ground hazelnut shell: w = 2.0%; f) A granulation glass particles: w = 0,13 %; g) A granulation glass particles: w = 1,04 %; h) B granulation glass particles: w = 0,13

%; i) B granulation glass particles: w = 1,04 %; j) C granulation glass particles: w = 0,13 %; k) C granulation glass particles: w = 1,04 % *83*

Figure 4.2: Sequence of consequent images of suspension flow for the experiment with fine ground hazelnut shell with nominal concentration of w = 1.0 % (sets a), b) and c)) and for the experiments with B granulation glass particles of w = 0.52 % (sets d), e) and f)); a) flow rate Q = 4 l/min; b) flow rate Q = 6 l/min; c) flow rate Q = 10 l/min; d) flow rate Q = 4 l/min; e) flow rate Q = 6 l/min; f) flow rate Q = 10 l/min *85*

Figure 4.3: Velocity field inside settling tank; flow rate of 4 l/min, fine ground hazelnut shell: nominal mass concentration 0.25 %; initial stage *86*

Figure 4.4: Velocity field inside settling tank; flow rate of 4 l/min, fresh suspension consists of water and dye; initial stage *86*

Figure 4.5: Schematic view of three–layer flow patterns a) short circuiting; b) fully developed three–layer flow *87*

Figure 4.6: Velocity vector field in the model settling tank in vicinity of the effluent weir: two-layer flow pattern *88*

Figure 4.7: Velocity vector field at the top of the model settling tank: three-layer flow pattern with short circuiting; currents in two horizontal directions can be observed *88*

Figure 4.8: Velocity vector field at the top of the model settling tank: fully developed three-layer flow pattern *88*

Figure 4.9: Conditions in the settling tank; coarse ground hazelnut shell; nominal concentration of 2 %; initial stage *92*

Figure 4.10: Conditions in the settling tank; granulation C glass spheres; nominal concentration of 2 %; conditions after six minutes *92*

Figure G.1: Sequence of consequent images of suspension flow for the experiments with fine ground hazelnut shell with nominal concentration of w = 1.0 % (sets a), b) and c)) and for the experiments with B granulation glass beads with nominal concentration of w = 0.52 % (sets d), e) and f)); a) mass flow of Q = 4 l/min; b) mass flow of Q = 6 l/min; c) mass flow of Q = 10 l/min; d) mass flow of Q = 4 l/min; e) mass flow of Q = 6 l/min; f) mass flow of Q = 10 l/min *p.28*

LIST OF APPENDICES

Appendix A: General data on model particles p.1
Appendix B: Summary of experiments p.3
Appendix C: Calculated values of the model particles' settling velocities p.5
Appendix D: Calibration curves for settleable solids analysis p.6
Appendix E: Graphical demonstration of sampling results p.8
Appendix F: Photogrametically defined indicator of concentration of the effluent p.18
Appendix G: Sequence of consequent images of the video clips of experiments p.28
Appendix H: Sampling of the influent and the effluent: results and processing data p.29
Appendix I: Physical properties of water at different temperatures p.34

Ta stran je namenoma prazna.

SEZNAM SIMBOLOV

A	ploščina izbranega prečnega prereza
A'	ploščina prečnega prereza idealne usedalne cone
ΔA	ploščina osnovne ploskve elementarnega volumna
A_0	ploščina prečnega preseka vtočne odprtine usedalnika
A_{bc}	ploščina izbranega prečnega prereza toka ob dnu
A_m	ploščina prečnega preseka na sredini usedalnika
A_p	skupna površina pravokotne projekcije delcev v smeri gibanja
$A_{p(1)}$	površina pravokotne projekcije delca v smeri gibanja
A_{rc}	ploščina izbranega prečnega prereza povratnega toka
$A_{st.M}$	ploščina tlorisne površine modela usedalnika
$A_{st.P}$	ploščina tlorisne površine modela usedalnika
B	širina usedalnika
c	masna koncentracija (z enakim pomenom se lahko uporabljata tudi izraza masni delež ali utežna koncentracija)
$c(i,j)$	koncentracija (sledila ali delcev) v točki, ki pripada slikovni piki z lego v i,j
$c_{d.min}$	najmanjši masni delež trdnih delcev v vzorcu suspenzije, ki se ji z uporabljeno metodo še lahko določi koncentracija
c_{ef}	koncentracija trdnih delcev suspenzije na iztoku iz usedalnika
c_{in}	koncentracija trdnih delcev v odpadni vodi na vtoku v usedalnik
C_d	koeficient upora
d_{10}	deseti percentil premera zrna (10 % delcev vzorca ima manjši premer)
d_{90}	devetdeseti percentil premera zrna (90 % delcev vzorca ima manjši premer)
d_m	srednji premer zrna
d_p	karakteristična dimenzija delca (premer okroglega delca)
d_A	ekvivalentni premer površine projekcije delca nepravilne oblike
$d_{A.m}$	srednji ekvivalentni premer površine projekcije delca nepravilne oblike
d_V	ekvivalentni prostorninski krogelni premer delca nepravilne oblike
$d_{V.m}$	srednji ekvivalentni prostorninski krogelni premer delca
D	molekularna difuzivnost sledila v tekočini
D_0	širina vtočne odprtine
D_m	širina usedalnika v sredinskem prečnem prerezu

$\vec{e}_x$	enotski vektor v smeri koordinatne osi x (bazni vektor)
$\vec{e}_z$	enotski vektor v smeri koordinatne osi x (bazni vektor)
$E_{i,j}$	intenziteta sivine posamezne opazovane slikovne pike z lego v i, j
$f_{bd}(\varphi)$	funkcija gostote šaržnega toka
F_b	sila vzgona
F_d	sila upora tekočine
F_g	sila teže
F_M	aktivna sila na modelu
F_P	aktivna sila na prototipu
Fr	Froudovo število
Fr_d	teoretično densimetrično Froudovo število
$Fr_{d.0}$	teoretično densimetrično Froudovo število na vtoku v usedalnik
$Fr_{d.m}$	teoretično densimetrično Froudovo število na sredinskem prečnem prerezu usedalnika
g	gravitacijski pospešek
G	povprečna intenziteta sivine izbranega okna slikovnih pik (vrednost med 0 in 255)
G_{max}	najvišja vrednost povprečne intenzitete sivine izbranega okna slikovnih pik, ki nastopi v času poskusa
h	višina toka v izbranem prečnem prerezu
H	višina usedalnika
h_0	višina vtočne odprtine
h_m	višina usedalnika v sredinskem prečnem prerezu
h_p	višina usedalnika na obodu
H'	globina idealne usedalne cone
$H_{c.0}$	začetna višina stolpca suspenzije
i_0	zaporedno število celic (v horizontalni smeri) na levem robu izbranega okna slikovnih pik
i_n	zaporedno število celic (v horizontalni smeri) na desnem robu izbranega okna slikovnih pik
I_G	indikator koncentracije v izbranem oknu slikovnih pik
j_0	zaporedno število celic (v vertikalni smeri) na zgornjem robu izbranega okna slikovnih pik
j_n	zaporedno število celic (v vertikalni smeri) na spodnjem robu izbranega okna slikovnih pik
j_x	gostota masnega toka v smeri x
k_{bc}	intenzivnost toka po dnu
k_{rc}	intenzivnost povratnega toka

L dolžina usedalnika

L' dolžina idealne usedalne cone

L_M tipična dolžina na modelu usedalnika

L_P tipična dolžina na prototipu usedalnika

m_p masa trdnih delcev v suspenziji

$m_{p(1)}$ masa posameznega delca

$m_{p.S}$ skupna masa vseh trdnih delcev v sistemu modela usedalnika in rezervoarja

m_w masa vode v suspenziji

$m_{w.S}$ skupna masa vode v sistemu modela usedalnika in rezervoarja

N koncentracija onesnaževala

q_A površinska obremenitev usedalnika

Q prostorninski pretok

Q' korigiran dejanski prostorninski pretok skozi sistem

Q_{bc} prostorninski pretok toka ob dnu

Q_M prostorninski pretok skozi model usedalnika

Q_P prostorninski pretok skozi prototip usedalnika

Q_{rc} prostorninski pretok povratnega toka

r razdalja od središča usedalnika

R hidravlični radij

R_c hidravlični radij krožnega usedalnika

R_r hidravlični radij pravokotnega usedalnika

Re Reynoldsovo število

Re_p Reynoldsovo število delca

$RE_p^{l.max}$ mejna vrednost Reynoldsovega števila delca Re_p, pri kateri režim toka preide iz laminarnega v prehodni

$RE_p^{t.min}$ mejna vrednost Reynoldsovega števila delca Re_p, pri kateri režim toka preide iz prehodnega v turbulentni

S_p površina delca

t čas

Δt časovni zamik

ΔT_M razlika v temperaturi modelirane dotekajoče suspenzije in medija v modelu usedalnika

ΔT_P razlika v temperaturi dotekajoče suspenzije in medija v usedalniku (nanaša se na prototip

usedalnika)

v hitrost

$\vec{v}$ vektor hitrosti

$\overline{v}$ srednja hitrost toka v izbranem prečnem prerezu

$\overline{v}_{bc}$ srednja hitrost toka ob dnu

$\overline{v}_{rc}$ srednja hitrost povratnega toka

v_d minimalna hitrost usedanja delca, ki je potrebna, da se delec, ki vstopa v usedalnik na višini vodne gladine, med pomikanjem proti iztoku še usede

v_h hitrost oviranega usedanja delca

$v_{m.z}$ srednja hitrost medija oziroma tekočine v vertikalni smeri

v_M tipična hitrost na modelu

v_P tipična hitrost na prototipu

v_s hitrost usedanja

$v_{s.M}$ tipična hitrost usedanja na modelu

$v_{s.P}$ tipična hitrost usedanja na prototipu

v_x komponenta hitrosti delca v smeri koordinatne osi x

v_z komponenta hitrosti delca v smeri koordinatne osi z

V prostornina suspenzije

$V_{p(1)}$ prostornina delca

V_p skupna prostornina trdnih delcev v suspenziji

$V_{p,r}$ skupna prostornina vseh delcev v rezervoarju

V_r prostornina rezervoarja

V_{ss} prostornina usedline 0,5-litrskem v vzorcu po 25 minutah usedanja v Imhoffovem liju

V_{st} neto prostornina modela usedalnika

V_w prostornina vode

$V_{w,r}$ prostornina vode v rezervoarju

w nazivna utežna koncentracija delcev (nanaša se na koncentracijo trdnih delcev v vodi za izveden poskus in velja za celoten sistem – usedalnik, rezervoar, povezovalne cevi)

w_{gb} nazivna utežna koncentracija poskusov, pri katerih so bili uporabljeni stekleni delci

w_{hs} nazivna utežna koncentracija poskusov, pri katerih je bila uporabljena mleta lešnikova lupina

x_i koordinatna smer

α kot, ki ga oklepata vodoravna ravnina in dno usedalnika

β_M temperaturni koeficient prostorninskega raztezka na modelu usedalnika

β_P temperaturni koeficient prostorninskega raztezka na prototipu usedalnika

ε relativna razlika v gostoti med dotekajočo suspenzijo in okoliškim medijem

ε_M relativna razlika v gostoti med dotekajočo suspenzijo in okoliškim medijem na modelu usedalnika

ε_P relativna razlika v gostoti med dotekajočo suspenzijo in okoliškim medijem na prototipu usedalnika

η učinkovitost delovanja usedalnika

θ središčni kot krožnega izseka, ki predstavlja model usedalnika

λ_F razmerje sil na modelu in sil na prototipu

λ_L geometrijsko merilo dolžin modela

λ_v razmerje med hitrostmi na modelu in hitrostmi na prototipu

μ_m dinamična viskoznost medija (tekočine)

ν_m kinematična viskoznost medija (tekočine)

$\xi(\varphi)$ razmerje med hitrostjo oviranega usedanja in hitrostjo diskretnega usedanja delca kot funkcija prostorninskega deleža delcev

φ prostorninski delež trdnih delcev v suspenziji

$\varphi(i,j)$ prostorninski delež trdnih delcev v točki, ki pripada slikovni piki z lego v i,j

φ_0 začetna koncentracija suspenzije

φ_∞ končna koncentracija na dnu

ρ gostota

ρ_{in} gostota sveže suspenzije na vtoku v usedalnik

ρ_m gostota medija oz. tekočine

ρ_p gostota delcev

ρ_{st} gostota medija oz. suspenzije v komori usedalnika

ρ_w gostota vode

Ψ stopnja okroglosti

SLOVAR STROKOVNIH BESED IN TUJK

diatomejska prst – prst, ki vsebuje lupinice diatomej, tj. alg s kremenasto lupino (SSKJ, 1995)

diskretno usedanje (ang. *discrete particle settling*) – fizikalni model usedanja suspenzij, v katerih je prostorninska koncentracija delcev tako nizka, da so medsebojni vplivi med delci zanemarljivo majhni. Pri tem tipu usedanja veljajo za delce v suspenziji enake zveze kot za usedanje enega posameznega delca.

ekvivalentni prostorninski krogelni premer delca nepravilne oblike je nadomestni premer kroglice, ki bi imela enako prostornino kot obravnavani delec (Peker in Helvaci, 2008)

emulzija – zmes tekočine in zelo drobnih kapljic kake druge, v njej netopne tekočine (SSKJ, 1995)

fotogrametrija je postopek izdelave natančnih meritev na podlagi fotografij (The American heritage, dictionary of the English Language, 4th Edition, 2000)

gostotni tok (ang. *density current*) ali **težnostni tok** (ang. *gravity current*) je tok ene tekočine znotraj druge tekočine, ki jo povzroča razlika v gostoti med tekočinama (Simpson, 1982).

kiveta (fr. *cuvette*) je majhna prozorna cevka ali posoda, ki ima izrecno določene optične lastnosti. Kemična sestava posode določa njeno uporabo, npr. ognjevarno steklo za raziskovanje materialov v vidnem polju ali kremenovo steklo za ultravijolični spekter. Uporablja se v laboratorijskih raziskavah in analizah, kot so fotometrične, kolorimetrične metode ter meritvah kalnosti. (Mosby's Medical Dictionary, 8th edition 2009)

kratki krogotok (ang. *short circuiting*) – pojem, ki opisuje nezaželeno tokovno sliko v usedalniku, pri kateri delci prepotujejo zelo kratko pot, zaradi česar je čas zadrževanja kratek, učinkovitost čiščenja pa slaba.

laminarni tok se nanaša na režim toka, pri katerem se tekočina giblje v vzporednih slojih (Steinman, 2010)

laserska granulometrija (ang. *laser light diffraction particle sizing*) – določanje zrnavosti materiala s pomočjo laserske tehnologije

naknadni usedalnik (ang. *secondary settling tank*) je usedalnik, ki v procesu čiščenja na čistilni napravi nastopi v sekundarni fazi čiščenja

in situ – latinska fraza, ki v dobesednem prevodu pomeni na mestu. Z uporabo te fraze se poudari, da se je metoda preučevanja izvjala na mestu samem, tj. na lokaciji, kjer se je proces odvijal.

ovirano usedanje (ang. *hindered settling*) – fizikalni model usedanja suspenzij, v katerih je prostorninska koncentracija delcev tako visoka, da medsebojni vplivi med delci na proces usedanja niso več zanemarljivi

prototip – konstrukcija v naravni velikosti

slikovna pika ali **piksel** je v računalništvu izraz za najmanjšo logično enoto bitne slike, ki ima določeno barvo in intenziteto (svetlost). Formalno je piksel točka, ki nima oblike ali določene velikosti, na zaslonu pa je slikovna pika omejena z obliko in velikostjo in predstavlja tudi mersko enoto, s katero se izraža ločljivost prikazane slike.

suspenzija – zmes tekočine in trdnih delcev kake v njej netopne snovi (SSKJ, 1995)

tokovnica ali **tokovna linija** (ang. *streamline*) – črta, ki jo dobimo, če v nizu delcev tekočine v gibanju potegnemo takšno krivuljo, da je vektor hitrosti v vsaki točki te krivulje tangenta na krivuljo (Steinman, 2010)

turbulentni tok se nanaša na režim toka, pri katerem se pojavljajo pulzacije hitrosti in posledično prihaja do premešanja delcev tekočine v prečni smeri (Steinman, 2010)

trajektorija (ang. *path line*) – črta, ki jo dobimo, če spremljamo gibanje nekega delca tekočine in označujemo njegovo pot v prostoru (Steinman, 2010)

usmerjevalna stena oziroma **pregrada** (ang. *baffle*) – konstrukcijski element v usedalniku, katerega funkcija je usmerjanje toka dotekajoče sveže suspenzije

zrnavost ali **granulacija** (ang. *particle size distribution*) – sestav sipkega materiala glede na razmerje med velikostjo zrn (SSKJ, 1995)

Ta stran je namenoma prazna.

1 UVOD

Naknadni usedalniki predstavljajo pomemben člen v procesu čiščenja odpadnih voda. Trdni delci se v njih izločijo iz vode z usedanjem. Glavno načelo usedanja je konceptualno gledano enostavno: gre za fizikalno ločitev tekočinske in trdne faze iz suspenzije, ki vstopa v usedalnik. Dotekajoči trdni delci tonejo proti dnu in izoblikujejo usedlino na dnu usedalne komore. Preostala suspenzija kot iztok zapusti usedalnik in se lahko ponovno vrne v usedalnik, če je njegovo delovanje kontinuirno.

Ključni parameter za določitev primernosti usedalnika je njegova učinkovitost. Ta se lahko določi glede na primerjavo vsebnosti trdnih delcev na vtoku v usedalnik in kakovosti vode na iztoku. Na učinkovitost usedalnika vplivajo številni dejavniki, zato zgolj spremljanje koncentracij na vtoku in iztoku praviloma ne zadošča, kadar je treba dognati, zakaj in kako posamezni parametri prispevajo svoj košček v mozaiku učinkovitosti. V ta namen je nujno dobro poznavanje fenomena, ki se dogaja znotraj usedalnika.

Delovanje usedalnika je lahko kontinuirno (naknadni usedalnilki) ali pa se usedalnik obremeni s šaržo (šaržni usedalniki). Glavne značilnosti usedanja šaržnih usedalnikov so že raziskane do te mere, da je ujemanje rezultatov empiričnih podatkov in današnjih matematičnih modelov zadovoljivo (npr. Bürger et al., 1999; Bürger et al., 2000; Diehl, 2007; van Deventer et al., 2011). Tokovne razmere v usedalniku s kontinuirnim delovanjem pa so kompleksne in – v nasprotju s šaržno obremenjenim usedalnikom – nekatera vprašanja o njegovem delovanju še vedno ostajajo odprta. Zaradi različnih oblik, razsežnosti, oblikovnih detajlov, hidravličnih obremenitev, lastnosti odpadnih voda ter vremenskih vplivov je praktično skoraj vsak naknadni usedalnik zgodba zase. V primerjavi z iskanjem optimalnih rešitev za specifičen usedalnik, ko se npr. ugotovi najugodnejša postavitev ali razsežnost konstrukcijskega elementa (npr. pregrade), ima za napredek v poznavanju fenomena precej večji pomen določitev fenomenološke zveze ali parametrov splošnejše veljave.

Cilj študije je razširiti do sedaj znana dognanja o procesih usedanja v usedalnikih s kontinuirnim delovanjem z ugotovitvami splošne veljave. Obravnava je omejena na fizikalne oziroma hidravlične vplive na fenomen. Drugi dejavniki, kot so npr. reologija, zunanji vplivi (veter, temperatura okolice) in oblikovni dejavniki, v disertaciji niso obravnavani. Jedro študije so poskusi, ki so potekali v hidravličnem laboratoriju na fizičnem modelu krožnega usedalnika s kontinuirnim delovanjem. Model usedalnika predstavlja krožni izsek prototipa, pri čemer je predvidena simetrija procesov okrog središčne osi. Stene modela so iz pleksi stekla, kar omogoča opazovanje fenomena v usedalniku samem. Poskusi so bili posneti z digitalno kamero, poleg kvalitativnega opazovanja pa je študija podkrepljena tudi z računalniško podprto metodo vizualizacije toka. Za določitev učinkovitosti se je izvajalo vzorčenje na vtoku in iztoku.

Z različnimi izbirami modelnih delcev ter s skrbno izbranimi obratovalnimi parametri je izdelan velik nabor poskusov, ki omogočajo sistematično obravnavo tokovnih razmer, ki se vzpostavijo v usedalniku. Potrjen ali ovržen je vpliv Froudovega densimetričnega števila na procese v usedalniku. Poleg tega bo z izbiro petih vrst modelnih delcev, ki se med seboj razlikujejo glede na samo snov ali pa glede na sestav velikosti delcev, ovrednoten vpliv lastnosti suspendiranih trdnih delcev v odpadni vodi, tj. vpliv računsko določenih hitrosti diskretnega usedanja delcev.

Za zagotovitev čim boljših izhodišč pri načrtovanju usedalnikov so izdelane analize zvez med Froudovim densimetričnim številom, hitrostmi diskretnega usedanja delcev, poglavitnimi značilnostmi tokovnega polja in učinkovitostjo usedalnika.

2 TEORETIČNA IZHODIŠČA

Usedalniki s kontinuirnim delovanjem so relativno zaprt, a vseeno zelo kompleksen sistem, na katerega delovanje vpliva mnogo dejavnikov. Disertacija se bo v obravnavi omejila zgolj na fizikalne oziroma hidravlične vplive.

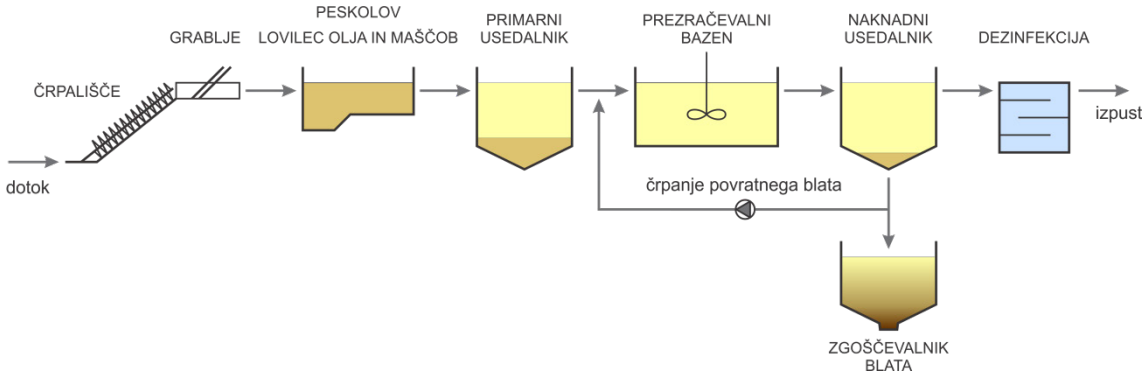
Uvodoma bo to poglavje opisalo vlogo naknadnih usedalnikov v procesu čiščenja, ter podalo bežen pregled vrst usedalnikov ter vseh dejavnikov, ki vplivajo na delovanje usedalnikov. Strogo analitičen pristop, pri katerem bi bili lahko delci obravnavani posamično, vključno z analitičnimi določitvami sil, ki nanje delujejo, ne bi bil smiseln. Vseeno bodo, zaradi boljšega razumevanja fizikalnega ozadja procesov, ki se dogajajo v usedalni komori, predstavljene analitične in empirične enačbe, ki veljajo za diskretno in ovirano usedanje trdnih delcev ter temeljna teorija usedanja. Nekoliko podrobneje bodo predstavljeni naknadni usedalniki oziroma hidrodinamične razmere v njih; opisan bo zgodovinski razvoj od prvih konceptov dimenzioniranja naknadnih usedalnikov pa do današnjega poznavanja tokovnih razmer. V tem poglavju bodo prikazane še osnovne zakonitosti fizičnega hidravličnega modeliranja vključno s posebnostmi, ki veljajo za usedalnike, ter merilne metode, ki se uporabljajo za meritve na prototipih in na modelih usedalnikov.

2.1 Splošno o usedalnikih

Usedalniki igrajo pomembno vlogo pri čiščenju voda. Osnovni princip njihovega delovanja je, da se iz suspenzije, ki doteka v usedalnik, izloči (usede) čim več trdnih delcev, tako da iz usedalnika odteka čista oziroma vsaj čistejša voda. Ker usedalniki praviloma niso samostojni objekti, temveč so vpeti v verigo čiščenja na čistilni napravi, je za boljše razumevanje njihove vloge potrebno poznavanje osnovnih postopkov čiščenja vode.

2.1.1 Potek čiščenja na čistilni napravi

Prva stopnja čiščenja surove odpadne vode pri tipični komunalni čistilni napravi je predčiščenje ali grobo čiščenje, ki obsega mehansko čiščenje z grabljami, s siti in peskolovom, v nekaterih primerih pa tudi mletje grobih delcev (Roš, 2001). Na tej stopnji gre za grobo čiščenje, s katerim se iz odpadne vode odstranijo večji trdni delci. Kvaliteta odpadne vode se s to stopnjo bistveno ne izboljša, saj je poglavitni namen predčiščenja ta, da se zaščiti črpalna oprema in drugi elementi objektov čistilne naprave, ki v procesu čiščenja nastopijo kasneje (Lin, 2001).



Slika 2.1: Shema čistilne naprave

Figure 2.1: Wastewater treatment plant flow diagram.

Ko je odpadna voda grobo očiščena, sledi primarno čiščenje, med katerim se iz odpadne vode izločijo usedljive in plavajoče snovi, pa tudi del organskih snovi. Cilj primarnega čiščenja je, da se v primarnih usedalnikih zadostno zmanjša hitrost toka odpadne vode, tako da se suspendirani delci lahko usedejo (Lin, 2001), trdne snovi, ki so lažje od vode, pa splavajo na površino. Zelo pomembno je, da se s primarnim čiščenjem prepreči prisotnost plavajočih snovi v nadaljevanju procesa čiščenj, konkretneje v naknadnem usedalniku, saj bi se zaradi tega kvaliteta vode na iztoku lahko precej poslabšala (Panjan, 2005).

Po primarnem čiščenju voda še vedno vsebuje organske snovi v suspendirani, koloidni in raztopljeni obliki (Lin, 2001) in potrebno je sekundarno čiščenje. Čeprav gre pri sekundarnem čiščenju pretežno za biološki proces čiščenja odpadnih voda, tudi na tej stopnji poteka gravitacijsko čiščenje. V tako imenovanih naknadnih usedalnikih se z usedanjem iz vode izločajo suspendirani trdni delci, ki se na predhodnih objektih čistilne naprave še niso izločili. Del usedline se črpa iz naknadnega usedalnika in kot povratno blato vrača v prezračevalni bazen (Slika 2.1), da se optimizira biološki proces čiščenja.

2.1.2 Tipi usedalnikov

Usedalniki se lahko delijo glede na

- tlorisno obliko,
- način obratovanja in
- vlogo.

Usedalniki so lahko pravokotni, okrogli ali kvadratni. V pravokotnih usedalnikih teče odpadna voda z enega konca bazena na drugega, strgala pa potiskajo usedlino proti vtoku. Pri okroglih in kvadratnih usedalnikih pa se odpadna voda običajno dovaja v sredino usedalnika in teče radialno proti zunanjemu robu, usedline pa se s strgali ali na drugačen način prenašajo proti sredini (Roš, 2001). Redkeje imajo okrogli usedalniki dotok na obodu in iztok na sredini.

Še bolj kot oblika tako delovanje usedalnika zaznamuje njegov način delovanja. Grobo gledano se usedalniki glede na način obratovanja delijo na šaržne in tiste s kontinuirnim delovanjem. Šaržni so obremenjeni enkratno (s šaržo), usedanje v njih pa poteka v mirujoči tekočini, brez prisotnosti hidrodinamike. Drug tip obratovanja je kontinuirni – skozi usedalnik s takim delovanjem se ves čas pretaka voda (sveža suspenzija vstopa na vtoku, del vode zapušča usedalnik kot iztok, k dinamiki pa pripomore še vračanje povratnega blata), ki ves čas sovpliva na tokovne razmere v usedalniku. V praksi je šaržnih usedalnikov v popolnem pomenu besedne zveze malo.

Glede na vlogo v čiščenju odpade vode se usedalniki delijo na primarne in naknadne. Kot je bilo že omenjeno, morajo biti hitrosti v primarnih usedalnikih zelo majhne. Zaradi tega so s hidravličnega vidika precej nezahtevni, saj usedanje v njih poteka v relativno mirnih tokovnih razmerah.

V naknadnih usedalnikih so hidrodinamične razmere precej bolj kompleksne, saj je njihovo delovanje kontinuirno. To pomeni, da se skoznje ves čas pretaka voda, ki vpliva na tokovne razmere v usedalni komori. Ker lahko neupoštevanje tokovnih razmer vodi v slabo učinkovitost ali pa predimenzioniranje objekta, mora biti načrtovanje naknadnih usedalnikov zelo premišljeno.

2.1.3 Dejavniki, ki vplivajo na učinkovitost usedalnikov

Ključni parameter za presojo ustreznosti usedalnika je njegova učinkovitost čiščenja. Za splošno določitev učinkovitosti ali za določitev učinkovitosti že izdelanih usedalnikov običajno zadošča, če se opazuje le integralne parametre: pretok in koncentracijo suspenzije na vtoku in iztoku iz usedalnika ter starost suspenzije (Bajcar et al., 2010).

Učinkovitost delovanja usedalnika predstavlja delež snovi, ki se je na poti od vtoka do iztoka izločila iz odpadne vode, in jo podaja enačba:

$$\eta = 1 - \frac{c_{ef}}{c_{in}} \tag{2.1}$$

kjer sta: c_{ef} koncentracija trdnih delcev suspenzije na iztoku iz usedalnika

c_{in} koncentracija trdnih delcev v odpadni vodi na vtoku v usedalnik

Čeprav usedalnik s kontinuirnim delovanjem predstavlja razmeroma zaprt sistem, je dejavnikov, ki vplivajo na njegovo učinkovitost, veliko:

- lastnosti suspendiranih trdnih delcev,
- biološki vplivi (biološko kosmičenje, razgradnja)
- kemijski vplivi
- oblikovni vplivi
- obratovalni vplivi
- hidravlični vplivi

Predlagana doktorska disertacija se bo omejila na raziskovanje fizikalnih oziroma hidravličnih vplivov na delovanje usedalnika. V tem poglavju bodo zgolj okvirno predstavljeni vsi parametri, ki lahko vplivajo na učinkovitost usedalnika.

Lastnosti suspenzije

Velikost, oblika in gostota delca so tisti, ki močno vplivajo na usedanje. Načeloma se večji delci usedajo hitreje kot majhni, okrogli delci se usedajo hitreje kot delci nepravilnih oblik, delci z večjo gostoto se usedajo hitreje kot tisti z manjšo. Zelo pomembna je tudi koncentracija suspenzije, ki pa je obravnavana kot obratovalni parameter.

Reološki dejavniki oziroma starost suspenzije lahko močno vpliva na lastnosti usedanja (Gosar et al., 2010). Kosmičenje je proces naravnega združevanja delcev v večje kosme. Pod pojmom koagulacija pa se običajno razume umetno pospešeno kosmičenje, ki se ga doseže z različnimi dodatki.

Vpliv kosmičenja oziroma koagulacije na procese usedanja so preučevali številni raziskovalci: npr. Panjan (1988) je analiziral vplive Brownovega gibanja in kinetiko kosmičenja (koagulacije).

Do zanimivih rezultatov so prišli De Clercq et al. (2004), ki so na prototipu usedalnika izvajali meritve granulacije s sodobnejšo tehnologijo za analiziranje zrnavosti suspenzije *in situ*. Njihove meritve so pokazale, da sestav suspenzije glede na razmerje med velikostjo zrn ni bil odvisen od lege v

flokulatorju usedalnika. To je bilo nepričakovano odkritje, ki poraja dvom o nujnosti vgraditve flokulatorja v usedalnik (De Clercq et al., 2004).

Oblikovni dejavniki

Oblikovni dejavniki imajo precej velik vpliv na učinkovitost čiščenja. Najpomembnejše so splošna tlorisna oblika usedalnika (krožni, kvadratni, pravokotni) ter dimenzije usedalnika (dolžina in višina usedalnika in razmerje med njima). Poleg naštetih parametrov se usedalniki med seboj razlikujejo še v konstrukcijskih detajlih. Pri teh pa kar presenetljivo veliko virov navaja, da so njihovi vplivi na učinkovitost neznatni. Taeby-Harandy in Schroeder (1995) sta v poskusih uporabila dva tipa konfiguracije vtoka (potopljena pregrada in porozni vtok), postavitev sredinske pregrade (en primer z in en primer brez), štiri različne umestitve usedlinskega iztoka (na koncu vtoka, na sredini, poleg iztoka ter vse tri naštete sočasno) ter dve umestitvi iztočnega preliva (oddaljen in vmesen). Ugotovila sta, da so imeli v obravnavanih poskusih konstrukcijski elementi zanemarljiv učinek. Do podobnih zaključkov so prišli še Anderson (1945) in van Marle in Kranenburg (1994).

Obratovalni dejavniki

Pri načrtovanju čistilne naprave in njenih posameznih objektov je treba predvideti količine, kakovost in sestavo odpadnih voda. Pri tem je treba upoštevati trenutno stanje in prepoznati trende. Obremenitve komunalnih čistilnih naprav se namreč ves čas spreminjajo. Nekatere spremembe so kratkotrajne in izhajajo iz sezonskih, mesečnih, tedenskih ali dnevnih sprememb v kakovosti in sestavi komunalnih odpadnih vod; druge spremembe so dolgotrajne in jih je lahko povzročila rast (ali upad) prebivalstva, socialne in ekonomske razmere ali spremenjen obseg industrijske proizvodnje (Roš, 2001). Pri industrijskih obratih, ki imajo lastne sisteme za čiščenje tehnološke vode, je zaradi znanih tehnoloških procesov nekoliko lažje predvideti razpon obremenitev, vendar tudi tam večje spremembe niso izključene.

Še bolj zahtevno je uravnavanje obratovalnih parametrov pri čistilnih napravah, ki imajo več kot le en naknadni usedalnik. Takšnih pa je veliko. V praksi je znano, da je zelo težko, če ne celo nemogoče, zagotoviti enakomerno obremenitev posameznih usedalnikov. Če se te težave ne upošteva, se lahko izgubi velik delež skupne kapacitete usedalnika, merjene kot maksimalne dovoljene hidravlične obremenitve (Lynggaard-Jensen et al., 2009). Običajno se količina povratnega blata ne nadzira, saj je praviloma za količino vračane odpadne vode merilo določen delež vtoka, kar vodi v zelo spremenljive in pogosto prenizke koncentracije trdnih delcev v vračani usedlini.

Hidravlični dejavniki

Hidrodinamični vplivi so tisti, zaradi katerih je predvsem delovanje usedalnikov s kontinuirnim obratovanjem precej kompleksno. Načrtovanje usedalnikov je pogosto pavšalno - temelji na konceptu idealnega usedalnika, kar pomeni, da se pri dimenzioniranju upoštevata le zadrževalni čas in hidravlična obremenitev (DeVantier in Larock, 1987). Zaradi pomanjkljivega poznavanja hidravlike usedalnikov je pogosto predimenzioniranje, ki vodi v višje investicijske in obratovalne stroške (DeVantier in Larock, 1987; Al-Sammarrae in Chan, 2009) ali še slabše, v slabo obratovanje usedalnika (DeVantier in Larock, 1987).

Zunanji dejavniki

Veter lahko pri nepokritih usedalnikih močno vpliva na tokovno strukturo v zgornjem sloju, ta pa je zaradi običajne lege iztoka (pravilom zgoraj) ključnega pomena za kakovost vode na iztoku. Da se zmanjša labilnost hidrodinamičnih razmer na vplive vetra, mora biti tok v usedalniku čim bolj stabilen. Zaradi zelo visokih ali pa nizkih temperatur okolja lahko v usedalniku pride do temperaturne stratifikacije. Drug primer negativnega vpliva temperature je pozimi, ko ima dotekajoča suspenzija na vtoku višjo temperaturo od tiste, ki prevladuje v usedalniku. Zaradi omenjenega pride do učinka kratkega krogotoka.

2.1.4 Optimizacija delovanja usedalnikov

Vse našteto, kar vpliva na delovanje naknadnega usedalnika, med seboj ni neodvisno. Med dejavniki obstajajo posredne in neposredne zveze. Tako npr. proces kosmičenja in razkroja delcev spreminja velikosti delcev. Spet je velikost delcev povezana s hitrostjo diskretnega usedanja, kar lahko vpliva na tokovne razmere v usedalniku. Tudi obratovalni parametri imajo neposreden vpliv na hidravlične razmere. Teh relacij je veliko in pravzaprav nima smisla naštevati vseh. Za boljše razumevanje pa je vseeno smiselna posamična obravnava različnih vplivov. Nekateri znanstveniki in strokovnjaki so relacije med temi parametri uporabili tudi za optimizacijo posameznega elementa za določen tip usedalnika.

Optimizacija oblikovnih dejavnikov

Demir (1995) je za pravokoten usedalnik s sistemom vzporednih med seboj enako oddaljenih lamel na osnovi statistične ocene rezultatov eksperimentov pri različnih površinskih obremenitvah in pri različnih kotih postavitve lamel določil tisti kot (med lamelo in navpičnico), pri katerem je učinkovitost usedanja največja.

Veliko raziskav je preučevalo, kako bi učinkovitost vtoka lahko povečali s tipom vtoka (Anderson, 1945; van Marle in Kranenburg, 1994; Krebs et al., 1995; Taebi-Harandy in Schroeder, 1995) oziroma z lego in/ali velikostjo vtočne odprtine (Tamayol et al., 2008).

Optimizacija usedalnika določene konstrukcije je sicer dobrodošla, a za razvoj področja ne prinese veliko, ker obravnava specifični usedalnik. Uporabnost rezultatov raziskav s takšnim pristopom je zelo omejena in jih dostikrat lahko uporabimo izključno na raziskovanem tipu usedalnika. Vsekakor se tovrstne ugotovitve ne smejo nekritično posploševati in prenesti na kakršenkoli usedalnik.

Odmerjanje dodatkov

Zhao (2004) je določal količino polimerov, ki jo je treba dodati odpadni vodi, da se doseže optimalne lastnosti kosmičenja.

Uravnavanje obratovalnih parametrov

Lynggaard-Jensen et al. (2009) so pokazali, da se z nadziranim vračanjem povratnega blata in nadzirano razporeditvijo tega med naknadne usedalnike, lahko znatno poveča zmogljivost čistilne naprave. Žal je takšen način optimizacije pri čistilnih napravah, ki imajo zgolj en ali dva usedalnika, precej omejen.

2.2 Značilnosti usedanja suspenzij

K optimizaciji delovanja usedalnikov lahko pripomore boljše razumevanje fizikalnih vplivov na procese usedanja, zato bodo v nadaljevanju predstavljene osnovne značilnosti usedanja suspenzij.

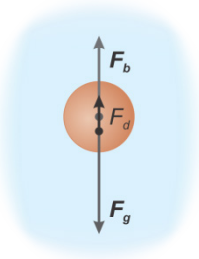
V tem poglavju bosta obravnavani dve kategoriji usedanja delcev:

- usedanje posameznih delcev (ang. *discrete particle settling*), pri katerem so medsebojni vplivi med delci zanemarljivo majhni, in
- ovirano usedanje (ang. *hindered settling*), ki se nanaša na suspenzije, v katerih prostorninska koncentracija delcev preseže določeno mejno vrednost.

2.2.1 Diskretno usedanje

Fizikalni model diskretnega usedanja predpostavlja, da so medsebojni vplivi med delci na usedanje zanemarljivi. Tako so vse izpeljave za diskretno usedanje suspenzije enake, kakor da bi se obravnavalo usedanje enega samega delca v tekočini.

Delec, katerega gostota je večja od gostote tekočine, v kateri je potopljen, se useda. Za delec velja 2. Newtonov zakon, ki pravi, da je rezultanta sil, ki delujejo na telo, enaka produktu mase telesa in njegovega pospeška.



Slika 2.2: Sile, ki delujejo na okrogli delec, ki se useda v mirujoči viskozni tekočini
Figure 2.2: Forces acting on a settling spherical particle in a quiescent viscous fluid

Na posamezen delec, ki se useda v tekočini, delujejo sila teže, sila vzgona in sila upora tekočine (Slika 2.2), zato se 2. Newtonov zakon za delec lahko zapiše kot:

$$m_{p(1)} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} = F_g - F_b - F_d \tag{2.2}$$

kjer so: $m_{p(1)}$ masa posameznega delca

v hitrost

t čas

F_g sila teže

F_b sila vzgona

F_d sila upora tekočine

Sila teže delca:

$$F_g = \rho_p \cdot V_{p(1)} \cdot g \tag{2.3}$$

kjer so: ρ_p gostota delca

$V_{p(1)}$ prostornina delca

g gravitacijski pospešek

Sila vzgona deluje navpično navzgor in je ob predpostavki, da je delec v celoti potopljen:

$$F_b = \rho_m \cdot V_{p(1)} \cdot g \tag{2.4}$$

kjer je: ρ_m gostota medija

Sila upora tekočine deluje v smeri, nasprotni od smeri gibanja in je po velikosti enaka:

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot A_{p(1)} \cdot \rho_m \cdot v^2 \tag{2.5}$$

kjer sta: C_d koeficient upora

$A_{p(1)}$ površina pravokotne projekcije delca v smeri gibanja

Ob upoštevanju izrazov za izračun posameznih sil, ki delujejo na delec: (2.3), (2.4) in (2.5), enačba (2.2) dobi obliko:

$$m_{p(1)} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} = \rho_p \cdot V_{p(1)} \cdot g - \rho_m \cdot V_{p(1)} \cdot g - \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot A_{p(1)} \cdot \rho_m \cdot v^2 \tag{2.6}$$

Pri gravitacijskem usedanju se delcu hitrost usedanja najprej povečuje, dokler ne doseže končne hitrosti (Casey, 1997). Faze, v kateri se delec giblje pospešeno, temeljni viri praviloma ne obravnavajo, saj preproste in celostne analitične rešitve več kot stoletje in pol po Stokesovi prelomni izpeljavi še ni bilo na voljo (Guo, 2011).

Delec, ki se prosto useda v mirujoči tekočini, doseže končno hitrost, ko je rezultanta sil nanj enaka nič, tj. ko se sila upora izenači z razliko sile teže in sile vzgona, zato velja:

$$m_{p(1)} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} = 0 = \rho_p \cdot V_{p(1)} \cdot g - \rho_m \cdot V_{p(1)} \cdot g - \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot A_{p(1)} \cdot \rho_m \cdot v_s^2 \tag{2.7}$$

kjer je: v_s hitrost usedanja
(izraz se nanaša na končno hitrost usedanja delca, tj. tisto hitrost, ki jo delec doseže, ko njegovo gibanje preide iz pospešenega v premo enakomerno; v literaturi je pridevnik 'končna' večinoma izpuščen)

Koeficient upora je odvisen od hitrosti (oziroma od režima toka v okolici delca), viskoznosti medija, hrapavosti površine delca in oblike delca (Peker in Helvaci, 2008). Okrogli delci se bodo usedli hitreje kot delci z enako prostornino in gostoto, ki niso okrogli (Casey, 1997). Zaradi omenjenih odvisnosti je koeficient upora pogosto treba določiti empirično.

Režim toka v okolici delca se definira na podlagi Reynoldsovega števila delca, ki ga določa izraz:

$$Re_p = \frac{\rho_m \cdot d_p \cdot v_s}{\mu_m} \tag{2.8}$$

kjer sta: d_p karakteristična dimenzija delca

μ_m dinamična viskoznost medija (tekočine)

Dinamična viskoznost tekočine je odvisna od temperature; vrednosti dinamične viskoznosti, gostote vode in površinske napetosti za vodo pri različnih temperaturah podaja Preglednica I.1 (Priloga I).

Glede na vrednost Reynoldsovega števila delca se tok uvrsti v:

- *Laminarni režim,* če je $Re_p < RE_p^{l.max}$;

  Laminarne tokovne razmere nastopijo pri nizkih vrednostih Reynoldsovega števila. Takrat so vztrajnostne sile zanemarljivo majhne v primerjavi z viskoznimi.
- *Prehodni režim,* če je $RE_p^{l.max} \leq Re_p \leq RE_p^{t.min}$

  *K*adar vztrajnostne sile niso zanemarljive, se koeficient upora ne da določiti s teoretično izpeljavo. Za prehodni režim toka se zveza med koeficientom upora in hitrostjo oziroma Reynoldsovim številom delca ugotavlja in podaja empirično.
- *Turbulentni režim,* če je $RE_p^{t.min} > 2000$.

  Kadar nastopi turbulentni režim toka, je koeficient upora skoraj konstanten in neodvisen od hitrosti ali Reynoldsovega števila delca.

kjer sta: $RE_p^{l.max}$ mejna vrednost Reynoldsovega števila delca Re_p, pri kateri režim toka preide iz laminarnega v prehodni

$RE_p^{t.min}$ mejna vrednost Reynoldsovega števila delca Re_p, pri kateri režim toka preide iz prehodnega v turbulentni

V literaturi je pogosto zaslediti enoznačno navajanje meja med režimi toka, dejansko pa med avtorji te mejne vrednosti nemalokrat odstopajo (Preglednica 2.1).

Preglednica 2.1: Območja režimov toka glede na vrednost Reynoldsovega števila delca

Table 2.1: Flow regime regions regarding the particle Reynolds number

Vir	Laminarni režim	Prehodni režim	Turbulentni režim
Casey (1997)	$Re_p < 1$	$1 < Re_p < 2000$	$2000 < Re_p$
Lin. (2001)	$Re_p < 2$	$2 < Re_p < 500$ do 1000	$500\ do\ 1000 < Re_p$
Peker in Helvaci (2008)	$Re_p < 1$	$1 < Re_p < 1000$	$1000 < Re_p$

Usedanje okroglega delca

Teorije usedanja delcev se praviloma začenjajo z obravnavo delcev okrogle oblike. Kroglica je namreč od vseh oblik delcev najpreprostejša za obravnavo. Zveze, ki veljajo za fenomen usedanja idealno okroglega delca, pa lahko služijo kot osnova za izpeljave izrazov za vse druge oblike delcev.

Če je obravnavani delec okrogel, se v enačbi (2.7) prostornina in površina pravokotne projekcije delca nadomestita z izrazoma, ki veljata za kroglo:

$$V_{p(1)} = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d_p^3 \tag{2.9}$$

$$A_{p(1)} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_p^2 \tag{2.10}$$

kjer je: d_p premer okroglega delca

Ob upoštevanju geometrijskih razmerij (2.9) in (2.10), se iz enačbe (2.7) lahko izpelje izraz za določitev hitrosti usedanja okroglega delca:

$$0 = \rho_p \cdot \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d_p^3 \cdot \vec{g} - \rho_m \cdot \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d_p^3 \cdot \vec{g} - C_d \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_p^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_m \cdot v_s^2$$

$$0 = (\rho_p - \rho_m) \cdot \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d_p^3 \cdot g - C_d \cdot \frac{1}{8} \cdot \pi \cdot d_p^2 \cdot \rho_m \cdot v_s^2$$

$$0 = (\rho_p - \rho_m) \cdot \frac{1}{6} \cdot d_p \cdot g - C_d \cdot \frac{1}{8} \cdot \rho_m \cdot v_s^2$$

$$v_s = \sqrt{\frac{4 \cdot d_p \cdot g \cdot (\rho_p - \rho_m)}{3 \cdot C_d \cdot \rho_m}} \tag{2.11}$$

Za laminarni režim toka je Stokes izpeljal enačbo za skupno silo upora na okrogli delec. Eno tretjino sile upora predstavlja oblikovni upor, ki izvira iz normalnih napetosti na kroglico; preostali dve tretjini upora pa predstavljajo sile trenja (Peker in Helvaci, 2008). Enačbo za skupno silo upora se dobi z integracijo normalnih in tangencialnih napetosti po površini delca; za okrogle delce v laminarnih razmerah se sila upora tako lahko določi z izrazom:

$$F_d = 3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d_p \cdot v \tag{2.12}$$

Z združitvijo enačb (2.5) in (2.12) se lahko izpelje izraz za izračun koeficienta upora okroglega delca v laminarnih razmerah:

$$C_d = \frac{24}{Re_p} \tag{2.13}$$

Z upoštevanjem izrazov (2.13) in (2.8) v enačbi (2.11), se lahko izpelje enačba za določitev hitrosti usedanja okroglega delca, v okolici katerega vlada laminarni režim toka:

$$v_s = \sqrt{\frac{4 \cdot d_p \cdot g \cdot (\rho_p - \rho_m) \cdot Re_p}{3 \cdot 24 \cdot \rho_m}}$$

$$v_s = \sqrt{\frac{4 \cdot d_p \cdot g \cdot (\rho_p - \rho_m) \cdot Re_p}{3 \cdot 24 \cdot \rho_m} \cdot \frac{\rho_m \cdot d_p \cdot v_s}{\mu_m}}$$

$$v_s = \frac{g}{18 \cdot \mu_m} \cdot (\rho_p - \rho_m) \cdot d_p^2 \tag{2.14}$$

Enačba (2.14) za določitev hitrosti usedanja okroglih delcev je znana kot Stokesov zakon in temelji na fizikalni izpeljavi. Tudi enačba za določitev koeficienta upora (2.13), ki velja za laminarni režim toka, pravzaprav izhaja iz Stokesovega zakona in ne obratno, zato ni empirična.

Stokesov zakon (2.14) velja, če so izpolnjene naslednje predpostavke:

- v okolici delca je laminarni režim toka,
- delec je okrogel,
- zgradba delcev je homogena (enotna sestava),
- površine delca so gladke in
- pri usedanju med delci ni medsebojnega vpliva.

Kot je bilo v besedilu že omenjeno, v literaturi vrednost Reynoldsovega števila delca, ki predstavlja zgornjo mejo laminarnega režima, ni povsem enoznačna (Preglednica 2.1). Kadar fizikalni problem zahteva čim bolj natančno obravnavo, se je pri odločitvi o uporabi ustrezne enačbe smotrno nasloniti na rezultate laboratorijskih meritev. Eksperimentalno je bilo ugotovljeno, da hitrost usedanja, določena po Stokesovem zakonu, odstopa od dejanske hitrosti usedanja do 1% za $Re_p \leq 0{,}1$, do 3% za $Re_p \leq 0{,}5$ in do 9% za $Re_p \leq 1{,}0$ (Rhodes, 2008). Če se Reynoldsovo število še povečuje, zaradi vztrajnosti tekočine Stokesov zakon ne velja več in je za izračun sil upora treba uporabiti empirične rešitve.

Za prehodni režim toka, kjer se za delcem že začne oblikovati brazda z vrtinci, ni enotnega izraza za določitev koeficienta upora okroglega delca. Objavljene so bile že številne empirične enačbe, ki povezujejo koeficient upora in Reynoldsovo število delca; nekaj jih podaja Preglednica 2.2. Zveza, ki sta jo predlagala Fair in Geyer (1954; enačba (2.15)), je v vodarstvu najpogosteje uporabljena in najpogosteje citirana (npr. Zajic, 1971; WPCF in ASCE, 1977; Casey, 1997; Lin, 2001).

Brown in Lawler (2013) sta izdelala pregled predlaganih zvez med koeficientom upora okroglega delca in Reynoldsovega števila delca. V svoji raziskavi sta pregledala kar štiriindvajset različnih eksperimentalnih študij hitrosti usedanja. Kar nekaj izmed teh raziskav sta izločila iz različnih razlogov, večinoma zaradi premajhne natančnosti (npr. dostopni viri so točke podajali zgolj grafično) ali zadostnosti (niso bili podani vsi potrebni parametri) podatkov. Po izločitvi neustreznih nizov sta podatke korigirala tako, da sta izločila vpliv stene. Svoje analize sta tako opirala na kar 480 eksperimentalnih točk, ki sta jih primerjala s šestimi empričnimi relacijami različnih avtorjev. Ugotovila sta, da je stopnja ujemanja računskih vrednosti in empiričnih podatkov najnižja ravno pri uporabi popularizirane enačbe (2.15), ki sta jo predlagala Fair in Geyer (1954), saj le 39% podatkovnih točk odstopa od izračunanih vrednosti za manj kot pet odstotkov. Za primerjavo: zveze, ki so jih predlagali Clift et al.(1987) so od obravnavanih avtorjev dosegle najboljše ujemanje - kar 81,5% podatkov je bilo znotraj območja petodstotne relativne napake.

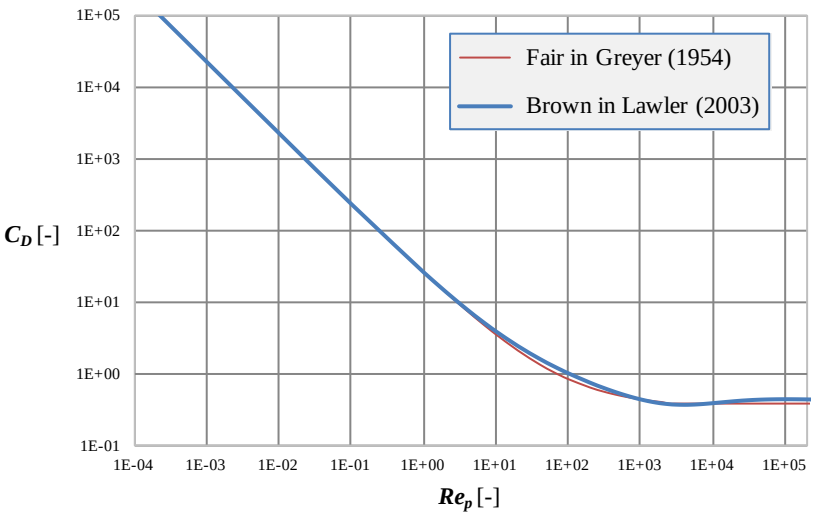
Primerjavo veljavnosti enačb za določitev hitrosti usedanja na podlagi eksperimentalnih rezultatov so objavili tudi Ciccarello et al. (2012), vendar so se pri primerjavah računskih in eksperimentalno merjenih hitrosti usedanja delcev (različnih velikosti, gostot in oblik) opirali zgolj na premer delcev, ne pa tudi na Reynoldsovo število delca. Posledično so njihove ugotovitve nekonsistentne in nejasne, zato podrobneje ne bodo predstavljene.

Preglednica 2.2: Koeficient upora okroglega delca – empirične zveze

Table 2.2: Drag coefficient correlations for spherical particles

Vir	Območje veljavnosti	Empirična zveza	
Fair in Geyer (1954)	$Re_p < 10^4$	$C_d = \frac{24}{Re_p} + \frac{3}{\sqrt{Re_p}} + 0{,}34$	(2.15)
Clift et al. (1978)	$Re_p < 0{,}01$	$C_d = \frac{24}{Re_p} + \frac{3}{16}$	(2.16a)
	$0{,}01 \leq Re_p \leq 20$	$C_d = \frac{24}{Re_p} \cdot \left[1 + 0{,}1315 \cdot Re_p^{(0{,}82-0{,}05 \cdot a)}\right]$	(2.16b)
	$20 \leq Re_p \leq 260$	$C_d = \frac{24}{Re_p} \cdot \left[1 + 0{,}1935 \cdot Re_p^{0{,}6305}\right]$	(2.16c)
	$260 \leq Re_p \leq 1500$	$\log C_d = 1{,}6435 - 1{,}1242 \cdot a + 0{,}1558 \cdot a^2$	(2.16d)
	$1500 \leq Re_p \leq 1{,}2 \cdot 10^4$	$\log C_d = -2{,}4571 + 2{,}5558 \cdot a - 0{,}9295 \cdot a^2 + 0{,}1049 \cdot a^3$	(2.16e)
	$1{,}2 \cdot 10^4 \leq Re_p \leq 4{,}4 \cdot 10^4$	$\log C_d = -1{,}9181 + 0{,}6370 \cdot a - 0{,}0636 \cdot a^2$	(2.16f)
	$4{,}4 \cdot 10^4 \leq Re_p \leq 3{,}38 \cdot 10^5$	$\log C_d = -4{,}3390 + 1{,}5809 \cdot a - 0{,}1546 \cdot a^2$	(2.16g)
		kjer je $a = \log Re_p$	
Turton in Levenspiel. (1986)	$Re_p < 2{,}6 \cdot 10^5$	$C_d = \frac{24}{Re_p} \cdot \left(1 + 0{,}173 \cdot Re_p^{0{,}657}\right) + \frac{0{,}413}{1+16{,}300 \cdot Re_p^{-1{,}09}}$	(2.17)
Haider in Levenspiel. (1989)	$Re_p < 2{,}6 \cdot 10^5$	$C_d = \frac{24}{Re_p} \cdot \left(1 + 0{,}1806 \cdot Re_p^{0{,}6459}\right) + \frac{0{,}4251}{1 + \frac{6880{,}95}{Re_p}}$	(2.18)
Brown in Lawler (2003)	$Re_p < 2 \cdot 10^5$	$C_d = \frac{24}{Re_p} \cdot \left(1 + 0{,}150 \cdot Re_p^{0{,}681}\right) + \frac{0{,}407}{1 + \frac{8710}{Re_p}}$	(2.19)

Grafikon 2.1 prikazuje zvezo med koeficientom upora okroglih delcev in Reynoldsovim številom delca. Poudarjena krivulja (v modri barvi) je določena po empirični enačbi, ki sta jo predlagala Brown in Lawler (2013), za primerjavo pa je na grafikonu tudi krivulja (v rdeči barvi), ki jo določa empirična enačba po Fair in Greyer (1954).



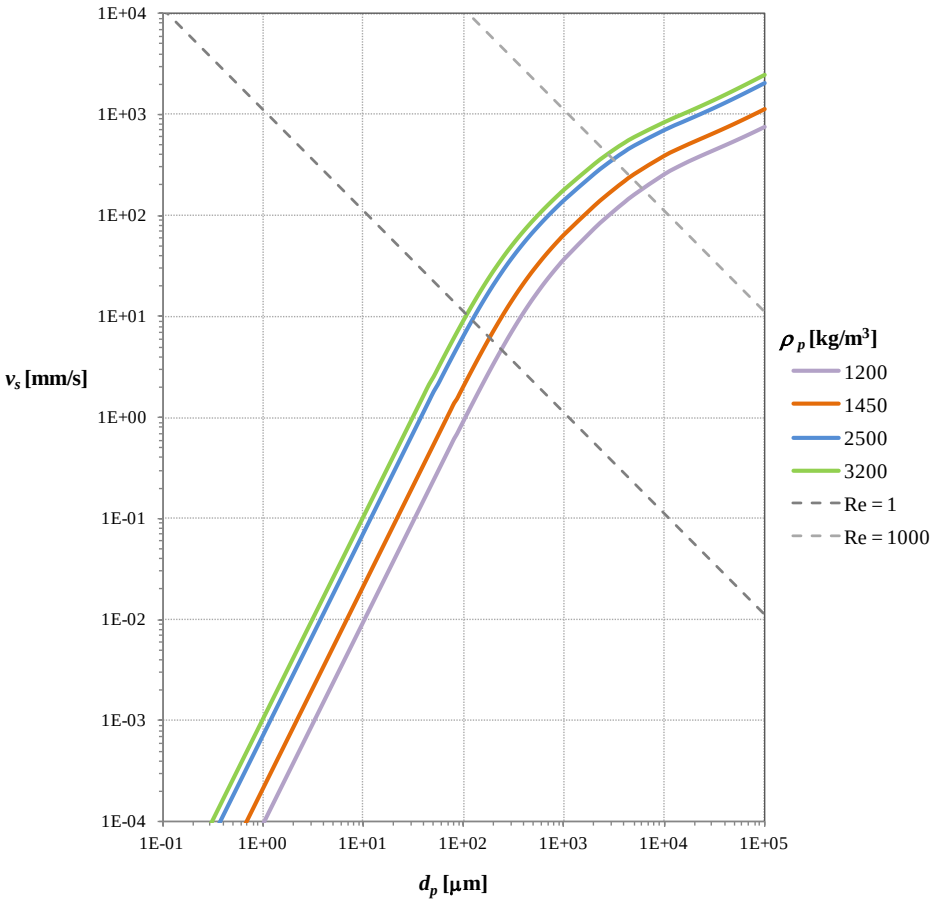
Grafikon 2.1: Koeficient upora okroglih delcev v odvisnosti od Reynoldsovega števila delca

Graph 2.1: Drag coefficient for spherical particles as a function of particle Reynolds number

Koeficient upora v turbulentnem režimu (znan tudi kot Newtonov režim) je neodvisen od Reynoldsovega števila delca in za okrogle delce znaša približno 0,44. Ko Reynoldsovo število delca doseže vrednost okrog 200 000, se koeficient upora nenadoma zmanjša in znaša le še 0,10 (Lin, 2001).

Do tega pride, ker se mejna plast tekočine odlepi od delca, s čimer trenje na delec občutno upade (Peker in Helvaci, 2008).

Grafikon 2.2 prikazuje hitrost usedanja okroglih delcev v vodi v odvisnosti od premera delca; za koeficient upora okroglih delcev je uporabljena zveza Brown in Lawler (2003), vrednosti gostote in dinamične viskoznosti medija pa sta upoštevani za vodo pri 15 °C (Priloga I: Preglednica I.1).



Grafikon 2.2: Hitrost usedanja okroglih delcev v vodi pri temperaturi 15 °C
Graph 2.2: Settling velocity of spherical particles at a water temperature of 15°C

Usedanje delca poljubne oblike

Enačbe za hitrost usedanja in koeficient upora so pri okroglih delcih vezane na prostornino in na ploščino pravokotne projekcije delca glede na smer gibanja. Ta dva geometrijska parametra je pri delcih nepravilnih oblik težko določiti, v naravi pa je takšnih delcev največ. Tudi sicer lepo zaobljeni rečni prodniki bodo le izjemoma imeli obliko popolne geometrijske krogle.

Da bi se okroglost kot subjektivno lastnost in nepravilne geometrijske oblike na splošno pripeljalo v svet merljivega, je bilo razvitih več enačb za določitev splošnih geometrijskih karakteristik. V nadaljevanju jih bo podanih le nekaj, na podlagi katerih se lahko izračuna efektivna ploščina projekcije in efektivna prostornina delca.

V veliki meri se kot karakteristična dimenzija delca poljubne oblike za določitev Reynoldsovega števila delca uporablja ekvivalentni prostorninski krogelni premer (Peker in Helvaci, 2008):

$$Re_p = \frac{\rho_m \cdot d_V \cdot v_s}{\mu_m} \tag{2.20}$$

kjer je: d_V ekvivalentni (prostorninski) krogelni premer delca poljubne oblike

Ekvivalentni (prostorninski) krogelni premer delca poljubne oblike d_V je premer krogle, ki bi imela enako prostornino kot obravnavani delec. Že iz same definicije sledi enačba za njegovo določitev:

$$d_V = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V_{p(1)}}{\pi}} \tag{2.21}$$

Wadell (1933) je za stopnjo okroglosti delca uvedel brezdimenzijsko število, ki ga je definiral kot količnik površine kroglice z ekvivalentim volumnom in dejanske površine obravnavanega delca poljubne oblike:

$$\Psi = \frac{\pi \cdot d_V^2}{S_p} \tag{2.22}$$

kjer je: S_p površina delca

Ekvivalentni premer površine projekcije d_A je tisti premer krogle, ki bi imela enako ploščino pravokotne projekcije kot obravnavani delec, in se ga izračuna po enačbi:

$$d_A = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{p(1)}}{\pi}} \tag{2.23}$$

kjer je: μ_m dinamična viskoznost medija (tekočine)

Pri neizometričnih delcih je treba upoštevati tudi njihovo orientacijo glede na smer gibanja, saj se s spremembo orientacije spremeni tudi njihova projekcija. Ker postanejo izpeljave enačb za določitev hitrosti usedanje ob upoštevanju spreminjajoče se lege neizometričnega delca še bolj zahtevne, je treba od primera do primera presoditi, za katere obravnavane fenomene je strogo analitičen pristop še smiseln in upravičen.

Empiričnih enačb, ki za delce nepravilnih oblik podajajo zvezo med koeficientom upora in Reynoldsovim številom delca, je veliko; v nadaljevanju bosta navedeni le dve. Chabbra et al. (1999) so na osnovi 1900 podatkovnih točk iz 19 neodvisnih eksperimentalnih študij (v območju Reynoldsovega števila delca $10^{-4} < Re_p < 10^5$ in v območju stopnje okroglosti $0{,}09 < \Psi < 1$) izdelali pregled izrazov, ki so bili na voljo za določitev upora delcev nepravilnih oblik. Izmed petih podrobneje pregledanih izrazov je najboljše ujemanje izkazala zveza, ki jo je predlagal Ganser (1993):

$$\frac{C_D}{K_2} = \frac{24}{Re_p \cdot K_1 \cdot K_2} \cdot \left[1 + 0{,}1118 \cdot \left(Re_p \cdot K_1 \cdot K_2\right)^{0{,}6567}\right] + \frac{0{,}4305}{1 + \frac{3305}{Re_p \cdot K_1 \cdot K_2}} \tag{2.24}$$

kjer sta: $K_1 = \left[\frac{1}{3} + \frac{2}{3} \cdot \Psi^{-0{,}5}\right]^{-1}$, za izometrične delce

$K_2 = 10^{1{,}8148 \cdot (-\log \Psi)^{0{,}5743}}$

Izraz (2.24) velja le za območje stopnje okroglosti 0,026 < Ψ < 1 in za območje $Re_p \cdot K_1 \cdot K_2 < 10^5$.

Celotna srednja napaka izračuna glede na eksperimentalne podatke je 16%, najbolj odstopajoče vrednosti dosegajo celo okrog 100% napako; kljub temu je enačba (2.24) izmed petih podrobneje pregledanih izrazov izkazala najboljše ujemanje z meritvami (Chabbra et al., 1999). Slabost te korelacije je v njeni uporabnosti, saj je pri neizometričnih delcih treba upoštevati tudi težko določljivo ploščino pravokotne projekcije delca v smeri gibanja.

Primerjalna analiza empiričnih zvez za določitev koeficienta upora delcev poljubne oblike (Chabbra et al., 1999) je pokazala relativno dobro ujemanje izračunov z eksperimentalnimi podatki tudi za enačbo, ki sta jo razvila Haider in Levenspiel (1989):

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \cdot \left[1 + e^{2,3288-6,4581\cdot\Psi+2,4486\cdot\Psi^2} \cdot Re_p^{0,0964+0,5565\cdot\Psi}\right] + \frac{Re_p \cdot e^{4,905-13,8944\cdot\Psi+18,4222\cdot\Psi^2-10,2599\cdot\Psi^3}}{Re_p + e^{1,4681+12,2584\cdot\Psi-20,7322\cdot\Psi^2-15,8855\cdot\Psi^3}} \tag{2.25}$$

Enačba (2.25) velja le za območje Reynoldsovega števila delca Re_p < 25 000 in za območje stopnje okroglosti 0,026 < Ψ < 1.

Če se v enačbi za določitev hitrosti usedanja okroglega delca (2.11) premer kroglice nadomesti z ekvivalentnim (prostorninskim) krogelnim premerom, dobi po preoblikovanju koeficient upora delca poljubne oblike še bolj poenostavljeno formulacijo (Peker in Helvaci, 2008):

$$C_d = \frac{4 \cdot d_V \cdot g \cdot (\rho_p - \rho_m)}{3 \cdot \rho_m \cdot v_s^2} \tag{2.26}$$

Usedanje delcev drugih neenakomernosti

Pojavnost neenakomernih delcev ne obsega samo delcev, ki niso pravilnih geometrijskih oblik. Predpostavke, na katerih slonijo enačbe usedanja okroglega delca, poleg okrogle oblike predvidevajo še togost, gladkost in enakomerno gostoto delca. Realni delci pa ne izpolnjujejo niti teh kriterijev.

Zato so bile razvite empirične zveze tudi za usedanje poroznih delcev (kot porozni delci so v literaturi obravani le aglomerati, tj. grozdne strukture iz manjših delcev) in pa delcev, katerih gostota ni enakomerna.

2.2.2 Ovirano usedanje delcev

Lastnosti usedanja trdnih delcev, med katerimi so medsebojni vplivi na proces usedanja zanemarljivo majhni, se razlikujejo od usedanja enakih suspendiranih delcev v gosti suspenziji.

Suspenzija in osnovne zveze

Masni delež oziroma utežno koncentracijo suspenzije po definiciji določa izraz:

$$c = \frac{m_p}{m_w + m_p} \tag{2.27}$$

kjer sta: m_p masa trdnih delcev v suspenziji

m_w masa vode v suspenziji

S preoblikovanjem enačbe (2.27) se lahko izrazi zveza med maso trdnih delcev in maso vode v suspenziji znane koncentracije:

$$c \cdot (m_w + m_p) = m_p$$

$$m_w + m_p = \frac{m_p}{c}$$

$$m_w = \frac{m_p}{c} - m_p$$

$$m_w = m_p \cdot \left(\frac{1}{c} - 1\right) \tag{2.28a}$$

$$m_p = m_w \cdot \left(\frac{c}{1-c}\right) \tag{2.28b}$$

Pri znani prostornini suspenzije in pri znanem masnem deležu se ob upoštevanju, da je prostornina suspenzije enaka vsoti prostornine vode in prostornine trdnih delcev, z vključitvijo enačbe (2.28b) lahko izpelje maso vseh suspendiranih delcev:

$$V = \mathrm{V_w} + \mathrm{V_p}$$

$$V = \frac{m_w}{\rho_w} + \frac{m_p}{\rho_p}$$

$$V = \frac{1}{\rho_w} \cdot m_p \cdot \left(\frac{1}{c} - 1\right) + \frac{1}{\rho_p} \cdot m_p$$

$$V = m_p \cdot \left[\frac{1}{\rho_w} \cdot \frac{1-c}{c} + \frac{1}{\rho_p}\right]$$

$$V = m_p \cdot \left[\frac{1-c}{\rho_w \cdot c} + \frac{1}{\rho_p}\right]$$

$$m_p = V \cdot \left[\frac{1-c}{\rho_w \cdot c} + \frac{1}{\rho_p}\right]^{-1} \tag{2.29}$$

kjer so: V_w prostornina vode

V_p skupna prostornina trdnih delcev v suspenziji

ρ_p gostota delcev

ρ_w gostota vode

Podobno kot pri predhodni izpeljavi se lahko izrazi tudi masa celotne vode v suspenziji:

$$V = \frac{m_w}{\rho_w} + \frac{m_p}{\rho_p}$$

$$V = \frac{1}{\rho_w} \cdot m_w + \frac{1}{\rho_p} \cdot m_w \cdot \frac{c}{1-c}$$

$$V = m_w \cdot \left[\frac{1}{\rho_w} + \frac{1}{\rho_p} \cdot \frac{c}{1-c}\right]$$

$$m_w = V \cdot \left[\frac{1}{\rho_w} + \frac{1}{\rho_p} \cdot \frac{c}{1-c}\right]^{-1} \tag{2.30}$$

Če je situacija obrnjena in je pri danem volumnu suspenzije znana skupna masa suspendiranih trdnih delcev, se lahko izrazi utežna koncentracija:

$$V = \frac{m_w}{\rho_w} + \frac{m_p}{\rho_p}$$

$$V = \frac{1}{\rho_w} \cdot m_p \cdot \left(\frac{1}{c} - 1\right) + \frac{1}{\rho_p} \cdot m_p$$

$$\frac{1}{c} - 1 = \left(\frac{V}{m_p} - \frac{1}{\rho_p}\right) \cdot \rho_w$$

$$c = \left[\left(\frac{V}{m_p} - \frac{1}{\rho_p}\right) \cdot \rho_w + 1\right]^{-1} \tag{2.31}$$

Pri oviranem usedanju se zaradi predpostavk, ki bodo predstavljene v nadaljevanju, fizikalne izpeljave in empirične enačbe pogosteje kot na masno koncentracijo navezujejo na prostorninski delež. Prostorninski delež trdnih delcev oziroma prostorninsko koncentracijo suspenzije v splošnem podaja enačba:

$$\varphi = \frac{V_p}{V} \tag{2.32}$$

Če se v enačbi (2.32) volumen suspenzije nadomesti z zvezo iz enačbe (2.29) in ob upoštevanju, da je količnik celotne mase delcev in celotnega volumna delcev enak gostoti delcev, sledi izraz za prostorninski delež trdnih delcev v suspenziji celotnega sistema usedalnika:

$$\varphi = \frac{V_p}{m_p} \cdot \left[\frac{1-c}{\rho_w \cdot c} + \frac{1}{\rho_p}\right]^{-1}$$

$$\varphi = \frac{1}{\rho_p} \cdot \left[\frac{1-c}{\rho_w \cdot c} + \frac{1}{\rho_p}\right]^{-1} \tag{2.33}$$

Hitrost usedanja delcev v suspenziji

V suspenziji, v kateri so razmiki med delci veliki, dvigajoči se tok izpodrinjene vode zaradi premika posameznega delca navzdol nima vpliva na usedanje sosednjih delcev. Ko pa se volumetrična koncentracija povečuje, delci začnejo omejevati površino, skozi katero izpodrinjena tekočina teče navzgor in s tem omejujejo gibanje navzdol (Casey, 1997). Usedanje pri takih pogojih se imenuje ovirano usedanje.

Hitrost usedanja delca v gosti suspenziji je bistveno manjša od hitrosti usedanja prosto padajočih delcev in je odvisna od prostorninskega deleža trdnih delcev (Peker in Helvaci, 2008). Hitrost oviranega usedanja delca se tako lahko izrazi s splošnim izrazom:

$$v_h = v_s \cdot \xi(\varphi) \tag{2.34}$$

kjer je: $\xi(\varphi)$ razmerje med hitrostjo oviranega usedanja in hitrostjo diskretnega usedanja delca kot funkcija prostorninskega deleža delcev

Ko se več delcev useda sočasno, izpodrinjena voda ustvarja navzgor usmerjen tok (nasprotno od smeri navzdol tonečih delcev). Trki med delci predstvljajo dejavnik, ki še dodatno zmanjšuje hitrost usedanja delcev (Peker in Helvaci, 2008)

Kynch (1952) je za suspenzije nizkih koncentracij uporabil Einsteinovo enačbo za hitrosti usedanja:

$$v_h = v_s \cdot \left(1 - \zeta \cdot \frac{c}{\rho_p}\right) \tag{2.35}$$

kjer je: ζ faktor, ki vključuje obliko in lego delca

Analitično izpeljavo za kvantitativno določitev funkcije prostorninskega deleža delcev $\xi(\varphi)$ je podal tudi Bond (1960). Izhajal je iz predpostavke, da se delci usedajo v okolju, kjer tokovno polje tekočine predstavljajo navzgor usmerjene hitrosti. Iz tega je sklepal, da je hitrost oviranega usedanja delca rezultanta njegove neovirane hitrosti usedanja (diskretno usedanje) in hitrosti toka tekočine.

$$v_h = v_s - v_{m.z} \tag{2.36}$$

kjer je: $v_{m.z}$ srednja hitrost medija oziroma tekočine v vertikalni smeri

Ko se oblak delcev v elementarnem volumnu useda, izpodrine nekaj tekočine, ki se pomakne navzgor s srednjo hitrostjo tekočine. Iz kontinuitetne enačbe za elementarni volumen se lahko izpelje hitrost oviranega usedanja:

$$v_h \cdot A_p = v_{m.z} \cdot \left(\Delta A - A_p\right)$$

$$v_h \cdot A_p = (v_s - v_h) \cdot \left(\Delta A - A_p\right)$$

$$v_h \cdot A_p = v_s \cdot \left(\Delta A - A_p\right) - v_h \cdot \Delta A + v_h \cdot A_p$$

$$v_h = v_s \cdot \left(1 - \frac{A_p}{\Delta A}\right) \tag{2.37}$$

kjer sta: A_p skupna površina projekcije prečnih prerezov delcev

ΔA ploščina osnovne ploskve elementarnega volumna

Če je obravnavani elementarni volumen kocka, katere stranica je dolga Δl, in je n število delcev na dolžini Δl, se lahko z vpeljavo srednjega ekvivalentnega prostorninskega krogelnega premera delca ter srednjega ekvivalentnega premera površine projekcije izrazi prostorninski delež delcev v elementarni kocki in skupna površina projekcije prečnih prerezov delcev:

$$\varphi = \frac{n^3 \cdot \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d_{V.m}^3}{\Delta l^3} \tag{2.38}$$

$$A_p = n^2 \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_{A.m}^2 \tag{2.39}$$

kjer sta: $d_{V.m}$ srednji ekvivalentni prostorninski krogelni premer delca

$d_{A.m}$ srednji ekvivaletni premer površine projekcije

Pojma ekvivalentnega prostorninskega krogelnega premera d_V in ekvivalentnega premera površine projekcije d_A sta bila prvič predstavljena v poglavju 2.2.1, kjer sta podana tudi izraza za njuno določitev, tj. enačba (2.21) za d_V in enačba (2.22) za d_A.

Če se enačbo (2.37) preoblikuje in v njej upošteva izraz (2.38), se dobi končni analitični izraz za zvezo med hitrostjo oviranega usedanja in hitrostjo diskretnega usedanja delca (Bond, 1960):

$$v_h = v_s \cdot \left(1 - \frac{n^2 \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_{A.m}^2}{\Delta l^2}\right)$$

$$v_h = v_s \cdot \left(1 - \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_{A.m}^2 \cdot \left(\frac{n}{\Delta l}\right)^2\right)$$

$$v_h = v_s \cdot \left(1 - \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_{A.m}^2 \cdot \left(\frac{6 \cdot \varphi}{\pi \cdot d_{V.m}^3}\right)^{2/3}\right)$$

$$v_h = v_s \cdot \left(1 - \left(\frac{3}{4}\right)^{2/3} \cdot \sqrt[3]{\pi} \cdot \frac{d_{A.m}^2}{d_{V.m}^2} \cdot \varphi^{2/3}\right) \tag{2.40a}$$

oziroma:

$$\xi(\varphi) = 1 - \left(\frac{3}{4}\right)^{2/3} \cdot \sqrt[3]{\pi} \cdot \frac{d_{A.m}^2}{d_{V.m}^2} \cdot \varphi^{2/3} \tag{2.40b}$$

Za okrogle delce se izraz nekoliko poenostavi in velja:

$$\xi(\varphi) = 1 - \left(\frac{3}{4}\right)^{2/3} \cdot \sqrt[3]{\pi} \cdot \varphi^{2/3} \tag{2.41}$$

2.2.3 Kyncheva teorija usedanja

Projektiranje usedalnikov je vrsto let slonelo le na empiričnih dognanjih, dokler ni George Kynch leta 1952 razvil prvega fizikalnega modela za usedanje v vodnem stolpcu (Helmig et al., 2006; David et al., 2009). Od takrat je imela njegova objava največji vpliv na razvoj obravnave zgoščevanja (Tory et al., 1999).

Kynch (1952) je razvil enodimenzionalni model za usedanje v vodnem stolpcu. Upošteval je, da je začetna koncentracija enakomerna (popolno premešana suspenzija), nato se trdni delci začnejo usedati in ustvarijo se trije sloji: čista voda, sloj suspenzije in usedlina na dnu. Na koncu ostaneta le še čista voda in usedlina. Kyncheva teorija temelji na šestih predpostavkah:

- Koncentracija trdnih delcev je v vodoravni smeri enakomerna.
- Vpliv sten je zanemarljiv - posoda je dovolj velika, da se zanemari motnje zaradi strižnih napetosti vzdolž stene.
- Trdni delci in tekoča faza so nestisljivi, med njimi ni masnega prenosa.

- Trdni delci so podobnih velikosti in oblik.
- Hitrost usedanja je odvisna samo od lokalne koncentracije trdnih delcev.
- Hitrosti konvergirajo k vrednosti nič, koncentracija konvergira k maksimalni vrednosti (konec usedanja).

V poglavju bodo podani le osnovni analitični temelji teorije usedanja. Kynch (1952) je obravnavo fenomena usedanja začel pri konceptu, da je koncentracija funkcija treh prostorskih spremenljivk in časa:

$$\varphi = f(x, y, z, t) \tag{2.42}$$

kjer so: x, y, z koordinate kartezičnega koordinatnega sistema

t čas

Zaradi predpostavke, da je koncentracija v vsakem horizontalnem prerezu konstantna, prvi dve spremenljivki odpadeta in sledi enodimenzijska obravnava procesa:

$$\varphi = f(z, t) \tag{2.43}$$

Kyncheva teorija usedanja temelji na kvazilinearni hiperbolični enačbi prvega reda:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial f_{bd}(\varphi)}{\partial z} = 0 \qquad \text{za } 0 < z < H_{c.0},\ t > 0 \tag{2.44}$$

kjer so: $H_{c.0}$ začetna višina stolpca suspenzije

$f_{bd}(\varphi)$ funkcija gostote šaržnega toka

Iz predpostavk izhajajo začetni in robni pogoji fenomena:

$$\varphi(z, t) = \varphi_0 \qquad \text{za } 0 < z < H_{c.0}, \tag{2.45a}$$

$$\varphi(0, t) = \varphi_\infty \qquad \text{za } t > 0 \tag{2.45b}$$

$$\varphi(H_{c.0}, t) = 0 \qquad \text{za } t > 0 \tag{2.45b}$$

kjer so: φ_0 začetna koncentracija suspenzije

φ_∞ končna koncentracija na dnu

Matematična analiza procesov usedanja se je začela s Kynchevim enodimenzionalnim kinematičnim modelom usedanja (Helmig et al., 2006). Znanstveniki so iz teorije usedanja izpeljali enačbe in podali prve analitične rešitve. Dobro desetletje po objavi teorije usedanja (Kynch, 1952) so primerjave eksperimentalnih raziskav s steklenimi kroglicami pokazale odlično kvalitativno in zadovoljivo kvantitativno ujemanje empiričnih podatkov z analitičnimi rešitvami za šaržno usedanje (Shannon et al., 1963; Shannon et al., 1964).

Kyncheva objava je spodbudila industrijo, da je začela vlagati sredstva v raziskave o možnostih uporabe te nove teorije pri načrtovanju usedalnikov (Tory et al., 1999). Nekatere predpostavke, na katerih temelji teorija usedanja, v realnih usedalnikih niso izpolnjene. Biološko blato in aktivna pulpa

ne izpolnjujeta kriterijev idealne suspenzije (suspendirani delci so enotne velikosti, okrogli, monodisperzni in nestisljivi), realni usedalniki imajo stene, predvsem pa je v usedalnikih s kontinuirnim delovanjem prisotna izrazita hidrodinamika. Zaradi teh odstopanj so znanstveniki Kynchev model nadgrajevali in izpolnjevali.

Razvit in potrjen s poskusi v vodnem stolpcu je bil model usedanja aktivnega blata zaradi vpliva stisljivosti (Zhang et al., 2006). Diehl (2000) je razrešil matematične probleme, ki se tičejo robnih pogojev zgoraj, na dnu in na vtoku. Številni raziskovalci (Bürger in Concha, 1998; Bürger et al., 1999; Garrido et al., 2000; Bürger et al., 2000 a; Garrido et al., 2004; Bürger et al., 2005) so razvijali funkcije in komponente, s katerimi so v model usedanja vključili procese kosmičenja.

Matematični modeli šaržnega usedanja so tako danes že izpolnjeni do te mere, da je v večini primerov ujemanje eksperimentalnih podatkov in rezultatov numeričnih modelov zadovoljivo. Nove komponente in nadgradnje, ki nastajajo, pa z manjšimi finesami popravljajo še zadnje manjše napake ali rešujejo posebnosti specifičnih suspendiranih delcev (van Deventer et al., 2011).

Na drugi strani pa so hidrodinamične razmere v naknadnih usedalnikih precej bolj razgibane, njihovo delovanje pa je posledično mnogo bolj kompleksno. Zato še danes številna vprašanja o usedalnikih s kontinuirnim delovanjem ostajajo odprta.

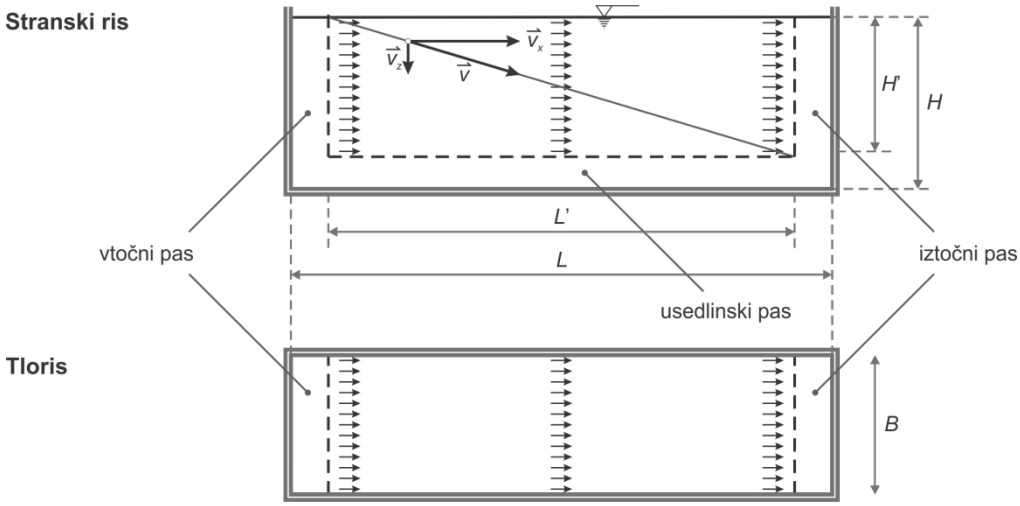
2.3 Usedalniki s kontinuirnim delovanjem

Grobo gledano se usedalniki glede na način obratovanja delijo na šaržne in tiste s kontinuirnim delovanjem. Šaržni so obremenjeni enkratno (s šaržo), usedanje v njih pa poteka v mirujoči tekočini, brez prisotnosti hidrodinamike. Drug tip obratovanja je kontinuirni – skozi usedalnik s takim delovanjem se ves čas pretaka voda (sveža suspenzija vstopa na vtoku, del vode zapušča usedalnik kot iztok, k dinamiki pa pripomore še vračanje povratnega blata), ki ves čas sovpliva na tokovne razmere v usedalniku. Ker je v praksi šaržnih usedalnikov v popolnem pomenu besedne zveze malo in ker disertacija obravnava delovanje usedalnikov s kontinuirnim delovanjem, bodo tudi v teoretičnem delu podrobneje opisani le ti.

2.3.1 Koncept idealnega usedalnika

Klasično teorijo o učinkovitosti usedalnika s kontinuirnim delovanjem je razvil Hazen (1904). Njegova teorija sloni na konceptu idealne vodoravne cone usedanja (Slika 2.3), v kateri ni motenj zaradi vtoka in iztoka in v kateri poteka diskretno usedanje, tako da se delci usedajo prosto v mirnih razmerah. Tok naj bi bil stalen, hitrost tekočine pa enakomerna v celotni usedalni komori.

Tako kot Hazen (1904) je tudi Camp (1936) izhajal iz idealne tokovne slike usedalnika (Slika 2.3), ki jo predstavljajo vzporedne horizontalne tokovnice, trdni delci v usedalniku pa naj bi se usedali s konstantno hitrostjo. Predpostavil je, da so delci enakomerno porazdeljeni znotraj prečnega prereza toka in da se delci, ki so se že usedli, ne vračajo več v tok. Procesov kosmičenja, turbulence in drugih vplivov naj ne bi bilo.



Slika 2.3: Hidrodinamične razmere v "idealnem" usedalniku
Figure 2.3: Hydrodynamic conditions in an "ideal" settling tank

Delec naj bi se gibal po premici z enakomerno hitrostjo, ki se jo lahko razdeli na dve komponenti: na komponento hitrosti v horizontalni smeri ter na komponento v vertikalni smeri (Slika 2.3):

$$\vec{v} = \vec{v}_x + \vec{v}_z \tag{2.46a}$$

$$\vec{v} = v_x \cdot \vec{e}_x - v_z \cdot \vec{e}_z \tag{2.46b}$$

kjer so: $\vec{v}$ vektor hitrosti delca

v_x komponenta hitrosti delca v smeri koordinatne osi x

v_z komponenta hitrosti delca v smeri koordinatne osi z

$\vec{e}_x$ enotski vektor v smeri koordinatne osi x (bazni vektor)

$\vec{e}_z$ enotski vektor v smeri koordinatne osi x (bazni vektor)

Vertikalna komponenta hitrosti delca je po velikosti enaka hitrosti usedanja:

$$v_z = v_s \tag{2.47}$$

Če je v_d hitrost usedanja delca, ki je ravno dovolj velika, da se delec, ki vstopa v usedalnik na višini vodne gladine (Slika 2.3), med pomikanjem proti iztoku še usede, mora veljati razmerje:

$$\frac{v_d}{v_x} = \frac{H'}{L'} \tag{2.48}$$

kjer sta: H' globina idealne usedalne cone

L' dolžina idealne usedalne cone

Vsi delci, katerih hitrost usedanja je višja ali enaka v_d, se bodo še usedli; medtem ko se bodo delci, katerih hitrost usedanja je manjša od v_d, izločili iz tekočine v razmerju v_s/v_d.

Iz kontinuitetne enačbe za enakomerni tok izhaja preprosta zveza:

$$v_x = \frac{Q}{A'}$$

$$v_x = \frac{Q}{B \cdot H'} \tag{2.49}$$

kjer so: Q pretok skozi usedalnik

A' ploščina prečnega prerez idealne usedalne cone

B širina usedalnika

Izračun minimalne hitrosti usedanja delcev, ki se bodo po modelu idealnega usedalnika v celoti izločili iz odpadne vode, se lahko izrazi z združitvijo enačb (2.48) in (2.49):

$$v_d = \frac{Q}{B \cdot H'} \cdot \frac{H'}{L'}$$

$$v_d = \frac{Q}{B \cdot L'} \tag{2.50}$$

S teoretičnega vidika je Camp (1946) na primeru "idealnega usedalnika" pokazal, da je učinkovitost diskretnega usedanja v naknadnem usedalniku odvisna samo od površinske obremenitve, ne pa tudi od globine usedalnika oziroma od zadrževalnega časa (Casey, 1997). To seveda ne drži.

Dobra štiri desetletja po objavi prve teorije usedanja (Hazen, 1904) je Anderson (1945) prišel do zaključka, da se gostotnim tokovom v naknadnih usedalnikih ni mogoče izogniti in da bo načrtovanje usedalnika, ki tega pojava ne bo upoštevalo, kaznovano s slabo učinkovitostjo. Žal pa Anderson ni bil tisti, ki bi začrtal smernice nadaljnjega razvoja načrtovanja usedalnikov. Raziskovalno poročilo, ki ga je l. 1946 objavil Camp, je imelo dolga leta velik vpliv na predstavo o tem, kakšna naj bi bila praksa dimenzioniranja usedalnikov (Ueberl, 1995). Tako se je opis ideala pojavljal v številnih virih. Thirmurthi (1969) je zapisal, da v idealnem usedalniku tekočina neovirano potuje od vtoka proti iztoku brez disperzije v prečni smeri; tekočinski delci potujejo v vzporednih trajektorijah. Dolga leta je veljala tudi zahteva, da je treba za učinkovito delovanje usedalnika gostotni tok v njem zatreti; inženirji pa naj bi naknadne usedalnike načrtovali v duhu idealne tokovne slike, saj naj bi po prepričanju strokovnjakov (Lee et al., 1976; Stukenberg et al. 1983; Tekippe in Bender, 1987; Bretscher et al., 1992) takšen enakomeren tok pogojeval najvišjo učinkovitost usedalnika.

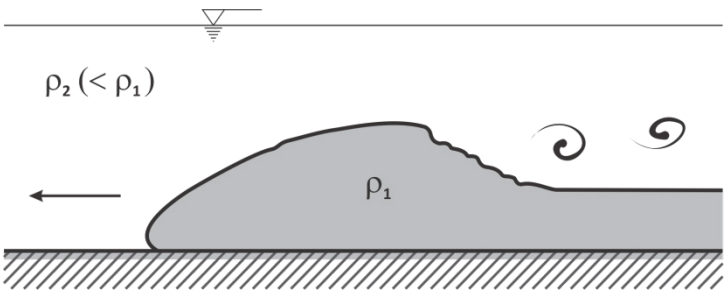
Prizadevnost za doseganje enakomernega in stabilnega tokovnega polja v usedalniku kot nujnega za učinkovito sedimentacijo so Cordoba-Molina et al. (1979) označili kot težavo, ki je okužila načrtovalce usedalnikov.

2.3.2 Gostotni tokovi

Že v poglavju 2.3.1 je bilo večkrat nakazano, da dejanske razmere v usedalniku niso podobne enakomerni laminarni tokovni sliki. Pojav, ki se mu je v naknadnem usedalniku praktično nemogoče izogniti, so težnostni oziroma gostotni tokovi. Ti so glavni "krivec", ki kroji hidrodinamiko v usedalni komori in jo oddaljuje od koncepta idealnega usedalnika. Zato bodo v nadaljevanju predstavljeni gostotni tokovi na splošno, kasneje pa še podrobneje gostotni tokovi, ki se pojavljajo v usedalnikih.

Kaj so gostotni tokovi?

Obširen članek, v katerem je Benjamin (1968) obravnaval številne hidrodinamične probleme težnostnih tokov s fizikalnega vidika, predstavlja prelomnico na tem področju. Težnostni tok ali gostotni tok je večinoma horizontalno gibanje tekočine ene gostote znotraj tekočine druge gostote (Lowe et al., 2002) in je v naravi pogost pojav. Nastopi takrat, ko je gostota tekočine horizontalno nehomogena; slednje povzroči gradientno silo tlaka, ki poganja relativno gibanje med gostejšimi in redkejšimi deli tekočine (Malačič, 1998). Gonilna sila pojava izvira iz razlike v gostoti med tekočinama, do katere lahko pride zaradi prisotnosti suspendiranih delcev ali raztopljenih snovi (npr. slana voda) ali pa zaradi temperaturnih razlik med tekočinama (Simpson, 1982).



Slika 2.4: Oblika težnostnega toka (povzeto po Benjamin, 1968)
Figure 2.4: Form of gravity current (adopted from Benjamin, 1968)

Za gostotni tok je značilno čelo vala, ki se dvigne približno dvakrat višje kot se nahaja srednja višina mejne ploskve in na zadnjem delu katerega je območje visoke turbulence (Slika 2.3). Te lastnosti naj bi bile skupne mnogim različnim fizikalnim fenomenom, ki se jih lahko uvrsti med težnostne tokove (Benjamin, 1968).

Sodobnejši raziskovalci (npr. White in Helfrich, 2012) so z nadgradnjo modela, ki ga je predstavil Benjamin (1968), gostotne tokove v dvoslojni stratificirani tekočini razvrstili v nove podkategorije glede na obliko in tokovanje, neposredno povezano z režimom toka.

Gostotni tokovi v usedalniku

Po Andersonu (1945) je bilo rezultatov raziskav, iz katerih je bilo moč sklepati, da je v naknadnem usedalniku praktično nemogoče zagotoviti enakomeren tok z laminarnimi lastnostmi, vedno več. Tay in Heinke (1983) sta izdelala eksperimentalno študijo, v kateri sta izvedla točkovne meritve hitrosti na treh prototipih: na enem pravokotnem in na dveh krožnih usedalnikih. Tokovni vzorci, ki sta jih pridobila, so nakazovali na obstoj pomembnega dvodimenzionalnega toka v vertikalni ravnini, ki je kompleksen in neenakomeren. Tudi kasneje so drugi raziskovalci (npr.: DeVantier in Larock,1987; Krebs, 1991) tej ugotovitvi pritrdili in dodali, da so v naknadnih usedalnikih praviloma prisotni gostotni tokovi, ki močno vplivajo na hitrostno polje. Pri tem pa je pomembna predvsem razlika v gostoti med dotekajočo suspenzijo in medijem v usedalni komori.

Vedno večji pomen, ki se je pripisoval gostotnim tokovom, je na področju naknadnih usedalnikov spodbudil zagon novih eksperimentalnih raziskav in razvoj obstoječih fizikalnih in numeričnih modelov.

Z vključitvijo novih komponent, ki simulirajo fenomen težnostnega toka na dnu in povratnega toka v zgornji plasti usedalnika, so bili posodobljeni analitični (Guetter in Jain, 1991; Dupont in Dahl, 1995) in numerični (DeVantier in Larock, 1986; DeVantier in Larock, 1987; Zhou in McCorquodale, 1992; Zhou et al., 1992; Zhou et al., 1994; Kim et al., 2005) modeli.

Dvoslojna tokovna struktura

Poudarjen težnostni tok na dnu in povraten tok v zgornjem sloju je standarden vzorec v usedalniku s kontinuirnim obratovanjem, ki je opisan v znanstveni literaturi (Ueberl, 1995; Deininger et al., 1998; De Clercq, 2003; Bajcar et al., 2011).

Gostotni tok se pri vtoku potopi na dno usedalne komore, teče vzdož dna do zunanje stene, se dvigne in v zgornjem sloju usedalnika inducira povratni tok. Ena veja toka zapusti usedalnik preko iztočnega preliva, drugo veja se usmeri nazaj proti vtočnemu jašku. Veliko let se povratni tok pri dimenzioniranju usedalnikov ni upošteval, čeprav lahko ta znaša tudi do 200 odstotkov dotoka (Ueberl, 1995). V literaturi sta se uveljavila izraza tok po dnu (*bottom current*) in povratni tok (*recirculation current*). Pri dolžini težnostnega toka ima pomembno vlogo hidravlična obremenitev, tj. velikost dotoka (Ueberl, 1995).

Temperaturni gostotni tokovi

Kot posebnost velja omeniti gostotne tokove, ki jim botruje temperaturna razlika. Ti običajno nastopijo pozimi. Ker je sveža suspenzija toplejša kot medij v usedalniku, pride do vzgonskih sil, ki

spremenijo smer glavnega krožnega toka (Goula et al., 2008). Tok sveže suspenzije se od vtoka proti iztoku usmeri diagonalno, tj. po najkrajši možni poti. Pri tovrstnih gostotnih tokovih, ki jih poganja temperaturna razlika zaradi hladnega medija, med znanstveniki ni dileme o tem, ali je njihov vpliv pozitiven ali negativen. Takšen učinek zadržuje delce v dotekajoči suspenziji, zaradi česar je usedanje manj učinkovito in kakovost vode na iztoku slabša (Zhou et al., 1994).

Poleg temperaturnih razlik med svežo suspenzijo in prevladujočo temperaturo v usedalniku, so raziskovalci (Taebi-Harandy in Schroeder, 2000; Wells in Laliberte, 1998) preučevali tudi temperaturno stratifikacijo zaradi večjega prenosa toplote v zgornjem sloju usedalnika.

Wells in Laliberte (1998) sta pozimi na treh čistilnih napravah opravila meritve temperatur in hitrosti na usedalnikih. Meritve temperatur sta izvedla v različnih točkah, tako da sta beležila odvisnost temperature od globine in od oddaljenosti od vtoka. Njuna študija je pokazala, da so gostotni tokovi in nestabilni temperaturni gradienti pogosti ter da so površinske temperature za približno 1 °C nižje od tistih na dnu.

Vpliv gostotnih tokov na učinkovitost

V obdobju, ko so načrtovalci naknadnih usedalnikov težili k idealni tokovni sliki, se je gostotnih tokov trdno oprijel negativen predznak. Še danes med znanstveniki in v stroki ni enotnega prepričanja, ali se jim slab vpliv pripisuje upravičeno ali ne. Glede na nasprotujoča si dognanja je seveda možno, da je njihov vpliv pri določenih pogojih slab, pri drugih pa dober.

Testi na prototipih, ki jih je izvedel Knop (1966), so pokazali, da laminarne razmere niso nujno najbolj ugodne za usedanje aktivnega blata. Na preučevani čistilni napravi je iztok iz naknadnega usedalnika vseboval previsoke koncentracije glinenega prahu in premoga. Zato je Knop (1966) v vtočnem delu uvedel mešalno lopatico, s čimer je povečal lokalno turbulenco, sprememba pa se je odrazila v boljšem kosmičenju in učinkovitosti čiščenja. Dokazal je, da mešanje za vtokom po učinkovitosti bistveno prekaša običajno izvedbo floakulatorjev, tj. z ločeno komoro za kosmičenje brez mešanja.

Koniček in Burdych (1988) sta ugotovila, da gostotni tokovi nimajo nujno negativnega učinka. Opazila sta tudi, da v nekaterih primerih območje nad gostotnim tokom ni nujno neaktivno, ampak izkazuje podobnosti s tokom v vertikalnih usedalnikih.

Številni laboratorijski poskusi, izvedeni na različnih tipih usedalnikov, (Bajcar et al., 2011; Krebs et al., 1998; van Marle and Krannenburg, 1992) so pokazali, da gostotni tokovi lahko tudi stabilizirajo tokovno sliko in izboljšajo učinkovitost usedalnika.

Konstrukcijske rešitve za odpravo gostotnih tokov

V številnih objavah je izraženo stališče, da je treba za povečano učinkovitost usedalnika gostotni tok omiliti s konstrukcijskim elementom (Bretscher in Hager, 1990; Bretscher et al., 1992; Krebs, 1992).

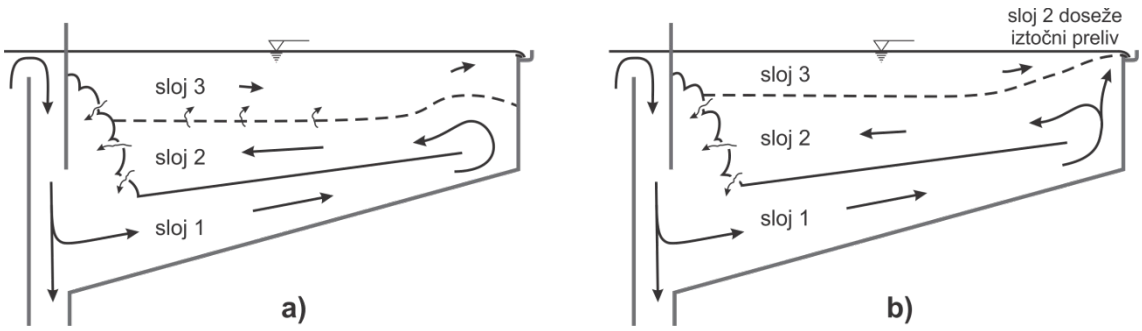
Nekateri avtorji navajajo uspehe pri odpravljanju gostotnih tokov in višje učinkovitosti z ustrezno izbiro konstrukcijskih elementov. Koníček in Burdych (1988) sta s testi na naknadnih usedalnikih prišla do zaključka, da je gostotni tok odločilnega pomena in da se lahko njegovi negativni učinki odpravijo z namestitvijo globokega vtoka in ureditvijo iztočnega preliva čim bližje vtoka. Tudi

Bretscher et al. (1992) navajajo, da je treba gostotni tok usmeriti na dno usedalnika in da je v tem primeru učinek spremenjene geometrije vtoka izreden.

Druga skupina avtorjev je prišla do povsem nasprotnih ugotovitev. Anderson (1945) opisuje eksperimente na prototipu, s katerimi so preverili vpliv za kar 25 različnih ureditev vtoka, in izkazalo se je, da noben tip pregrade nima večjega vpliva na učinkovitost. Tudi Taebi-Harandy in Schroeder (2000) sta za preučevane primere ugotovila, da konfiguracija konstrukcijskih elementov v usedalniku ne more preprečiti oz. vplivati na gostotne tokove v naknadnih usedalnikih in da povzroči le manjše spremembe v tokovni sliki.

Troslojna tokovna struktura

Številne eksperimentalne raziskave so pokazale, da se standardni začetni dvoslojni tokovni vzorec pri določenih pogojih spremeni in preoblikuje v troslojni tok (Kim et al., 2003), ki izboljša učinkovitost usedalnika (Bajcar et al., 2011; Krebs et al., 1998; van Marle and Krannenburg, 1992). V tem primeru se namreč sveža suspenzija ob zunanji steni komore obrne nazaj proti vtoku še preden doseže iztočni preliv, s čimer je učinek kratkega krogotoka zadušen in čas, ko se delci zadržujejo v usedalniku, podaljšan (Bajcar et al., 2011). Poleg tega se v zgornjem sloju v smeri proti iztoku izoblikuje šibek tok nizke koncentracije, ki še dodatno izboljša kakovost suspenzije na iztoku iz usedalnika.



Slika 2.5: Troslojna struktura toka v krožnem usedalniku a) troslojna struktura; b) troslojna struktura s kratkim krogotokom (povzeto po van Marle in Kranenburg, 1994)

Figure 2.5: Three-layer structure in a circular settling tank a) three-layer structure; b) three-layer structure with short circuiting (adopted from van Marle and Kranenburg, 1994)

Tudi nemški standard ATV-DWK-A 131E (2000) predpostavlja troslojno tokovno strukturo in pri dimenzioniranju narekuje upoštevanje štirih delnih globin oziroma funkcionalnih območij: območje čiste vode, ločevalno obmčje oz. območje povratnega toka, območje gostotnega toka oz zadrževalno območje ter območje zgoščevanja in odstranjevanja usedline. Območje čiste vode zgoraj – po standardu minimalna višina tega sloja znaša 0,5 metra – služi kot varnostni sloj, ki naj bi uravnotežil neizogibne vplive vetra, gostotne razlike ali neenakomerne površinske obremenitve.

2.3.3 Brezdimenzijska števila

Pri reševanju številnih fizikalnih problemov so brezdimenzijska števila nekakšen univerzalni pokazatelj razmer oziroma stanja, ki se vzpozstavijo pri obravnavanem fenomenu. Enako velja tudi pri obravnavi usedalnikov.

Froudovo število

Froudovo število pri pojavih v usedalnikih nima bistvenega pomena (van Marle in Kranenburg, 1994), vseeno pa je indikator stabilnosti toka (Casey, 1997). Hidrodinamična stabilnost je pomembna zato, da se zmanjša vpliv motečih vplivov (npr. veter in gostotni tokovi) na hitrostno polje toka.

Za izbrani prečni prerez usedalnika se Froudovo število določi po enačbi:

$$Fr = \frac{\overline{v}^2}{g \cdot R} \tag{2.51}$$

kjer so: $\overline{v}$ srednja hitrost toka v izbranem prečnem prerezu

g gravitacijski pospešek

R hidravlični radij

Hitrost toka v izbranem prečnem prerezu se določi po kontinuitetni enačbi za nestisljive tekočine:

$$\overline{v} = \frac{Q}{A} \tag{2.52}$$

kjer sta: Q prostorninski pretok

A ploščina izbranega prečnega prereza

Z izjemo vtočnega profila je enačba (2.52) samo pavšalna ocena hitrosti toka, ki pa so jo za določitev teoretičnega densimetričnega Froudovega števila v sredinskem prerezu že uporabili Krebs et al. (1998).

V pravokotnem usedalniku z ravnim dnom je hidravlični radij enak v vseh prečnih prerezih; določi se ga z enačbo:

$$R_r = \frac{B \cdot H}{B + 2 \cdot H} \tag{2.53}$$

kjer sta: B širina usedalnika

H višina usedalnika

V krožnem usedalniku s poševnim dnom je hidravlični radij odvisen od oddaljenosti od središča; izpeljava prinese preprosto zvezo:

$$R_c = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot h}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

$$R_c = h \tag{2.54}$$

kjer sta: r razdalja od središča usedalnika

h višina usedalnika v izbranem prečnem prerezu

Stabilnost toka v pravokotnem usedalniku se poveča z zmanjševanjem prečnega prereza in podaljševanjem dolžine, kar pa ni v skladu z zahtevami po zmanjšanju turbulence in po preprečevanju spodjedanja usedline na dnu (Casey, 1997). Pri krožnih usedalnikih se Froudovo število z oddaljenostjo od središča manjša, zaradi česar je stabilnost toka v bližini oboda slabša.

Froudovo densimetrično število

Brezdimenzijsko število, ki najbolje upošteva relativen pomen vztrajnostnih in gostotnih sil težnosti v usedalniku, je densimetrično Froudovo število.

Za izbrani prečni prerez usedalnika se teoretično densimetrično Froudovo število določi po enačbi:

$$Fr_d = \frac{\overline{v}}{\sqrt{\varepsilon \cdot g \cdot h}} \tag{2.55}$$

kjer sta: ε relativna razlika v gostoti med dotekajočo suspenzijo in okoliškim medijem

h višina toka v izbranem prečnem prerezu

Relativno razliko v gostoti podaja enačba:

$$\varepsilon = \frac{\rho_{in} - \rho_{st}}{\rho_{st}} \tag{2.56}$$

kjer sta: ρ_{in} gostota sveže suspenzije na vtoku v usedalnik

ρ_{st} gostota medija oz. suspenzije v komori usedalnika

Gostoto suspenzije vode in trdnih delcev se lahko zelo preprosto izrazi s prostorninskim deležem delcev:

$$\rho = \varphi \cdot \rho_p + (1 - \varphi) \cdot \rho_w \tag{2.57}$$

kjer je: ρ_w gostota vode

Zveza med gostoto suspenzije in masno koncentracijo je linearna, a vendar ne povsem enostavna. Izpeljava se začne pri osnovni definiciji gostote:

$$\rho = \frac{m_w + m_p}{V} \tag{2.58}$$

$$\rho = \frac{m_w + m_p}{m_p} \cdot \frac{m_p}{V}$$

če se v predhodnji enačbi upoštevata zvezi (3.4) in (2.29), se lahko izrazi enačba gostote suspenzije v odvisnosti od masnega deleža:

$$\rho = \frac{1}{c} \cdot \frac{m_p}{V}$$

$$\rho = \frac{1}{w} \cdot \left[\frac{1-w}{\rho_w \cdot w} + \frac{1}{\rho_p}\right]^{-1}$$

$$\rho = \frac{1}{c} \cdot \left[\frac{\rho_p - c \cdot \rho_p + \rho_w \cdot c}{\rho_w \cdot c \cdot \rho_p}\right]^{-1}$$

$$\rho = \frac{\rho_w \cdot \rho_p}{\rho_p - c \cdot \rho_p + \rho_w \cdot c}$$

$$\rho = \frac{\rho_w}{1 - c + \frac{\rho_w}{\rho_p} \cdot c}$$

$$\rho = \frac{\rho_w}{1 - c \cdot \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_p}\right)} \tag{2.59}$$

Reynoldsovo število

Reynoldsovo število je pokazatelj režima toka v usedalniku. V realnih usedalnikih so praviloma turbulentne razmere in Reynoldsovo število je tisto, ki kvantificira stopnjo turbulence; določi se ga z izrazom:

$$Re = \frac{R \cdot \overline{v}}{\nu_m} \tag{2.60}$$

kjer je: ν_m kinematična viskoznost medija (tekočine)

2.3.4 Delovanje usedalnika in Froudovo densimetrično število

Brezdimenzijsko število, ki najbolje upošteva relativen pomen vztrajnostnih in gostotnih sil težnosti v usedalniku, je densimetrično Froudovo število. V obravnavi tokovnih razmer v usedalniku je pomen teoretičnega Foudovega densimetričnega števila upoštevalo že več avtorjev (Zhou et al., 1992; Krebs et al., 1998; Kim et al., 2005), pri čemer je bil izbrani prečni prerez ali na vtoku ($Fr_{d.0}$) ali na sredini ($Fr_{d.m}$) usedalnika.

Eksperimentalne študije

Krebs et al. (1998) so preučevali zvezo med vrednostjo Froudovega densimetričnega števila in pojavom troslojne strukture toka na modelu pravokotnega usedalnika. Spreminjali so geometrijo ter obratovalne pogoje (koncentracijo in pretok). Poročali so, da se je pri Froudovem densimetričnem številu v sredinskem prerezu komore usedalnika $Fr_{d.m}$ = 0,08 delno, pri a $Fr_{d.m}$ = 0,04 pa v celoti razvilo troslojno tokovno polje.

Opozoriti pa je treba, da so Krebs et al. (1998) Froudovo densimetrično število na vtočnem profilu računali na neobičajen način, saj so pri računu prečnega prereza namesto višine odprtine uporabili razdaljo od dna usedalnika do težišča vtočne odprtine. Ta nenavaden pristop jim je sicer pomagal

primerjati različne izvedbe konstrukcijskih detajlov znotraj lastne študije, vendar je to nehvaležno za nadaljnje primerjave.

Van Marle in Kranenburg (1994) sta na fizičnem modelu usedalnika izvedla primerjalno analizo delovanja usedalnika pri različnih geometrijskih detajlih. V vseh poskusih je bilo Froudovo densimetrično število na vtoku 0,11 in v vseh primerih se je vzpostavila troslojna tokovna slika. Učinkovitost čiščenja se pri različnih izvedbah vtoka ni bistveno razlikovala.

Dokazano je, da je pojav ugodnega troslojnega toka v komori usedalnika povezan s teoretičnim densimetričnim številom (Krebs et al., 1998), vendar pa mejna vrednost za krožni usedalnik še ni bila določena.

V okroglih usedalnikih naj bi se v primerjavi s pravokotnimi usedalniki formirali plitvejši in hitrejši gostotni tokovi (Moursi et al., 1995), zato karakteristični razponi Froudovega densimetričnega števila morda niso enaki (Krebs et al., 1998).

Numerični modeli

Zhou at al. (1992) so izdelali študijo na okroglem naknadnem usedalniku. Z numeričnim modelom, verificiranim na podlagi niza eksperimentalnih podatkov, so prišli do ugotovitve, da je delovanje usedalnika optimalno, če je Froudovo densimetrično število na vtoku med 0,38 in 0,58.

Glede na vrednost Froudovega densimetričnega števila so vpliv gostotnih učinkov suspendiranih delcev na hidrodinamiko v usedalniku v numerični študiji preučili Kim et al. (2005). Prišli so do ugotovitev, da sta pri nižjih Froudovih densimetričnih številih tok po dnu in povratni tok bolj izrazita, učinki gostotnega toka pa so podobni ne glede na to, ali je usmerjevalna stena (pregrada) prisotna ali ne. Pri višjih Froudovih densimetričnih številih pa je numerični model izkazoval večjo vlogo pregrade; takrat je imela tako njena višina kot njena postavitev (oddaljenost od vtočnega jaška) precejšen vpliv na učinkovitost čiščenja. Kim et al. (2005) so intenzivnost toka ob dnu in povratnega toka kvantificirali tako, da so upoštevali relativno razmerje pretoka toka ob dnu oziroma povratnega toka glede na pretok skozi usedalnik:

$$k_{bc} = \frac{Q_{bc}}{Q} \tag{2.61}$$

$$k_{rc} = \frac{Q_{rc}}{Q} \tag{2.62}$$

kjer so:
- k_{bc} intenzivnost toka ob dnu
- k_{rc} intenzivnost povratnega toka
- Q_{bc} prostorninski pretok toka ob dnu
- Q_{rc} prostorninski pretok povratnega toka

2.4 Hidravlično modeliranje usedalnikov

Na številna splošna ali specifična vprašanja v hidrotehniki se išče odgovore s pomočjo hidravličnega modeliranja. To obsega na eni strani fizično ter na drugi strani matematično in numerično modeliranje. Podobno kot pri ostalih hidravličnih fenomenih je tudi pri usedalnikih modeliranje obeh vrst povezano; rezultati s fizičnih modelov služijo za kalibracijo in validacijo numeričnih modelov.

Matematični oziroma fizikalni modeli predstavljajo strukturo osnovnih enačb in robnih pogojev, ki naj bi veljali za nek fenomen. Izpeljave temeljijo na privzetih predpostavkah o pogojih (npr. režim toka) in o fizikalnih dejavnikih, ki jih zaradi majhnega vpliva na fenomen lahko zanemarimo (npr. zračni upor). Fizikalni model običajno že vključuje številne predpostavke in s tem povezane poenostavitve, a je včasih še vedno lahko analitično nerešljiv in predstavlja zgolj koncept. Tu nastopijo numerični modeli.

Numerični modeli rešujejo analitično nerešljive matematične probleme na podlagi različnih numeričnih pristopov (npr. metoda končnih elementov, metoda končnih razlik, koncept korektne diskretizacije enačb, metoda linij idr.). Obstajajo številna numerična orodja, tako komercialna kot znanstveno-raziskovalna, ki omogočajo modeliranje z določenega hidravličnega področja, recimo za tok s prosto gladino, za vodovodne sisteme, za premeščanje plavin. Z njimi se lahko rešuje matematične probleme za konkreten objekt – znanih razsežnosti in drugih fizikalnih lastnosti – ob predpostavki, da so dognane ključne fizikalne zakonitosti fenomena. Numerični model je namreč, tako kot matematični, zasnovan na privzetih predpostavkah in če so te napačne, tudi model ne bo dajal pravilnih rešitev. Ker numerično modeliranje ni bilo predmet te disertacije, bo predstavitev numeričnih modelov v nadaljevanju izpuščena.

Raziskave na fizičnih modelih se izvajajo za različne namene. Lahko se modeli uporabljajo v fazi načrtovanja konkretnega objekta, da se optimizirajo izvedbeni detajli in se poišče najbolj ustrezna rešitev. To običajno pride v poštev le pri zahtevnejših projektih, kjer je investicija v fizično modeliranje finančno vzdržna in upravičena. Pogosteje se preučujejo fizikalni pojavi, pri katerih so nekatera vprašanja še odprta, rezultati eksperimentov pa služijo kot podlaga za nadgradnjo obstoječega znanja.

Poskusi praviloma potekajo v laboratoriju pri nadzorovanih pogojih. Fizični hidravlični model je običajno pomanjšan, v nekaterih primerih pa tudi povečan prikaz situacije vodnega toka. Hidravlično modeliranje ne sme biti oddvojeno od osnovne teorije mehanike tekočin. Da bi bile eksperimentalne raziskave učinkovite in uporabne, morajo slediti teoretičnim smernicam, ki izhajajo iz osnovnih hidravličnih principov, in teoriji o hidravlični modelni podobnosti.

2.4.1 Hidravlična modelna podobnost

Fizični hidravlični modeli so zgrajeni v izbranem modelnem merilu. Ustrezna točnost na modelu pridobljenih rezultatov je dosežena le takrat, kadar so upoštevane zakonitosti o podobnosti pojava na prototipu in na modelu. Mehanska podobnost modela in prototipa je osnovni pogoj, da so količine, merjene na fizičnem modelu, smiselne tudi po preračunu veličin z modela na dejanske veličine fenomena v naravi. Hidravlične razmere na fizičnem modelu so podobne tistim na prototipu, kadar model izkazuje: podobnost oblike (geometrijska podobnost), podobnost gibanja (kinematična podobnost) in podobnost sil (dinamična podobnost) (Chanson, 2004).

Geometrijska podobnost

Geometrijska podobnost se nanaša na enakost razmerij med dolžinami na modelu in v naravi. Geometrijsko merilo dolžin modela pove, kolikokrat so dimenzije modela pomanjšane v primerjavi s prototipom:

$$\lambda_L = \frac{L_M}{L_P} \tag{2.63}$$

kjer sta: L_M tipična dolžina na modelu usedalnika

L_P tipična dolžina na prototipu usedalnika

Tipično razmerje med dolžinami na modelu usedalnika in dolžinami na prototipu (λ_L) je 1:20 (Moursi et al., 1995).

Popačenih oziroma distorziranih modelov, pri katerih je treba upoštevati dve geometrijski merili dolžin (eno za vodoravne razsežnosti in drugo za navpične razsežnosti), pri študijah usedalnikov praviloma ni.

Kinematična podobnost

Dve gibanji sta kinematično podobni, kadar se ohranjajo enaka razmerja med karakterističnimi hitrostmi na modelu in na prototipu, oziroma, kadar so tokovne slike gibanja na modelu in v naravi geometrijsko podobne.

Razmerje hitrosti na modelu in hitrosti na prototipu:

$$\lambda_v = \frac{v_M}{v_P} \tag{2.64}$$

kjer sta: v_M tipična hitrost na modelu

v_P tipična hitrost na prototipu

Tipično razmerje med hitrostmi na modelu usedalnika in hitrostmi na prototipu je (λ_v) je približno 2:1 (Moursi et al., 1995).

Dinamična podobnost

Dve gibanji sta dinamično podobni, kadar se ohranjajo enaka razmerja med silami, ki vplivajo na gibanje na modelu in v naravi, oziroma, kadar so na modelu in na prototipu enaka razmerja med masami predmetov, ki so vpletena v gibanje.

Razmerje sil na modelu in sil na prototipu:

$$\lambda_F = \frac{F_M}{F_P} \tag{2.65}$$

kjer sta: F_M aktivna sila na modelu

F_P aktivna sila na prototipu

Tradicionalne modelne raziskave se izvajajo z uporabo geometrijsko podobnih modelov. Pri geometrijsko podobnih modelih je resnična dinamična podobnost dosežena samo takrat, kadar imajo vsi brezdimenzijski parametri enako vrednost na modelu in prototipu. V praksi je zato težko zadostiti vsem kriterijem modelne podobnosti. Pri večini hidravličnih situacij je mogoče doseči geometrijsko in kinematično modelno podobnost, dinamične pa ne v celoti (Chanson, 2004). Pri preučevanju hidravličnega problema je zato treba definirati tiste dejavnike oziroma sile, ki so gonilo procesa oziroma imajo prevladujoč vpliv na obravnavan fenomen. Iz tega mora potem izhajati tudi odločitev za brezdimenzijske parametre, ki bodo vodilo za prenos veličin s prototipa na model. Smotrna je odločitev za Froudov zakon, če pri gibanju tekočine prevladuje težnost, Reynoldsov zakon, če ima na gibanje tekočine največji vpliv viskoznost, Eulerjev zakon, če prevladujejo izključno sile tlaka (vpliv viskoznosti in težnosti pa je zanemarljiv), Webrov zakon modelne podobnosti, če ima najpomembnejši vpliv na gibanje površinska napetost.

Zakoni modelne podobnosti pri usedalnikih

Froudovo število pri usedalnikih nima večje vloge (van Marle in Kranenburg, 1994), zato se pri hidravličnem modeliranju usedalnikov daje prednost Froudovemu densimetričnemu (zaradi prisotnosti gostotnih tokov) in Reynoldsovemu (zaradi turbulence) številu.

Čeprav Reynoldsovo število v primerjavi s Froudovim densimetričnim številom ni tako pomembno, je vseeno zaželeno, da je ujemanje tega števila na modelu in prototipu čim večje, zato da se zagotovi podobnost turbulentnih razmer (van Marle in Kranenburg, 1994). Vzpostavitev turbulentnih razmer toka lahko predstavlja izziv pri fizičnem hidravličnem modeliranju usedalnikov. Nekateri raziskovalci (Krebs et al., 1995) priznavajo, da jim to ni uspelo v vseh conah usedalnika, a so turbulenco zagotovili v tistih delih, ki so bili za raziskavo najzanimivejši. Van Marle in Kranenburg (1994) pa sta zaradi (pre)nizkih Reynoldsovih števil na modelu, iz katerih bi sledile laminarne razmere toka, turbulenco na modelu vsilila z vpihovanjem zraka v vtočni cevi.

Teoretično Froudovo densimetrično število se lahko definira na podlagi (Krebs et al., 1995)

- kakršnekoli karakteristične srednje hitrosti,
- kakršnekoli karakteristične globine vode
- in razlike v gostoti med vtokom in čisto vodo.

Enačba (2.55), po kateri se določi Froudovo densimetrično število, je bila predstavljena že v poglavju 2.3.3.

Modeliranje gostotnih tokov zahteva, da imata model in prototip enako Froudovo densimetrično število (Moursi et al., 1995), zato mora ob upoštevanju enačbe (2.55) veljati:

$$\frac{\varepsilon_M}{\varepsilon_P} = \left(\frac{v_M}{v_P}\right)^2 \cdot \frac{L_M}{L_P} \tag{2.66}$$

kjer so: ε_M relativna razlika v gostoti med dotekajočo suspenzijo in okoliškim

medijem na modelu usedalnika

ε_P relativna razlika v gostoti med dotekajočo suspenzijo in okoliškim medijem na prototipu usedalnika

Da se v modelu ustvarijo turbulentne razmere, podobne tistim v prototipu, morajo biti hitrosti v modelu usedalnika višje. Višje hitrosti spremenijo Froudovo densimetrično število, zato je na ta račun treba povečati relativno razliko v gostoti.

Moursi et al. (1995), ki so učinek gostotnih tokov v eksperimentalni študiji dosegali z nizkimi temperaturami tekočine na vtoku, so temperaturno razliko še povečali, da bi dosegli enako razmerje med silami vztrajnosti (inercija) in silami težnosti. V tem primeru modelno podobnost temperaturnega Froudovega densimetričnega števila definira izraz (Moursi et al., 1995):

$$\frac{\beta_M \cdot \Delta T_M}{\beta_P \cdot \Delta T_P} = \left(\frac{v_M}{v_P}\right)^2 \cdot \frac{L_M}{L_P} \tag{2.67}$$

kjer so: β_M temperaturni koeficient prostorninskega raztezka na modelu usedalnika

β_P temperaturni koeficient prostorninskega raztezka na prototipu usedalnika

ΔT_M razlika v temperaturi modelirane dotekajoče suspenzije in medija v modelu usedalnika

ΔT_P razlika v temperaturi dotekajoče suspenzije in medija v usedalniku (nanaša se na prototip usedalnika)

2.4.2 Modeliranje suspendirane snovi

Kadar hidravlični model obravnava fenomen, ki poleg tekočine (običajno vode) vključuje tudi trdne delce, je v fazi priprav na poskuse treba izbrati tudi material, ki bo na modelu služil kot suspendirana snov. Modeliranje aktivnega blata, ki bi vključevalo prav vse lastnosti tega materiala, ni mogoče; vseeno se lahko z izbiro delcev ustreznih hitrosti usedanja in ustrezne relativne razlike v gostoti doseže, da so značilnosti toka na prototipu in na modelu skladne (Krebs et al., 1998).

Modelna podobnost delcev

Delci morajo izpolnjevati zakone modelne podobnosti, pri čemer je ključno, da se doseže kinematična podobnost hitrosti usedanja (van Marle in Kranenburg (1994):

$$\frac{v_{s.M}}{\frac{Q_M}{A_{st.M}}} = \frac{v_{s.P}}{\frac{Q_P}{A_{st.P}}} \tag{2.68}$$

kjer so: $v_{s.M}$ tipična hitrost usedanja na modelu

$v_{s.P}$ tipična hitrost usedanja na prototipu

Q_M pretok skozi model usedalnika

Q_P pretok skozi prototip usedalnika

$A_{st.M}$ ploščina tlorisne površine modela usedalnika

$A_{st.P}$ ploščina tlorisne površine modela usedalnika

Da delci izpolnjujejo kriterij ustreznosti hitrosti usedanja, je treba upoštevati njihovo velikost, gostoto in obliko. Ker je količnik pretoka in ploščine tlorisne površine v enačbi (2.68) višji za model kot za prototip, morajo biti hitrosti na modelu višje od hitrosti na prototipu; kar velja tudi za hitrosti usedanja. Iz tega sledi, da bi bilo aktivno blato s čistilne naprave neustrezno za modeliranje suspendirane snovi (van Marle in Kranenburg, 1994).

Druge zahteve in zaželjene lastnosti

Poleg omenjenega kriterija kinematične podobnosti je za lažje preučevanje procesov dobrodošel še barvni kontrast med delci in medijem, za manj dvoumno interpretacijo podatkov fizičnega modeliranja pa tudi monodisperznost in okrogla oblika delcev. Poglavje zase je modeliranje delcev, kadar ima v obravnavanem usedalniku pomembno vlogo proces kosmičenja, saj je takrat treba doseči tudi ekvivalente karakteristike kosmičenja.

Pregled načinov za doseganje gostotnih tokov

Pri usedalnikih je ustrezna izbira 'modelnih delcev' lahko nemajhen izziv, kar dokazuje tudi pestra zastopanost uporabljenih materialov. Pregled izvedenih eksperimentalnih raziskav na naknadnih usedalnikih pokaže, da so znanstveniki relativno razliko v gostoti med dotekajočo suspenzijo in medijem v usedalniku dosegali na veliko različnih načinov:

- s temperaturno razliko
  (Moursi et al., 1995; Kim et al., 2003)
- s slano vodo
  (Lyn, 1992)
- z glinenim prahom
  (Krebs, 1991; Krebs et al., 1995; van Marle in Krannenburg, 1994)
- z diatomejsko prstjo
  (Thirumurthi, 1969)
- s steklenimi delci
  (Krebs et al., 1998; Kim et al., 2003)
- z mleto lešnikovo lupino
  (Gosar et al., 2009; Bajcar et al., 2010, Bajcar et al., 2011)

Izmed naštetih pristopov ne gre vedno za suspendirane trdne delce. Temperaturna razlika in slana voda, ki je raztopina in ne suspenzija, zagotavljata razlike v gostoti in s tem oblikovanje gostotnih tokov. Težje pa je presoditi, kako visoka je analogija procesov samega "usedanja" med dvofaznim tokom tekočine in trdnih delcev na prototipu in zgolj tekočino oziroma raztopino na modelu. Kim et al. (2003) so v laboratorijski raziskavi, v kateri so gostotne tokove modelirali enkrat s temperaturno razliko in drugič s steklenimi delci, ugotovili, da sta imela toplotni gostotni tok in gostotni tok zaradi delcev v začetnem nestalnem stanju podobno strukturo, kasneje pa se je toplotni gostotni tok preoblikoval v nestratificirane nevtralne razmere.

Že večkrat je bil v poskusih uporabljen glineni prah. Van Marle in Kranenbrg (1994) sta uporabila kaolinit, katerega gostota znaša približno 2600 kg/m^3. S kaolinitom sta uspela izpolniti kriterij kinematične podobnosti, manj zadovoljna pa sta bila s procesom kosmičenja. Njuni pomisleki glede uporabljene gline so bili, da je bil pri dani temperaturi in kemijski sestavi vode v laboratoriju proces kosmičenja preveč intenziven. Ocenila sta, da je bilo kosmičenje bolj izrazito kot pri aktivnem blatu, zaradi česar naj bi bila učinkovitost usedanja na modelu preveč optimistično napovedana.

S steklenimi kroglicami so že Shannon et al. (1963) za šaržno usedanje delcev preučevali veljavnost Kyncheve teorije usedanja. De Rooij (1999), ki je izvedel eksperimentalno raziskavo usedanja tokov suspenzije v geometrijsko zaprtih sistemih (ne nujno usedalnik), je steklene delce opisal kot idealen modelni material, ki pa ga zaradi prevelikih stroškov ni uporabil. Velika prednost steklenih delcev je, da so na voljo v zelo majhnih velikostih (najmanjši celo do 10 μm), so gladki, togi in jih trg ponuja tudi v okrogli obliki. Pri steklenih delcih tudi ne pride do kosmičenja (Krebs et al., 1998), zato so odlična izbira, kadar se raziskava osredotoča na hidravlične vplive v usedalniku. Gostota stekla je seveda višja od vode in znaša približno 2500 kg/m^3.

Mleta lešnikova lupina je organski material, katerega gostota je nizka (okrog 1450 kg/m^3), a še vedno dovolj velika, da delci v vodi tonejo. Material se je izkazal kot izrazito reološko občutljiv – starost suspenzije (čas, ko so bili delci pred poskusom namočeni v vodi) je močno vplivala na lastnosti usedanja (Gosar et al., 2009). Zato je zelo pomembno, da je starost suspenzije nadzorovana in enotna. Poskusi, ki obravnavajo (tudi) reološke procese, so, kar se tiče enotnosti, seveda izvzeti.

Poskusi z enotno gostoto

Presenetljivo veliko eksperimentalnih študij je bilo izvedenih s čisto vodo, v gostotno nevtralnih razmerah (Thirumurthi, 1969; López et al.; 2008). Razlogov za to je lahko več: slabo poznavanje in s tem podcenjevanje vpliva gostotnih tokov ter zahtevna izbira primernih modelnih delcev.

López et al. (2008) so analizirali hidrodinamične razmere na modelu pravokotnega usedalnika kot funkcijo toka in tipa vtoka. Za kvalitativno vizualizacijo so v model vnesli barvilo in snemali dogajanje na modelu.

Ker so številni avtorji (npr. Jamshidnia et al., 2010) potrdili, da se tokovne razmere v usedalniku pri nevtralnih gostotnih pogojih močno razlikujejo od realnih, ko so prisotni trdni delci ali pa vsaj drug vir razlike v gostoti (temperaturna razlika, slanost), se lahko oceni, da pristop, ki so ga ubrali omenjeni raziskovalci, sloni na napačnem konceptu. To pomeni, da je žal tudi rezultate vseh teh raziskav treba jemati zelo zadržano oziroma jih raje sploh ne upoštevati.

2.4.3 Prilagoditev modela

V primerjavi s pravokotnimi usedalniki, ki so enostavno pomanjšana replika prototipa, je pri okroglih usedalnikih zelo pogosta prilagoditev modela tako, da se uporabi zgolj krožni izsek usedalnika (Samstag et al., 1992; Mccorquodale in Zhou, 1993; van Marle in Kranenburg, 1994; Moursi et al., 1995; Kim et al., 2003; Bajcar et al., 2010; Bajcar et al., 2011). Razlog za takšne odločitve številnih raziskovalcev je preprosto v tem, da se v okroglem usedalniku ne bi dalo opazovati razmer, ki nastanejo v vertikalnih ravninah. Te pa so pri preučevanju usedalnika, kjer izjemno vlogo igrajo gostotni tokovi in je največja teža raziskav ravno v usedanju delcev (v vertikalni smeri), zelo

pomembne. Opazovanje toka zgolj od zgoraj bi pomenilo prikrajšanost za poznavanje tistih ključnih procesov, ki se odvijajo v usedalniku.

Obsežnejše študije, ki bi preučila upravičenost uporabe krožnega izseka oziroma določila napako, ki jo takšna prilagoditev prinese, ni. Je pa pomembna primerjava rezultatov dveh eksperimentalnih raziskav, ki sta obravnavali isti prototip krožnega usedalnika: McCorquodale (1976) je izvedel poskuse na polnem tridimenzionalnem modelu, Moursi et al. (1995) pa so izvedli poskuse na modelu, ki je predstavljal krožni izsek prototipa (20°). Primerjava študij je pokazala, da so gostotni tokovi na dnu in pod gladino polnega modela usedalnika podobni tistim v krožnem izseku (Moursi et al., 1995).

2.5 Merilne metode

Za določitev učinkovitosti ostoječih usedalnikov ali raziskovanja možnosti izboljšav učinkovitosti so potrebne meritve na prototipih in modelih usedalnika. Zato bo v nadaljevanju podan pregled merilnih metod, ki se uporabljajo pri usedalnikih in njihovih modelih.

Čiščenje vode v usedalniku pogojujejo težnostne sile, ki delujejo na trdne delce. Tok v naknadnih usedalnikih ni zgolj enakomeren in laminaren (DeVantier in Larock,1987; Ueberl, 1995). Zato je kljub preprostemu principu čiščenja, pri katerem glavno delo opravijo težnostne sile, ki delujejo na trdne delce, delovanje usedalnika zelo kompleksno. Poleg hidrodinamičnih razmer, ki so neposredno povezane z konstrukcijo usedalnika in operativnimi parametri (hidravlična obremenitev, koncentracija dotekajoče odpadne vode) na usedanje vplivajo še velikost in oblika delcev ter reološki dejavniki. Iz vsega naštetega je razvidno, da je pri preučevanju usedanja nujno čim boljše razumevanje oziroma poznavanje lastnosti usedanja, tokovne slike, koncentracij in fizikalnih lastnosti suspendiranih delcev, kot so velikost, gostota in oblika. Pri določanju vseh teh vplivov igrajo pomembno vlogo meritve. Zaželeno je, da se podatke zajema z visoko frekvenco (saj je v usedalnikih včasih prisotna hitra dinamika procesov), z visoko prostorsko resolucijo (zaradi lokalnih vplivov na usedanje) in seveda z veliko natančnostjo (Vanrolleghem et al., 2006).

Poglavje podaja pregled merilnih metod, ki se uporabljajo za merjenje veličin pri usedalnikih (in situ) ter pri fizičnih hidravličnih modelih v laboratoriju.

2.5.1 Določanje koncentracije trdnih delcev

Učinkovito vodenje in kontrola delovanja komunalne čistilne naprave zahtevata od vzdrževalca dovolj znanja o sestavi vtoka, iztoka in vmesnih procesnih tokov vode (Roš, 2001). Zbiranje tovrstnih podatkov je sestavni del obratovalnega monitoringa čistilne naprave.

Značilno območje vsebnosti trdnih delcev za surovo odpadno vodo je 10 do 20 ml/l, za odpadno vodo po primarnem čiščenju pa od 0,1 do 1,0 ml/l (Roš, 2001). Koncentracija trdnih delcev na vtoku in iztoku iz usedalnika sta ključna parametra za določitev učinkovitosti čiščenja. Za preučevanje procesov, ki se dogajajo v usedalniku, pa je dobrodošlo tudi spremljanje polja koncentracij v sedimentacijski komori.

V tem poglavju bodo predstavljeni nekateri postopki, ki se uporabljajo za merjenje koncentracije trdnih delcev na vtoku in iztoku iz naknadnega usedalnika ter v usedalniku samem. Zraven sodijo tudi laboratorijske meritve v okviru raziskav na fizičnih modelih usedalnika. Bolj kot na meritvah v okviru obratovalnega monitoringa, bo poudarek na meritvah, ki se izvajajo v raziskovalne namene.

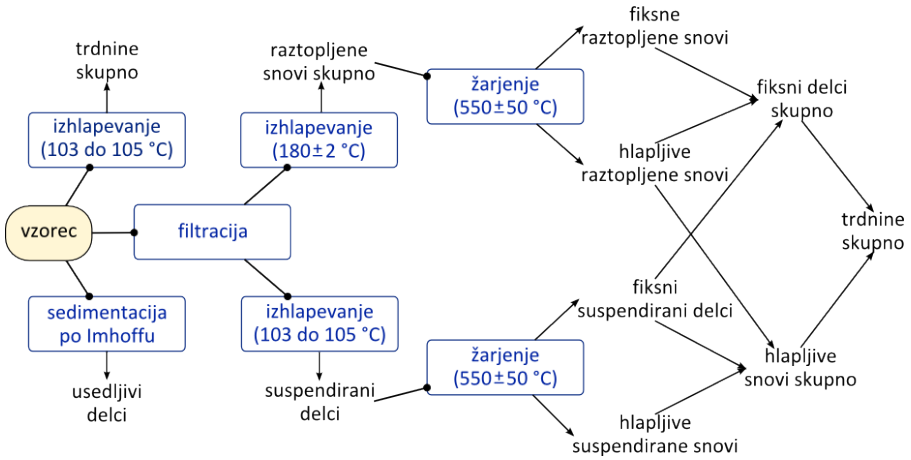
Določitev koncentracije v vzorcih

Vzorčenje je najstarejša in najosnovnejša podlaga za določitev vsebnosti snovi v vodi. Strogo gledano odvzem vzorca tekočine iz dinamičnega vodnega sistema ne predstavlja točkovne meritve niti po času (čas odvzemanja) niti po prostoru (volumen vzorca). Ker pa je čas odvzemanja običajno dovolj kratek, volumen odvzetega vzorca pa relativno majhen, sta časovna in prostorska komponenta pri vzorcu praviloma zanemarljivi. Pri laboratorijskih raziskavah se fenomen preučuje na modelu usedalnika, ki je večinoma nekajkrat manjši od prototipa; zato je pomembno, da so odvzemi relativno majhni glede na skupno prostornino suspenzije v sistemu.

Na voljo je več metod za sam odvzem vzorca ter več metod, s katerimi se odvzetemu vzorcu določi koncentracija. Najpreprostejši in zelo pogost je ročni odvzem, pri katerem se vzorce zajame v zbirno posodo. Tehnološko zahtevnejši je odvzem vzorcev s črpanjem, pri katerem se vzorec izsesa iz sistema. Če se z odvzemom ne sme vplivati na hidrodinamične razmere (velja tudi pri preučevanju usedalnikov s kontinuirnim delovanjem), mora biti hitrost črpanja vzorca izokinetična, tj. enaka hitrosti lokalnega toka na mestu odvzema. Krebs et al. (1998) so pri študiji tokovnih razmer na modelu pravokotnega usedalnika ta kriterij izločili in uporabili najmanjšo možno hitrost črpanja, črpanje pa je potekalo v smeri prevladujočega toka ali pravokotno na tok, če so bile hitrosti izrazito majhne (blizu nič). Ugotovili so namreč, da je pri nizkih hitrostih zahtevi po izokinetičnem odvzemu težko zadostiti, saj bi en sam odvzem trajal ogromno časa, poleg tega bi se nekaj delcev usedlo že v sesalni cevi, kar bi omajalo verodostojnost vzorca.

Vzorce je priporočljivo analizirati takoj po odvzemu. Kadar to ni možno, je treba vzorce do analize hraniti v hladilniku pri 4 °C, da se minimalizira mikrobiološka razgradnja delcev (Radojević in Bashkin, 2006). Če pa so v vodi prisotni samo anorganski trdni delci, reoloških sprememb v vzorcu ni pričakovati.

Trdnine v vodi se lahko razdeli v več kategorij: raztopljene, suspendirane, usedljive, fiksne in hlapljive (Radojević in Bashkin, 2006). Izbiro postopka določanja koncentracij trdnih delcev v vodi pogojuje ravno vrsta delcev, ki so prisotni v vzorcu (Slika 2.6).



Slika 2.6: Shema analiziranja vsebnosti trdnin v vodi (povzeto po Radojević in Bashkin, 2006)
Figure 2.6: Analysis scheme for solids in water (adopted from Radojević and Bashkin, 2006)

Vsebnost usedljivih delcev se določa volumetrično, z uporabo Imhoffovega lija (Radojevič in Bashkin, 2006). To je prozorna stožčasta posoda za sedimentacijo, ki omogoča odčitavanje prostornine usedline. V primerjavi s klasičnim merilnim valjem je ta metoda veliko bolj natančna, saj je razmerje med gradientom višine usedline in prostornino usedline zaradi značilne stožčaste oblike ugodnejše. Po standardnem postopku se v lij za sedimentacijo po Imhoffu vlije liter vzorca, nato pa se po dveh urah odčita prostornino delcev, posedenih v konici (Roš, 2001). Imhoffov lij je bil pri analiziranju vzorcev pri študijah usedalnikov v laboratoriju in na prototipih uporabljen mnogokrat (npr. Bajcar et al., 2011).

Analiza vsebnosti suspendiranih delcev se lahko izvede s postopkom filtracije in sušenja (Slika 2.6). Vzorec se najprej filtrira skozi standardni filter iz steklenih vlaken znane teže, nato pa suši pri 103 do 105 °C (Radojevič in Bashkin, 2006). Na koncu postopka se vzorec skupaj s filtrom stehta in od

dobljene vrednosti odšteje maso filtra. Pri laboratorijski študiji na modelu usedalnika so na tak način vsebnost delcev v vzorcih analizirali Krebs at al., 1998.

Van Marle in Kranenburg (1994) sta koncentracijo vzorcev, ki sta jih vsakih šest minut odvzela na iztoku iz modela usedalnika, določala z merilnikom kalnosti oziroma turbidmetrom Hach. Metoda ni prikazana na shemi analiziranja vsebnosti trdnin v vodi (Slika 2.6), saj ne gre za enega od osnovnih niti samostojnih principov določanja koncentracije. Odčitke turbidmetra se namreč lahko poveže s pripadajočimi koncentracijami samo na podlagi kalibracijskih krivulj, pridobljenih z meritvami znanih koncentracij uporabljene suspendirane snovi.

Optične metode za merjenje koncentracije in situ

Optični merilniki koncentracije merijo koncentracijo delcev v suspenziji na podlagi merjenja prepustnosti svetlobe. Če so v vodi prisotni delci, ti prepuščajo manj svetlobe kot čista voda. Optični senzorji zaznavajo razlike v intenziteti svetlobnega žarka zaradi absorpcije in razpršitve svetlobe, ki jo povzročijo delci (Barczewski, 1990).

Razpršitev svetlobe je funkcija ploščine prečnega prereza delca (sorazmerna s kvadratom premera delca), medtem ko je koncentracija sorazmerna s prostornino delca (sorazmerna s kubom premera delca). Odčitke z merilnika je zato vedno treba povezati s pripadajočimi koncentracijami na podlagi kalibracijskih krivulj, ki se jih pridobi z meritvami znanih koncentracij uporabljene suspendirane snovi (van Marle in Kranenburg, 1994; Krebs et al., 1998).

Strogo gledano je metoda omejena na monodisperzne suspenzije in tiste heterodisperzne suspenzije, katerih relativna razporeditev delcev se ne spreminja v prostoru in času (Krebs et al., 1998). Kljub temu, da biološko blato na usedalnikih ne izpolnjuje tega pogoja, je bila v nekaterih študijah (Ueberl, 1995; Deininger, 1998) ta metoda uporabljena tudi za meritve na prototipu. Pri meritvah (predvsem na realnih usedalnikih) je treba vložiti veliko truda v izločitev zunanjih vplivov na odbito svetlobo, ki jo meri sprejemna sonda. Ueberl (1995) v ta namen priporoča, da je sonda nameščena najmanj 0,2 metra od zunanje stene usedalnika.

V eksperimentalni študiji na modelu usedalnika so optični merilnik uporabili van Marle in Kranenburg (1994). Na izbranih mestih sta bila nameščena vtočna in iztočna komponenta merilnika. Suspenzija je bila vsesana v merilnik, v stekleno cev, na katero sta bili nameščeni dve diodi. Prva dioda je oddajala infrardečo svetlobo, druga dioda pa je merila, za koliko je bila oddana svetloba zmanjšana zaradi prisotnosti delcev. Na tak način so bile merjene koncentracija na vtoku in koncentracije v štirih vertikalah v sedimentacijski komori modela usedalnika.

Podobno kot pri odvzemih vzorcev s črpanjem (Krebs et al., 1998) tudi pri optičnih merilnikih koncentracije lahko predstavlja težavo usedanje delcev v kiveti (van Marle in Kranenburg, 1994). Težave so najbolj izrazite, kadar je hitrost toka skozi kiveto nizka.

Fotogrametrične metode

Optične in fotogrametrične metode za določitev koncentracije so v svojem jedru zelo podobne. Prve in druge temeljijo na razmerju med koncentracijo opazovane suspenzije in deležem svetlobe, ki jo ta suspenzija prepušča. Optični merilniki zaznavajo prepuščanje svetlobe *in situ*, na mestu samem, in povečini je meritev invazivna (van Marle in Kranenburg, 1994; Ueberl, 1995; Krebs et al., 1998).

Pri fotogrametričnih metodah se za analizo trenutnega ali stacionarnega stanja posname fotografija; kadar je pomembna časovna dinamika, pa se preučevani proces v naravi ali na modelu posname. Prepuščanje svetlobe ves čas snemanja beleži kamera. Večina današnjih kamer ima privzeto nastavitev, da zaznava osvetljenost okolice in temu ustrezno samodejno uravnava osvetljenost. Če se bodo posnetki uporabili za določanje polja koncentracij je zato nujno, da se na kameri izbere nastavitev konstantne osvetlitve.

V nadaljevanju je treba videoposnetek razdeliti na posamezne sličice, te pa potem iz barvnih pretvoriti v črno-bele. Pri digitalni sliki je vsaka barva posameznega piksla shranjena v računalniškem spominu. Pri črno-belih slikah to predstavlja 8 bitov spomina (8-bitna barva), kar v binarnem sistemu predstavlja 2^8 oziroma 256 različnih možnosti, tj. nabor vrednosti od 0 do 255. Ničla (0) predstavlja črno, 255 pa belo barvo, vmes pa je 254 odtenkov sive.

V izbrani točki se razlika v koncentraciji sledila na slikah odraža kot razlika v odtenku sivine na črno-beli lestvici. Iz vsake sličice posnetka pa se lahko pridobi vrednost stopnje sivine izbrane slikovne pike. Kontrast med sledilom in medijem (oziroma platnom v ozadju snemanega procesa) je tisti, ki določa zvezo med koncentracijo sledila in intenziteto sivine v pripadajoči slikovni piki. Tako velja:

$E_{i,j} \propto 1 - c(i,j)$, če je sledilo temnejše od medija oziroma ozadja (2.69a)

$E_{i,j} \propto c(i,j)$, če je sledilo svetlejše od medija oziroma ozadja (2.69b)

kjer sta: $E_{i,j}$ intenziteta sivine posamezne opazovane slikovne pike z lego v i,j (vrednost te veličine je vedno celo število med 0 in 255)

$c(i,j)$ koncentracija (sledila ali delcev) v točki, ki pripada slikovni piki z lego v i,j

Simoens in Ayrault (1994) ter Aider in Westfreid (1995) so pokazali, da je odvisnost med intenziteto sivine in koncentracijo sledila v enačbi (2.69) linearna.

Kadar so predmet opazovanja trdni delci v tekočini, je bolj pravilno govoriti o sorazmernosti intenzitete sivine in prostorninskim deležem delcev v suspenziji:

$E_{i,j} \propto 1 - \varphi(i,j)$, če so delci temnejši od medija oziroma ozadja (2.70a)

$E_{i,j} \propto \varphi(i,j)$, če so delci svetlejši od medija oziroma ozadja (2.69b)

kjer je: $\varphi(i,j)$ prostorninski delež trdnih delcev v točki, ki pripada slikovni piki z lego v i,j

Če je uporabljena samo ena vrsta delcev oziroma imajo vsi delci obravnavanega sistema enako gostoto, je enačba (2.69) korektna tudi za trdne delce, saj sta masna koncentracija in prostorninski delež delcev linearno odvisna:

$$c \propto \varphi \tag{2.71}$$

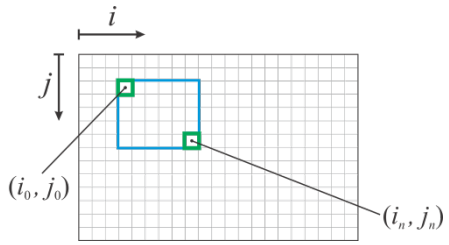
Neposreden izraz, ki podaja zvezo (2.71), je bil izpeljan že v poglavju 2.2.2 – gre za enačbo (2.33).

Če se na črno-beli sliki izbere končno množico slikovnih pik, ki jo omejuje pravokotnik (tako imenovano okno pikslov), se povprečno vrednost sivine v oknu dobi z dvojno vsoto (Širok et al., 2002). Tako velja:

$$G = \frac{1}{(i_n + 1) - i_0} \cdot \frac{1}{(j_n + 1) - j_0} \cdot \sum_{i=i_0}^{i_n} \sum_{j=j_n}^{j_n} E_{i,j} \tag{2.72}$$

kjer so:

- i_0 zaporedno število celic (v horizontalni smeri) na levem robu izbranega okna slikovnih pik
- i_n zaporedno število celic (v horizontalni smeri) na desnem robu izbranega okna slikovnih pik
- j_0 zaporedno število celic (v vertikalni smeri) na zgornjem robu izbranega okna slikovnih pik
- j_n zaporedno število celic (v vertikalni smeri) na spodnjem robu izbranega okna slikovnih pik



Slika 2.7: Izbrano okno slikovnih pik

Figure 2.7: The chosen window of pixels

Prednost fotogrametrične metode določevanja koncentracij je možnost zajema celotnega polja koncentracij (do resolucije enega piksla) in neinvazivnost, česar merilniki kalnosti ne omogočajo. Slabost te metode pa so slabša izhodišča za kalibracijo. To še posebej velja takrat, ko debelina opazovanega sloja v smeri, pravokotni na ravnino snemanja, ni konstantna.

Fotogrametrična metoda je bila že uporabljena za določitev reološkega vpliva na lastnosti usedanja delcev (Gosar et al., 2009) ter za določevanje polja gostote pri preučevanju gostotnih tokov (Nogueira et al., 2013).

2.5.2 Zrnavostna analiza velikosti delcev

Sestav suspendiranega materiala glede na razmerje med velikostjo zrn je eden od pomembnih dejavnikov v procesu gravitacijskega čiščenja posameznih delcev v zgornjem sloju usedalnika (Vanrolleghem et al., 2006). Podatek o zrnavosti se lahko uporabi za izdelavo tako imenovanih modelov bilance populacije, ki opisujejo spremembo granulacije zaradi kosmičenja in razpada delcev (Biggs in Lant, 2002; Nopens et al., 2005; Ding et al., 2006).

Zrnavostne analize delcev v vzorcih se lahko izvajajo z različnimi metodami: s klasično sejalo analizo, z laserskim granulometrom (Biggs, 2000; Govoreanu et al., 2004), z analizo slik (Spicer in Pratsinis, 1996) ali pa s števcem Coulter (Li in Ganczarczyk, 1991). Pomanjkljivost teh metod je, da so

uporabne samo v laboratorijske okolju (Vanrolleghem et al., 2006), zaradi česar je resolucija podatkov, ki jih dajejo, časovno in prostorsko omejena (diskretne točke v prostoru in času).

Poznavanje sestava velikosti delcev v času in prostoru je zelo dobrodošlo, kadar se preučuje usedalnik, v katerem ima proces kosmičenja pomembno vlogo. Poleg tega bi lahko podatki o polju zrnavosti v usedalniku osvetlili hidrodinamične zveze med diskretnim usedanjem, na eni strani, in fenomenologijo usedanja delcev v suspenziji v naknadnih usedalnikih, na drugi strani. Zato se v zadnjih letih razvijajo tehnike za določanje zrnavosti *in situ*, na mestu samem. Prvi primer take metode je akustična spektroskopija (Reichel and Nachtnebel, 1994), ki pa je za zdaj še v povojih (Vanrolleghem et al., 2006). Zelo zadovoljive rezultate za analizo zrnavosti *in situ* pa je dala uporaba metode FBRM, ki omogoča meritve tudi pri višjih koncentracijah (De Clercq et al., 2004).

2.5.3 Določitev tokovnega polja

Metode za določanje lastnosti tokovnega polja se delijo na kvalitativne in kvantitativne. Prve dajejo splošen vpogled v hidrodinamične razmere pri obravnavanem fenomenu; druge pa predstavljajo meritev toka, katere rezultati so številčni.

Tehnike meritev hitrosti se delijo tudi na invazivne in neinvazivne. Invazivne so tiste, pri katerih je neizbežna postavitev ene ali več komponent merilnika v tekočino, s čimer sama meritev spremeni lokalno tokovno polje in vpliva na merjene veličine. Neinvazivne metode pa so tiste, pri katerih meritev ne posega v tokovne razmere, saj se fenomen meri od zunaj.

Naslednja razlika je tudi v dimenziji vektorja hitrosti: nekatere metode lahko merijo hitrosti samo v eni izbrani smeri (npr. plovci in mehanski, ultrazvočni, elektromagnetni merilniki pretoka), druge pa celo v vseh treh prostorskih razsežnostih (akustični Dopplerjev merilniki).

Kar nekaj metod, ki bodo predstavljene v nadaljevanju, strogo gledano meri hitrosti delcev in ne tekočine. Ob tem se opirajo na predpostavko, da je hitrost tekočine povsem enaka hitrosti delcev. Pri preučevanju delovanja usedalnikov to sploh ni nujno slabost, saj je za učinkovitost bolj kot gibanje vode pomembno gibanje delcev. Vseeno pa se mora raziskovalec pri interpretaciji meritev zavedati tega ozadja merilne metode.

Kvalitativno določanje tokovnega polja z uporabo sledila

Uporaba sledila ima dolgo zgodovino v laboratorijski hidravliki in preučevanje delovanja usedalnikov ni nobena izjema. Vnos barvila omogoča kvalitativno opazovanje hitrostnega polja na modelu. Pri fizičnih modelih toka s prosto gladino običajno zadošča spremljanje hitrostnega profila od zgoraj, tj. v horizontalni ravnini. Pri usedalnikih pa je so bolj pomembne hidrodinamične razmere v vertikalnih ravninah, zato je na modelih pogosta uporaba prozornih sten (npr.: van Marle in Kranenburg, 1994; Taebi-Harandy in Schroeder, 2000; López et al., 2008; Jamshidnia et al., 2010; Bajcar et al., 2011), ki omogočajo opazovanje od strani.

Za vizualizacijo težnostnih tokov in hitrostnih profilov sta van Marle in Kranenburg (1994) v model usedalnika uvedla navpične sledi barvila v bližini steklenega okna. Procese v modelu sta nato fotografirala in posnela s kamero.

Meritve hitrosti s plovci

Najstarejši postopek za merjenje hitrosti vode, ki so ga uporabljali že v antičnih časih, je s pomočjo plovcev (Brilly in Šraj, 2005). Pri meritvah na usedalnikih so jih uporabljali Bretscher et al. (1992) ter Ueberl and Hager (1997). Slabost te merilne tehnike je v tem, da ne more meriti nizkih hitrosti in da gre za enodimenzionalno meritev, tj. omejena je z merjenjem hitrosti v zgolj eni smeri (Vanrolleghem et al., 2006).

Elektromagnetni merilniki hitrosti

Elektromagnetni merilniki hitrosti delujejo na osnovi Faradayevega zakona. Vsaka sprememba v magnetnem okolju bo povzročila, da se bo v prevodniku inducirala napetost. Pri meritvah hitrosti je magnet mirujoč, tekočina (kot prevodnik) pa se premika. To gibanje povzroči napetost, ki jo merijo elektrode in je sorazmerna s hitrostjo tekočine. (Vanrolleghem et al., 2006).

Krebs et al. (1998) so v eksperimentalni študiji tokovnega polja v pravokotnem usedalniku meritve hitrosti izvedli z elektromagnetno sondo v vertikalnih profilih. Ustreznost in zanesljivost meritev je bila predhodno določena s kalibracijo na osnovi eksperimentalne primerjave z lasersko-Dopplerjevim anemometrom. Izkazalo se je, da je za hitrosti, manjše od 1 cm/s, metoda nezanesljiva (Krebs et al., 1998).

Ultrazvočni merilniki

Tudi ultrazvočni merilniki hitrosti in ultrazvočni profilni merilniki pretočnih hitrosti (UVP) so v raziskavah na usedalnikih že bili uporabljeni (Larsen, 1977 oziroma Jamshidnia in Takeda, 2010).

Laser-Doppler merilnik hitrosti

Laser-Doppler merilnik hitrosti (LDV) je optična merilna naprava. Laserski žarek je usmerjen v merjeno površino, naprava pa s pomočjo odboja žarka določi hitrost nihanja, iz katere je mogoče izpeljati frekvenco, amplitudo in fazo. Osnovna ideja tehnike LDV je, da se hitrost delca odraža v spremembi frekvence razpršene svetlobe zaradi Dopplerjevega efekta (Vanrolleghem et al., 2006). LDV je tako ena izmed metod, ki dejansko meri hitrost delcev in ne tekočine.

Glavni prednosti LDV sta neinvazivnost in lokalno merjenje trenutne hitrosti (Vanrolleghem et al., 2006). Omogočajo celo karakterizacijo turbulence (Lyn in Rodi, 1990). Žal visoko kakovostne komponente LDV dosegajo zelo visoke cene, zato so stroški meritev s to metodo precejšnji (Vanrolleghem et al., 2006).

Akustični Dopplerjevi merilniki

Tudi akustični Dopplerjevi merilniki hitrosti temeljijo na Dopplerjevem efektu. Sonda preko oddajnika odda zvočni val in analizira odbite valove. Tako kot pri LDV tudi akustični Dopplerjevi merilniki merijo hitrost gibanja delcev in ne tekočine. Velika prednost teh merilnikov je, da so neinvazivni in da lahko merijo hitrosti na velikih globinah. Slednja prednost pri usedalnikih nima takega pomena kot pri meritvah na večjih vodotokih ali v morju.

Vsi akustični Dopplerjevi merilniki določijo prostorski (tridimenzionalen) vektor hitrosti, glede na prostorsko resolucijo zajema pa se delijo v dve glavni skupini:

- Dopplerjevi merilniki pretočnih hitrosti (ADV), ki omogočajo zgolj točkovne meritve hitrosti;
- Dopplerjevi profilni merilnik pretočnih hitrosti (ADCP), ki omogočajo meritev hitrostnega profila toka.

Dopplerjevi merilniki pretočnih hitrosti (ADV) so zelo popularna izbira za merjenje hitrosti v usedalnikih, tako na prototipih (Brannock, 2003; Tarud et al., 2010) kot na modelih (Jamshidnia et al. 2010; Tarud et al., 2010; Sharokhi et al., 2013). Z gosto mrežo meritev z ADV se lahko doseže tudi visoka prostorska resolucija (Brannock, 2003). Dopplerjevi merilniki pretočnih hitrosti običajno merijo hitrosti do 10 m/s s približno 5% natančnostjo (Vanrolleghem et al., 2006).

Tipični Dopplerjev profilni merilnik pretočnih hitrosti (ADCP) oddaja in sprejema signal preko treh prestavljalcev, ki so na vsakih 120° razporejeni v vodoravnem krogu in usmerjeni navzven pod določenim kotom glede na vertikalo. Naprava sprejme in obdeluje odmeve, ki prihajajo z različnimi časovnimi zamiki iz zapovrstnih vzorčnih prostornin vzdolž žarka. Glede na premik signala ADCP določi prostorski (3D) vektor hitrosti. V okolici naprave meritev ni izvedljiva, razsežnost tega območja pa je odvisna od časa, ki je potreben, da se glava opreme obrne od prestavljalca do sprejemnika. Tudi na stenah in dnu usedalnika je sloj, v katerem meritev ni verodostojna, ker se valovi z oddajnika odbijejo od stene. ADCP-ji so za približno odstotek manj natančni od ADV-jev (Vanrolleghem et al., 2006). Podobno kot ADV-ji, tudi ADCP-ji lahko merijo hitrosti do 10 m/s (Vanrolleghem et al., 2006).

Fluorescentna spektroskopija

Fluorescentna spektroskopija je ena izmed sodobnejših metod, ki so trenutno še v povojih, a bodo morda v prihodnosti zasedle pomembnejše mesto med merilnimi tehnikami. Za meritve v laboratoriju in na prototipu usedalnika so jo v kombinaciji z Dopplerjevim merilnikom pretočnih hitrosti (ADV) uporabili Tarud et al. (2010). Odstopanja med merilnima metodama so bila precejšnja; podcenjene vrednosti (tudi do 500 %) intenzivnosti fluorescence bi po mnenju avtorjev študije (Tarud et al., 2010) lahko izvirale iz dušenja zaradi kisika. Predlagajo skrben nadzor in interpretacijo poskusov s fluorescentnim barvilom ter da se za večjo zanesljivost in uporabnost meritev tudi v prihodnje kombinira uporaba obeh tehnik.

Vizualizacija tokovnega polja

Za robusten začetek kvantifikacije tokovnega polja pri laboratorijskih raziskavah na usedalnikih bi lahko veljali poskusi, ki jih je l. 1990 izvedel Moursi, v članku pa sta jih opisala McCorquodale in Zhou (1993). Da bi dobil hitrostno polje v usedalniku, je Moursi v model spuščal barvilo skozi cev z odprtinami, ki so služile kot neprekinjen linijski vir barvila. Gibanje oblakov barvila je bilo posneto s kamero. Posnetki so bili analizirani na velikem zaslonu, sličica za sličico. Z merjenjem sprememb koordinat oblakov barvila med posamičnimi sličicami na zaslonu je Moursi pridobil karakteristike časovnih premikov barvila. Kot merodajne za določitev horizontalnih komponent hitrosti je uporabil premike od 0,5 pa do 2,5 s od vnosa barvila.

Računalniško podprta metoda vizualizacije tokovnega polja

Računalniško podprta metoda vizualizacije tokovnega polja, ki so jo razvili Bajcar et al. (2009), omogoča kvalitativno in kvantitativno preučevanje kinematike toka. Metoda temelji na fizikalnih zvezah. Iz niza zaporednih sličic posnetka toka, ki ga programska oprema potrebuje kot vhodni podatek, na podlagi advekcijsko-difuzijske enačbe določi dvodimenzionalno polje hitrosti. V nadaljevanju bodo podane le osnovne zveze fenomena difuzije in poenostavljena oblika advekcijsko-difuzijske enačbe.

Prvi Fickov zakon oziroma zakon difuzije pravi, da se difuzijski tok širi iz območja visoke koncentracije v območje nižje koncentracije in da je pri stalnih pogojih gostota masnega toka premo sorazmerna z gradientom koncentracije. Z vnosom sledila v tok tako, da se gradient koncentracij v koordinatni smeri x ohranja, je izpolnjen zakon difuzije za smer x (McComb, 1996):

$$j_x = -D \cdot \frac{dc}{dx} \tag{2.73}$$

kjer sta: j_x gostota masnega toka v smeri x

D molekularna difuzivnost sledila v tekočini

Časovne spremembe koncentracije, ki jih povzroča difuzija, določa drugi Fickov zakon, ki je izpeljan iz zakona difuzije in kontinuitetne enačbe in se lahko zapiše v naslednji obliki:

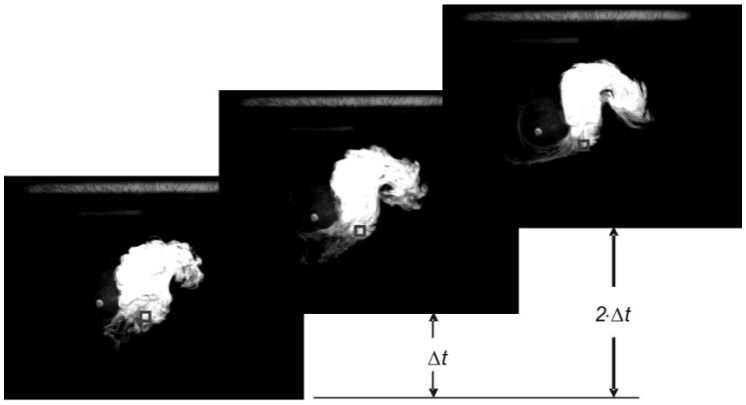
$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \cdot \nabla^2 c \tag{2.74}$$

Če tekočina ne miruje, se koncentracija v prostoru in času spreminja tudi zaradi vplivov konvekcije. Ob predpostavkah, da je koeficient difuzije konstanten, virov in ponorov ni, hitrostno polje pa opisuje nestisljiv tok, se lahko zapiše poenostavljena oblika advekcijsko-difuzijske enačbe, ki predstavlja osnovno zvezo med koncentracijo sledila in kinematiko toka:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla c = D \cdot \nabla^2 c \tag{2.75}$$

Če je molekularna difuzivnost sledila znana, je v enačbi (2.75) poleg vektorja hitrosti neznana le še koncentracija in njeni časovni in krajevni odvodi. Za določitev polja hitrosti je treba torej poznati polje koncentracij ter pripadajoče odvode. Tu nastopijo digitalni posnetki fenomena.

Obravnavani fenomen se najprej posname v laboratoriju. Osvetlitev prostora in nastavitve na kameri morajo biti ustrezne in skrbno izbrane. Iz digitalnega video posnetka se pridobijo zaporedne sličice, ki jih je treba pred obdelavo (z izbrano programsko opremo) iz barvnih pretvoriti v črno-bele. Program s fotogrametričnim pristopom poveže intenzitete sivin posameznih slikovnih pik s poljem koncentracij pasivnega sledila (osnovni principi in enačbe fotogrametrične metode so bili podrobneje predstavljeni že v poglavju 2.5.1).



Slika 2.8: Izračun časovnega odvoda koncentracije: fiksno okno in zaporedne slike v razmaku Δt (Bajcar et al., 2009)

Figure 2.8: Calculation of the time derivative of concentration: fixed window, sequence of images (Bajcar et al., 2009)

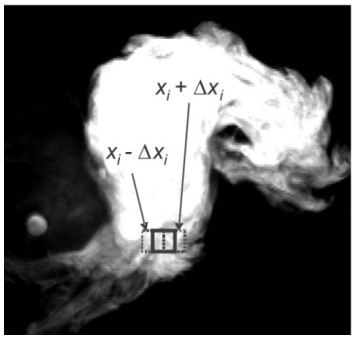
Ob upoštevanju enačbe (2.69) se lahko za časovni odvod koncentracije v fiksnem oknu slikovnih pik (Slika 2.8) zapiše zveza:

$$\frac{\partial c}{\partial t} \approx \frac{\Delta G}{\Delta t} \tag{2.76}$$

kjer sta: ΔG razlika povprečne intenzitete sivine fiksnega okna med dvema zaporednima sličicama posnetka, med katerima je časovni zamik Δt

Δt časovni zamik

Krajevni odvod koncentracije se lahko izračuna iz posamezne sličice toka (Slika 2.9). Ker so zaporedne sličice posnetkov toka dvorazsežen opis fenomena, se tudi krajevni odvodi lahko iz slike določijo v dveh koordinatnih smereh.



Slika 2.9: Določitev krajevne razlike koncentracije: premik okna na posamezni sliki (Bajcar et al., 2009)

Figure 2.9: Determination of spatial difference in concentration: window moves over a single image (Bajcar et al., 2009)

Spremembo intenzitete povprečne vrednosti sivine v fiksnem času se lahko določi numerično; program uporablja metodo centralnih razlik (Mathews in Kurtis, 2004) po enačbah:

$$\frac{\partial c}{\partial x_i} = \frac{G \cdot (x_i + \Delta x_i) - G \cdot (x_i - \Delta x_i)}{2 \cdot \Delta x_i} \tag{2.77}$$

$$\frac{\partial^2 c}{\partial {x_i}^2} = \frac{G \cdot (x_i + \Delta x_i) - 2 \cdot G \cdot (x_i) + G \cdot (x_i - \Delta x_i)}{(\Delta x_i)^2} \tag{2.78}$$

Pri določenih časovnih in krajevnih odvodih koncentracije v enačbi (2.75) nastopa le še ena neznanka, vektor hitrosti oziroma njegovi dve skalarni komponenti v_x in v_z. Za reševanje te enačbe bi bilo treba poznati še začetne pogoje, kar ni vedno enostavno. Programska oprema računalniško podprte vizualizacije tokovnega polja se zato začetnim pogojem izogne tako, da linearno diferencialno enačbo v vektorski obliki (2.75) z vpeljavo novih neznank pretvori v običajne linearne enačbe. Te enačbe so praviloma numerično enostavno rešljive, edino minimalno število za izračun potrebnih zaporednih sličic se poveča in sicer jih mora biti najmanj pet (Bajcar et al., 2009).

Veljavnost metode je bila preverjena na podlagi primerjave rezultatov z meritvami z že dobro uveljavljeno anemometrijo z vročo žičko. Primerjava je pokazala dobro ujemanje rezultatov: izkazalo se je, da metoda lahko z dobro natančnostjo izračuna smer toka in velikost hitrosti toka (Bajcar et al., 2009).

Predstavljena metoda vizualizacije za določanje hitrosti v tekočini zahteva vnos pasivnega sledila. Če se preučuje dvofazni tok, v katerem so poleg tekočine prisotni trdni delci, vnos sledila ni potreben, hitrosti in koncentracije v enačbah pa se navezujejo na delce. Pri obravnavi hidrodinamičnih razmer v usedalniku je to še dodatna prednost, saj je za določanje učinkovitosti čiščenja bolj kot gibanje vode pomembno spremljati gibanje delcev.

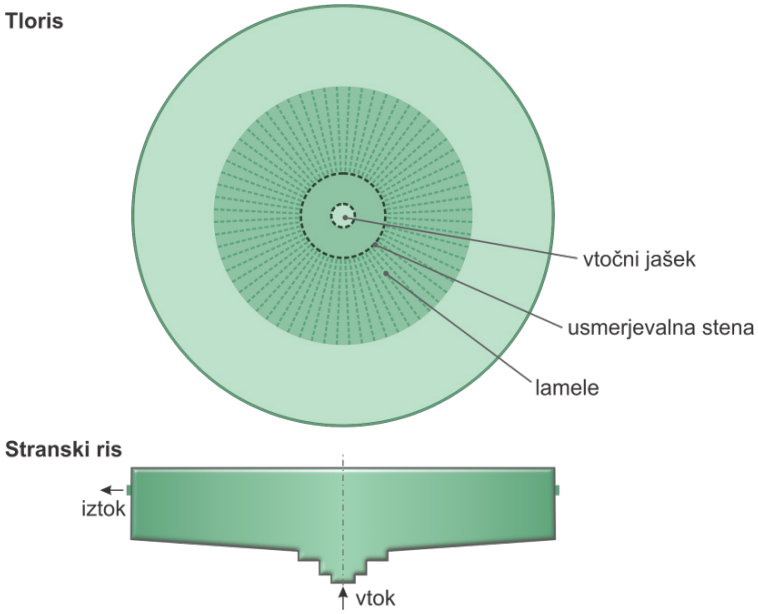
Prednosti računalniško podprte metode vizualizacije tokovnega polja so: neintruzivnost ter ustrezna časovna in prostorska resolucija. V nasprotju z nekaterimi drugimi metodami, ki lahko merijo hitrostno polje le v eni merilni točki naenkrat, ta metoda omogoča merjenje hitrosti na celotni izbrani merilni ravnini naenkrat (Bajcar et al., 2009). Omejitev metode predstavljajo visoke koncentracije. Sledilo namreč pri višjih koncentracijah zaduši večino svetlobe, zaradi česar fenomen na posnetku tudi s pomočjo računalniške obravnave ni več prepoznaven.

Metoda se je že večkrat izkazala pri preučevanju hidravličnih fenomenov (npr. Novak et al., 2012), med drugim tudi za preučevanje tokovne slike v usedalniku (Bajcar et al., 2010; Bajcar et al., 2011; Prešeren et al., 2013).

3 RAZISKOVALNO DELO IN METODE

Predmet obravnave je bil manjši prototipni industrijski usedalnik za čiščenje tehnološke odpadne vode. Usedalnik je okrogel s premerom 178 centimetrov, njegovo dno je nagnjeno, vtok ima urejen na obodu, iztok pa v središču. To je redka konfiguracija, saj ima velika večina okroglih usedalnikov vtok na sredini in iztok ob zunanji steni. V preteklih študijah je bila učinkovitost čiščenja tega istega usedalnika že obravnavana na podlagi integralnih parametrov (Gosar et al., 2009). Poskusi so bili izvedeni na prototipu v hidravličnem laboratoriju, za suspendirane delce v sveži suspenziji pa je bila uporabljena organska snov - mleta lešnikova lupina.

Kasneje sta bila izdelana dva modela v naravnem merilu (1:1), katerih osnovne geometrijske karakteristike so bile enake, razlikovala pa sta se v umestitvi vtoka oziroma iztoka. Pri prvem modelu se je v konfiguraciji povsem sledilo prototipu, tako da je bil vtok na obodu in iztok na sredini. Drugi model pa je imel vtok na sredini in iztok na obodu, ureditev, ki je v praksi običajna za okrogle usedalnike. Primerjava delovanja obeh tipov je pokazala, da je usedalnik s sredinskim vtokom in obodnim iztokom učinkovitejši (Bajcar et al., 2011).



Slika 3.1: Shema obravnavanega prototipa usedalnika

Figure 3.1: Schematic view of the investigated settling tank prototype

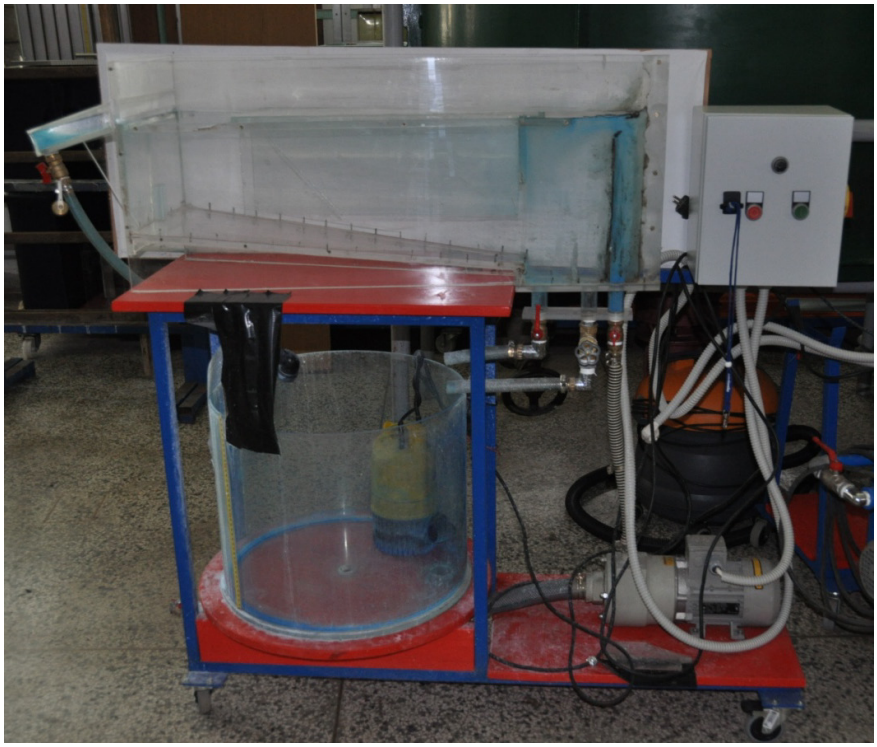
Obravnavni industrijski usedalnik v času preučevanja ni bil več v obratovanju. Podatki o vrsti ali velikosti trdnih delcev v odpadni vodi ter podatki o obratovalnih pogojih (razponu tipičnih koncentracij in tipičnih hidravličnih obremenitev) niso bili na voljo. Zato primerjalna študija razmer na prototipu med dejanskim obratovanjem in na modelu usedalnika ni bila mogoča. Glede na to, da rezultati, ki bi bili specifično vezani na odsluženi prototip, ne bi nikomur koristili, ker je ureditev okroglega usedalnika z zunanjim vtokom in središčnim iztokom izjemno redka ter ker so tudi rezultati primerjalne študije pokazali večjo učinkovitost usedalnika s tipično umestitvijo vtočno-iztočnih elementov, je bila za obravnavo v doktorski disertaciji izbrana prilagojena geometrija z vtokom na sredini (Slika 3.1). Cilj študije je bil, razširiti do sedaj znana dognanja o procesih usedanja v usedalnikih s kontinuirnim delovanjem z ugotovitvami splošne veljave.

3.1 Fizično modeliranje delovanja usedalnika

Za razumevanje ozadja boljše učinkovitosti pri določenih obratovalnih pogojih je, poleg spremljanja integralnih parametrov, nujno tudi poznavanje fenomenov, ki se odvijajo v usedalniku. Proces usedanja je bil zato preučevan v hidravličnem laboratoriju na fizičnem modelu usedalnika (Slika 3.2).

3.1.1 Fizični model usedalnika

Stene modela in drugi konstrukcijski detajli so iz pleksi stekla, s čimer je omogočena vizualizacija tokovnih struktur, ki se oblikujejo v usedalniku. Model predstavlja krožni izsek prototipa, pri čemer je bila predvidena osna simetrija okrog navpičnice (Slika 3.3).

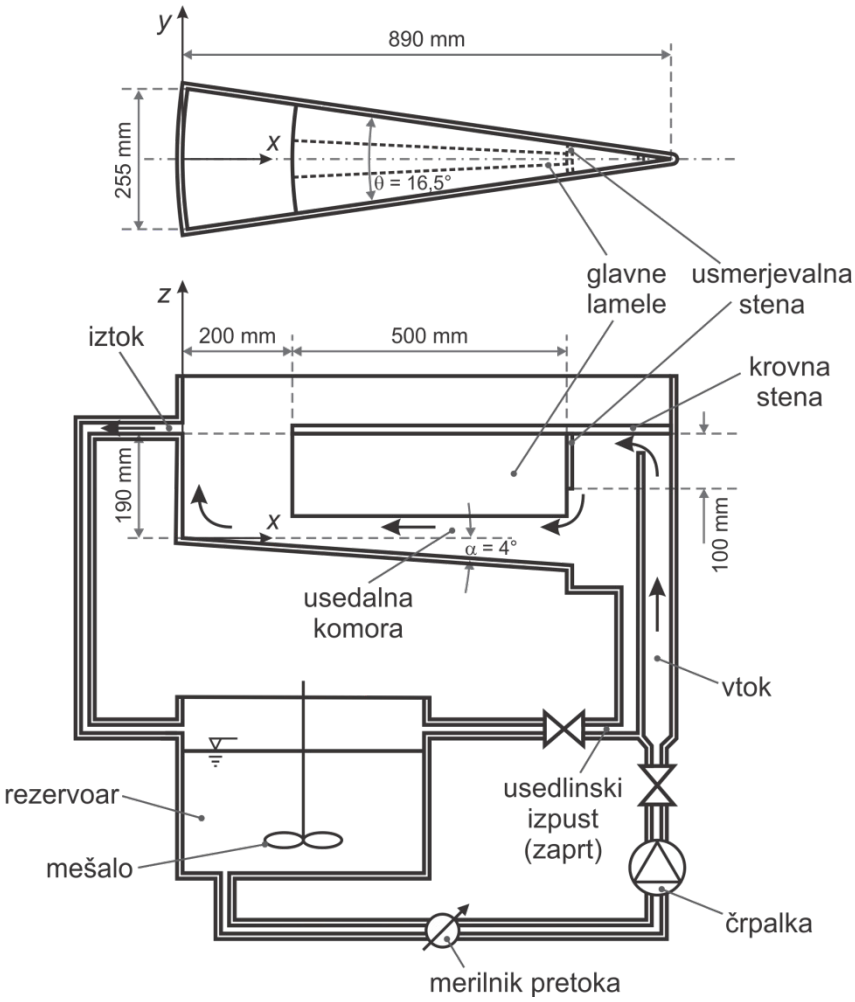


Slika 3.2: Fotografija modela usedalnika
Figure 3.2: Photo of the model settling tank

Dolžina modela usedalnika je 890 mm, kar hkrati predstavlja tudi radij analognega krožnega usedalnika; model je namreč izdelan v merilu 1 : 1. Ker model glede na razsežnosti prototipa ni bil pomanjšan, zagotavljanje hidravlične modelne podobnosti za konstrukcijo modela ni bilo potrebno.

Model je bil zasnovan v skladu s smernicami WEF (WEF, 2005). Suspenzija vstopa v notranjost usedalnika skozi odprtino na sredini usedalnika in izteka iz usedalnika na zunanjem robu. V bližini vtočne odprtine tik pod krovno steno usedalnika je nameščena vertikalna usmerjevalna stena – tako imenovana pregrada, ki preprečuje, da bi sveža suspenzija tekla neposredno k iztočnemu prelivu. Pregrada predstavlja zunanji rob vtočnega jaška krožnega usedalnika. Poleg pregrade so pomemben konstrukcijski element še navpične lamele (Slika 3.3), ki vodijo tok sveže suspenzije v radialni smeri proti zunanji steni in omejujejo mešanje med posameznimi krožnimi segmenti. Višina in postavitev usmerjevalne stene je bila izbrana glede na ustrezne specifikacije in priporočila (WEF, 2005).

Uporaba krožnih izsekov pri fizičnem hidravličnem modeliranju krožnih usedalnikov je pogosta, saj omogočajo preučevanje hidrodinamičnih razmer, ki se vzpostavijo v vertikalnih ravninah. Slednje pa so ključne in najbolj reprezentativne pri procesih, ki se odvijajo v usedalni komori. Hidravlično modeliranje okroglega usedalnika s krožnim izsekom neizogibno prinese določena odstopanja med modelom in prototipom. Medtem ko pri obravnavanem usedalniku zunanja obodna stena ustrezno zastopa mejni cilindrični plašč, preostali dve navpični steni nekoliko spremenita hidravlične razmere, saj na modelu vsiljujeta nove robne pogoje (Slika 3.3). Njuna umestitev sicer sovpada z usmerjevalnimi lamelami, ki so prisotne tudi pri prototipu, vendar se izvirne lamele ne raztezajo od središča do zunanje obodne stene, niti ne segajo do dna usedalnika. Povečani deli sten na modelu (tj., deli sten, ki jih na prototipu ni) so vir dodatnega trenja in hkrati preprečujejo suspenziji, da bi se prosto gibala v prečni smeri. Vpliv opisanih odstopanj presega okvir obravnave in je bil sprejet kot zanemarljivi stranski učinek fizičnega modeliranja.



Slika 3.3: Shema modela usedalnika

Figure 3.3: Schematic view of a model settling tank

Model je bil povezan z rezervoarjem, v katerem je bila s stalnim mešanjem dosežena enakomerna gostota suspenzije. Kot mešalo v rezervoarju je bila uporabljena potopna črpalka. Druga črpalka, opremljena s frekvenčnim regulatorjem, je prečrpavala suspenzijo iz rezervoarja v model usedalnika. Usedlinski izpust je bil pri vseh poskusih zaprt. Iztok iz usedalnika je bil urejen s pretočnim prelivom na obodnem delu usedalnika; voda iz pretočnega preliva se je zbirala v cev in vračala nazaj v rezervoar (Slika 3.3).

3.1.2 Suspendirana snov

Če pri konstrukciji modela zaradi merila 1 : 1 ni bilo treba upoštevati zakonov modelne podobnosti, je bila izbira modelnih delcev bolj zahtevna. Glede na to, da podatkov o lastnostih tehnološke odpadne vode, ki je dotekala v obravnavni prototip usedalnika, ni bilo, se tudi kinematične podobnosti hitrosti usedanja ni dalo vezati na dejanske vrednosti hitrosti usedanja. Vseeno pa so morali biti delci ravno dovolj veliki (premer) in težki (gostota), da so bile njihove lastnosti usedanja smiselne.

Kot suspendirani delci pa sta bili uporabljeni dve različni snovi: mleta lešnikova lupina (Slika 3.4) in stekleni delci (Slika 3.5) - prva organskega, druga anorganskega izvora. Poleg materiala so se delci razlikovali tudi v sestavu delcev glede na velikost zrn, tako da je bilo skupno uporabljenih kar pet različnih modelnih delcev. Široka paleta uporabljenih modelnih delcev je omogočila karakterizacijo vpliva velikosti in tipa delcev na tokovne strukture, ki se izoblikujejo v usedalniku.

V prvih poskusih je kot suspendirana snov služila mleta lešnikova lupina, ki je bila na voljo v dveh razredih velikosti delcev, kot fino in kot grobo mleta (Slika 3.4). Fino mleta lešnikova lupina je bila že uporabljena pri raziskavah delovanja istega okroglega usedalnika, tako na prototipu (Gosar et al., 2009), kot na modelu (Bajcar et al., 2010; Bajcar et al., 2011).

Organska snov je bila pridobljena z mletjem lešnikove lupine na mlinske kamne, njena gostota je približno 1450 kg/m^3. Predpostavljena je kroglicam podobna oblika delcev, vendar natančnejših podatkov o obliki ni. Pred poskusi z mleto lešnikovo lupino so bili delci za en dan namočeni v vodo.

Slika 3.4: Mleta lešnikova lupina kot suspendirana snov: levo fini delci, desno grobi delci
Figure 3.4: Ground hazelnut shell as suspended matter: fine particles on the left, coarse particles on the right

Za drugo serijo poskusov so kot suspendirana snov služila neobarvana steklena zrnca (Slika 3.5). Steklene perle so iz anorganskega natrij-kalcijevega stekla, so okrogle oblike, neporozne in bele barve, njihova gostota znaša 2500 kg/m^3. Proizvajalec ponuja steklene mikrokroglice v različnih velikostih, pri čemer premer delca ni enoten. Zrnavostne analize velikosti delcev proizvajalca so izdelane z laserskim granulometrom Cilas po ISO 13320-1 standardu, s korelacijo Frauenhofer.

Izmed velikostnih razredov iz prodajnega programa so bile izbrane tri različne granulacije glede na kinematično primerljivost s fino in grobo mleto lešnikovo lupino. V primerjavi s hitrostjo usedanja zrna srednjega premera fino mlete lešnikove lupine ima zrno srednjega premera iz najmanjše granulacije (A) manjšo računsko hitrost usedanja, zrno srednjega premera iz srednje velike granulacije (B) pa računsko hitrost usedanja primerljivega velikostnega razreda. Zadnja, največja granulacija steklenih perl (C), ima računsko hitrost usedanja zrna srednjega premera večjo od tiste, ki velja za srednje zrno fino mlete lešnikove lupine, in manjšo od tiste, ki velja za srednje zrno grobo mlete lešnikove lupine.

Slika 3.5: Steklene mikrokroglice kot suspendirana snov: levo granulacija A, na sredini granulacija B, desno granulacija C

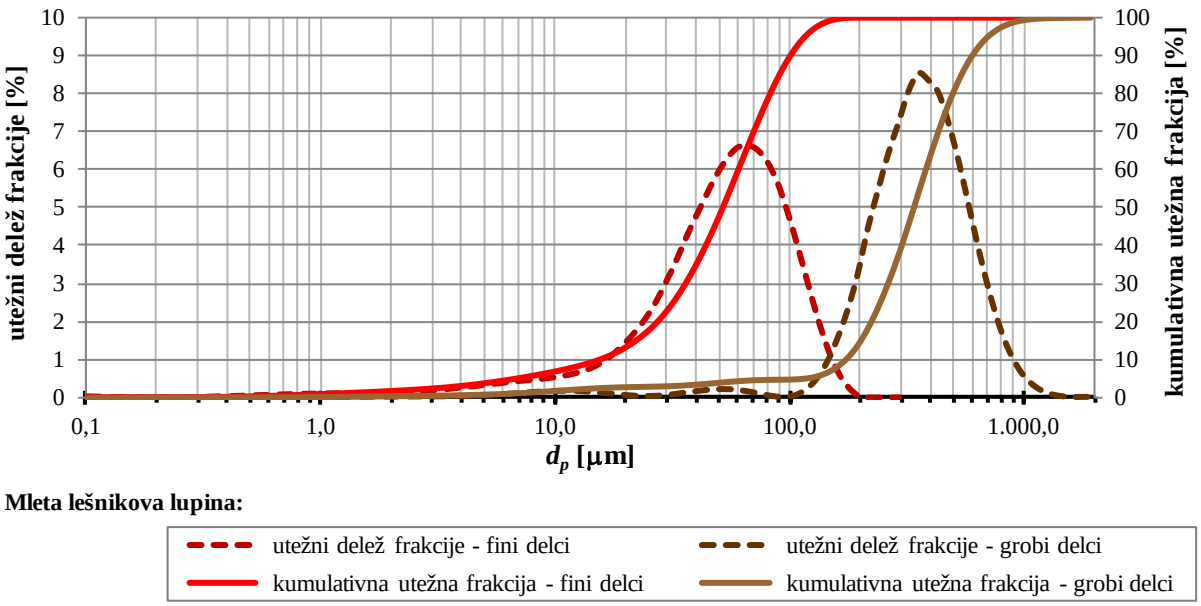
Figure 3.5: Glass microbeads as suspended matter: granulation A on the left, granulation B on the middle, granulation C on the right

Kontrolni eksperimenti so bili izvedeni pri gostotno nevtralnih razmerah, tj. brez delcev, z vnosom barvila, katerega gostota je enaka gostoti vode.

Velikost modelnih delcev

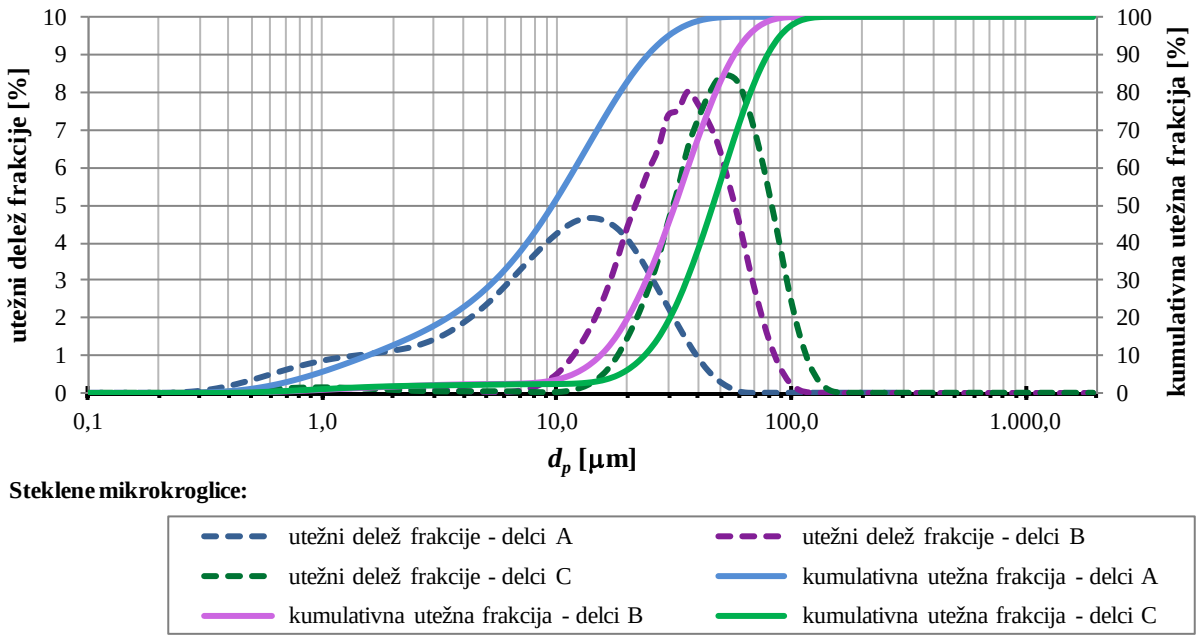
Značilnosti diskretnega in oviranega usedanja delcev so odvisne od velikosti, gostote, oblike in hrapavosti površine delca ter od viskoznosti medija. Glede na to, da kot medij v poskusih vedno nastopa voda in da je predpostavljena okrogla oblika vseh delcev, ki so služili kot suspendirana snov, sta parametra z odločilnim vplivom na hitrosti usedanja gostota in velikost delcev. Gostota obeh snovi je bila že podana v uvodnih odstavkih tega poglavja, porazdelitve velikosti oziroma premerov uporabljenih delcev pa bodo predstavljene sedaj.

Raztros velikosti delcev v reprezentativnih vzorcih podajata Grafikon 3.1 za lešnikovo lupino in Grafikon 3.2 za steklene kroglice. Na obeh grafih je za izbrano skupino delcev izrisan utežni delež frakcij in kumulativna krivulja utežnih frakcij glede na velikost premera delca. Opozoriti je treba, da je zaradi boljše preglednosti abscisna os v desetiškem logaritmičnem merilu (Grafikon 3.1 in Grafikon 3.2).



Grafikon 3.1: Zrnavostna analiza velikosti delcev v fino in grobo mleti lešnikovi lupini, ki je služila kot suspendirana snov

Graph 3.1: Distribution of particle size of fine and coarse ground hazelnut shell used as settling matter



Grafikon 3.2: Zrnavostna analiza velikosti steklenih kroglic (tri različne zrnavosti: A, B in C), ki so služile kot suspendirana snov

Graph 3.2: Distribution of particle size of glass microspheres (three different granulations: A, B and C) used as settling matter

Na podlagi zrnavostnih analiz vzorcev so bili določeni tudi karakteristični premeri zrn vseh uporabljenih delcev, ki jih podaja Preglednica 3.1. Ker podatki izhajajo iz zrnavostne analize enega reprezentativnega vzorca in ne predstavljajo strogo določenih vrednosti, ki bi veljale za vsak vzorec, so, z izjemo steklenih mikrokroglic granulacije A, vse vrednosti premerov karakterističnih zrn zaokrožene na pet mikronov natančno.

Preglednica 3.1: Približne vrednosti karakterističnih premerov delcev za vseh pet obravnavanih mešanic suspendirane snovi

Table 3.1: Approximate values of characteristic diameters of particles for all five used mixtures of settling matter

suspendirana snov	mleta lešnikova lupina		steklene mikrokroglice		
	fino mleta	grobo mleta	granulacija A	granulacija B	granulacija C
d_{10} $[\mu m]$	15	180	1,5	15	25
d_m $[\mu m]$	65	355	14	35	50
d_{90} $[\mu m]$	105	635	26	60	85

kjer imajo simboli, uporabljeni v preglednici, sledeči pomen:

d_{10} deseti percentil premera zrna (10 % delcev vzorca ima manjši premer)

d_{90} devetdeseti percentil premera zrna (90 % delcev vzorca ima manjši premer)

d_m srednji premer zrna

Hitrosti diskretnega usedanja

V usedalniku s kontinuirnim delovanjem imajo hidrodinamične razmere pomemben vpliv na procese čiščenja, usedanje delcev pa zaradi relativno visokih koncentracij praviloma ni diskretno. Vseeno pa lastnosti diskretnega usedanja izražajo vpliv fizikalnih lastnosti suspendiranih delcev na tokovne strukture v usedalniku. Zato je bila modelnim delcem, na podlagi podatkov o gostoti in velikosti, računsko določena hitrost diskretnega usedanja. Neovirano usedanje posameznega delca je bilo obravnavano že v poglavju 2.2.1. Znano je, da Stokesov zakon velja le ob pogoju, da je v okolici delca laminarni režim toka. Ko Reynoldsovo število delca preseže vrednost komaj 0,5, lahko odstopanje med hitrostjo usedanja, določeno po Stokesovem zakonu, in empirično določeno hitrostjo usedanja zanaša tudi do 9 odstotkov.

Za izračun hitrosti usedanja je bila tako izbrana empirična enačba za koeficient upora okroglega delca (2.19), ki sta jo predlagala Brown in Lawler (2003):

$$C_d = \frac{24}{Re_p} \cdot \left(1 + 0{,}150 \cdot Re_p^{0{,}681}\right) + \frac{0{,}407}{1 + \frac{8{,}710}{Re_p}}$$

Iz splošne enačbe za določitev hitrosti usedanja okroglega delca (2.11), ki temelji na fizikalni izpeljavi in velja za vse režime toka v okolici delca, se lahko izrazi koeficient upora okroglega delca:

$$v_s = \sqrt{\frac{4 \cdot d_p \cdot g \cdot \left(\rho_p - \rho_m\right)}{3 \cdot C_d \cdot \rho_m}} \qquad \Rightarrow \qquad C_d = \frac{4 \cdot d_p \cdot g \cdot \left(\rho_p - \rho_m\right)}{3 \cdot \rho_m \cdot v_s^2} \tag{3.1}$$

Hitrost usedanja v enačbi (3.1) se lahko nadomesti z zvezo (2.8):

$$C_d = \frac{4 \cdot d_p \cdot g \cdot \left(\rho_p - \rho_m\right)}{3 \cdot \rho_m} \cdot \frac{1}{v_s^2}$$

$$C_d = \frac{4 \cdot d_p \cdot g \cdot \left(\rho_p - \rho_m\right)}{3 \cdot \rho_m} \cdot \frac{\rho_m^2 \cdot d_p^2}{\mu_m^2 \cdot Re_p^2} \tag{3.2}$$

V enačbi (3.2) kot edini neznanki nastopata le še koeficient upora in Reynoldsovo število delca. Z združitvijo empirične zveze (2.19) za določanje koeficienta upora okroglega delca in izraza (3.2) se izloči še ena neznanka:

$$\frac{4 \cdot d_p^3 \cdot g \cdot \left(\rho_p - \rho_m\right) \cdot \rho_m}{3 \cdot \mu_m^2 \cdot Re_p^2} = \frac{24}{Re_p} \cdot \left(1 + 0{,}150 \cdot Re_p^{0{,}681}\right) + \frac{0{,}407}{1 + \frac{8{,}710}{Re_p}}$$

$$\frac{4 \cdot d_p^3 \cdot g \cdot \left(\rho_p - \rho_m\right) \cdot \rho_m}{3 \cdot \mu_m^2 \cdot Re_p^2} - \frac{24}{Re_p} \cdot \left(1 + 0{,}150 \cdot Re_p^{0{,}681}\right) + \frac{0{,}407}{1 + \frac{8{,}710}{Re_p}} = 0 \tag{3.3}$$

Ker se enačbe (3.3) ne da rešiti analitično, je treba rešitev poiskati s pomočjo numeričnih orodij. Za srednji premer vsake frakcije iz zrnavostnih analiz delcev je bila z "makrojem" v programu Excel poiskana numerična rešitev enačbe (3.3) za Reynoldsovo število delca, nato pa zelo preprosto določena še hitrost usedanja. Rezultat reševanja so krivulje raztrosa hitrosti diskretnega usedanja s pripadajočim utežnim deležem frakcij (Grafikon 4.2).

3.1.3 Zasnova eksperimentalnega dela

Izvedena je bila eksperimentalna raziskava tokovnih vzorcev v krožnem usedalniku, da bi se določila zveza med densimetričnim Froudovim številom in velikostjo delcev ter pojavom troslojnega toka v posodi usedalnika.

Najprej je bil sistem napolnjen z vodo. Dodatek snovi je bil vnesen v rezervoar, tako da je bila dosežena želena koncentracija delcev v sistemu. Na začetku poskusa so bili vsi delci enakomerno premešani v rezervoarju, medtem ko je bila v usedalniku samo voda. Nato se je odprla zaslonka in ko je sveža suspenzija vstopila v vtočni jašek, se je poskus začel.

Pojav usedanja je bil preučevan za dvanajst različnih kombinacij pretoka in utežne koncentracije sistema. Serija dvanajstih poskusov je bila izvedena za pet različnih modelnih delcev. Skupno je bilo tako obravnavanih kar 60 različnih primerov. Za vsak tak primer (kombinacija: modelni delci, koncentracija sveže suspenzije, pretok) je bil eksperiment izpeljan dvakrat: prvič se je poskus snemal, drugič pa se je izvajalo vzorčenje. Pri dodatnem nizu poskusov se je v rezervoarju namesto sveže suspenzije pripravila raztopina vode in barvila. Izbrano je bilo takšno barvilo, ki ima enako gostoto kot voda. Izvedeni so bili trije eksperimenti z različnimi prostorninski pretoki, ki so se ujemali s pretoki v serijah poskusov z delci. Kontrolni eksperimenti pri gostotno nevtralnih razmerah so služili kot podlaga za vrednotenje učinka gostotnih tokov na hidrodinamične razmere v usedalniku.

Skupna prostornina suspenzije v celotnem sistemu usedalnika in rezervoarja je vedno znašala 60 l. Pregled vseh v laboratoriju izvedenih poskusov je v prilogah (Priloga C).

Nazivna masna koncentracija poskusa

Nazivna koncentracija poskusa se nanaša na suspenzijo v celotnem sistemu (rezervoar, usedalnik, vezni elementi) in ostaja tekom poskusa ves čas enaka. Zato je koncentracija dotekajoče sveže suspenzije na začetku poskusa višja od nazivne.

Zaradi večje preglednosti bo za nazivno utežno koncentracijo v sistemu modela usedalnika uporabljen simbol w, medtem ko se simbol c v besedilu nanaša na masno koncentracijo v splošnem (koncentracija poljubne suspenzije, koncentracija v rezervoarju, koncentracija na iztoku ipd.). Ker gre pri obeh količinah za fizikalno gledano enak pomen, se lahko enačbe, ki veljajo za suspenzijo v splošnem, analogno uporabljajo za zmes trdnih delcev in vode v sistemu na modelu.

Nazivna utežna koncentracija se določi po enačbi:

$$w = \frac{m_{p.S}}{m_{w.S} + m_{p.S}} \tag{3.4}$$

kjer sta: $m_{p.S}$ skupna masa vseh trdnih delcev v sistemu modela usedalnika in rezervoarja

$m_{w.S}$ skupna masa vode v sistemu modela usedalnika in rezervoarja

Poskusi z mleto lešnikovo lupino so bili izvedeni za štiri različne suspenzije – za 0,25 %, 0,5 %, 1,0 % in 2,0% nazivno utežno koncentracijo delcev v vodi. Pri serijah poskusov s steklenimi kroglicami so nazivne utežne koncentracije znašale 0,13 %, 0,26 %, 0,52 % in 1,04 %. Izbrane so bile tako, da je

imel vsak poskus s steklenimi delci enako začetno teoretično densimetrično Froudovo število kot njegov par izmed poskusov z lešnikovo lupino, kar bo podrobneje predstavljeno v poglavju 3.1.4.

Preglednica 3.2: Določitev osnovnih parametrov za poskuse z mleto lešnikovo lupino

Table 3.2: Calculation of basic parameters for experiments conducted with ground hazelnut shell

w_{hs} [%]	m_p [g]	m_w [g]	V_p [dm^3]	V_w [dm^3]	φ [-]	$\rho_r(t=0)$ [kg/m^3]
0,25	150,0	59836,7	0,10	59,90	0,0017	1000,4
0,50	300,2	59733,2	0,21	59,79	0,0035	1001,8
1,00	601,3	59525,7	0,41	59,59	0,0069	1004,7
2,00	1206,3	59108,9	0,83	59,17	0,0139	1010,4

Preglednica 3.3: Določitev osnovnih parametrov za poskuse s steklenimi delci

Table 3.3: Calculation of basic parameters for experiments conducted with glass particles

w_{gb} [%]	m_p [g]	m_w [g]	V_p [dm^3]	V_w [dm^3]	φ [-]	$\rho_r(t=0)$ [kg/m^3]
0,13	78,0	59908,8	0,03	59,97	0,0005	1000,4
0,26	156,1	59877,6	0,06	59,94	0,0010	1001,8
0,52	312,7	59815,1	0,13	59,87	0,0021	1004,7
1,04	627,3	59689,3	0,25	59,75	0,0042	1010,4

Osnovne parametre, ki izhajajo iz nazivne utežne koncentracije poskusa: maso delcev in vode, prostornino delcev in vode ter prostorninski delež trdnih delcev, podajata Preglednica 3.2 za poskuse z mleto lešnikovo lupino in Preglednica 3.3 za poskuse s steklenimi zrnci. Masa vseh delcev, masa celotne vode in prostorninski delež v sistemu so bili določeni z enačbami (2.29), (2.30) in (2.32), ki so bile izpeljane v poglavju 2.2.2. Na začetku poskusa je v usedalniku čista voda, zato za začetni pogoj gostote suspenzije velja:

$$\rho_{st}(t=0) = \rho_w \tag{3.5}$$

Ker so na začetku poskusa vsi suspendirani delci v rezervoarju, je takrat gostota suspenzije v rezervoarju najvišja in se jo določi z enačbo:

$$\rho_r(t=0) = \frac{1}{V_r} \cdot \left(\rho_p \cdot V_{p,r}(t=0) + \rho_w \cdot V_{w,r}(t=0)\right)$$

$$\rho_r(t=0) = \frac{1}{V - V_{st}} \cdot \left(\rho_p \cdot V_p + \rho_w \cdot (V_w - V_{st})\right) \tag{3.6}$$

kjer so:

V_r prostornina rezervoarja

$V_{p,r}$ skupna prostornina vseh delcev v rezervoarju

$V_{w,r}$ prostornina vode v rezervoarju

V skupna prostornina suspenzije v celotnem sistemu

V_{st} neto prostornina modela usedalnika

V_p skupna prostornina trdnih delcev v sistemu

V_w skupna prostornina vode v sistemu

Prostorninski pretok

Prostorninski pretok skozi usedalnik je bil nastavljen na 4,0 l/min, 6,0 l/min ter 10,0 l/min. Za merjenje pretoka je bila na začetku uporabljena standardna zaslonka z 1% merilno negotovostjo, kasneje pa se je pretok nastavljalo s pomočjo frekvenčnega regulatorja črpalke. Ker je bil pretok nastavljen na začetku poskusa, ko je skozi sistem tekla le voda, in se ob vnosu delcev moč črpalke ni spremenila, se je dejanski prostorninski pretok povečane gostote dotekajoče suspenzije nekoliko zmanjšal. Preglednica 3.4 podaja dejanske pretoke in relativno napako za začetno stanje, ko je gostota vtoka največja. Največja relativna napaka, do katere pride zaradi odstopanja med pretokom suspenzije in pretokom čiste vode skozi črpalko, nastopi pri poskusih z najvišjo nazivno koncentracijo in znaša do 1,1 odstotka. Tako majhne razlike so v okviru sprejemljivega in ne zahtevajo dodatne obravnave.

Preglednica 3.4: Določitev dejanskega pretoka skozi sistem na začetku poskusa, ko je bila gostota dotekajoče sveže suspenzije največja

Table 3.4: Calculation of the actual flow through the system at the beginning of the experiment when the density of the inflowing fresh suspension was at its highest level

Q [l/min]	w_{hs} [%]	w_{gb} [%]	ρ_w [kg/m^3]	$\rho_{in}(t=0)$ [kg/m^3]	Q' [l/min]	$\boldsymbol{r}$ **[%]**
4,0	0,25	0,13	999,0	1000,4	3,99	**0,1**
6,0	0,25	0,13	999,0	1000,4	5,99	**0,1**
10,0	0,25	0,13	999,0	1000,4	9,99	**0,1**
4,0	0,5	0,26	999,0	1001,8	3,99	**0,3**
6,0	0,5	0,26	999,0	1001,8	5,98	**0,3**
10,0	0,5	0,26	999,0	1001,8	9,97	**0,3**
4,0	1,0	0,52	999,0	1004,7	3,98	**0,6**
6,0	1,0	0,52	999,0	1004,7	5,97	**0,6**
10,0	1,0	0,52	999,0	1004,7	9,94	**0,6**
4,0	2,0	1,04	999,0	1010,4	3,95	**1,1**
6,0	2,0	1,04	999,0	1010,4	5,93	**1,1**
10,0	2,0	1,04	999,0	1010,4	9,89	**1,1**

kjer imajo simboli, uporabljeni v preglednici, sledeči pomen:

Q prostorninski pretok skozi sistem, nastavljen pred začetkom poskusa

w_{hs} nazivna utežna koncentracija poskusov, pri katerih je bila uporabljena mleta lešnikova lupina

w_{gb} nazivna utežna koncentracija poskusov, pri katerih so bili uporabljeni stekleni delci

ρ_{in} gostota sveže suspenzije na vtoku v usedalnik

Q' korigiran dejanski prostorninski pretok skozi sistem

r relativna napaka (koliko je dejanski pretok skozi sistem manjši od tistega, ki je bil nastavljen pred začetkom poskusa)

$m_{p(1)}$ masa posameznega delca

3.1.4 Brezdimenzijska števila

Vsem poskusom so bila določena brezdimenzijska števila, ki okarakterizirajo hidrodinamične razmere v usedalniku. Na prvem mestu je to Froudovo densimetrično število, ki odraža intenzivnost vpliva gostotnih tokov. Sledita še Froudovo število, ki je indikator stabilnosti toka, in Reynoldsovo število, ki označuje stopnjo turbulence.

Vsa ta števila so bila določena računsko. To pomeni, da referenčne hitrosti, ki nastopajo v izrazih za določitev vseh treh omenjenih brezdimenzijskih števil, niso bile merjene, temveč izračunane po poenostavljeni enačbi (2.52), ki upošteva enakomerno razporeditev hitrosti po prečnem prerezu. Podobno velja za relativno razliko v gostoti, ki nastopa v enačbi za določitev Froudovega densimetričnega števila. Njena vrednost je bila na začetku poskusa določena računsko glede na znane koncentracije. Med poskusom pa je bila relativna razlika v gostoti določena po poenostavljeni enačbi (3.13), ki upošteva rezultate vzorčenja in bo predstavljena v nadaljevanju.

Teoretično Froudovo densimetrično število

Teoretično Froudovo densimetrično število je tisti brezdimenzijski parameter, ki najbolje upošteva relativen pomen vztrajnostnih in gostotnih sil težnosti v usedalniku. Je tudi parameter, na katerega se avtorji, ki obravnavajo naknadne usedalnike, v literaturi najpogosteje sklicujejo – največkrat kot vrednost Froudovega densimetričnega števila na vtoku ($Fr_{d.0}$), včasih pa tudi na sredini ($Fr_{d.m}$).

Froudovo densimetrično število v poljubnem prečnem prerezu definira enačba (2.55), ki je bila že predstavljena v poglavju 2.3.3:

$$Fr_d = \frac{\overline{v}}{\sqrt{\varepsilon \cdot g \cdot h}}$$

Zaradi velikega pomena Froudovega densimetričnega števila pri procesih v naknadnih usedalnikih in zaradi primerljivosti rezultatov z ugotovitvami študij drugih avtorjev sta bili določeni obe vrednosti tega brezdimenzijskega parametra: na vtoku ($Fr_{d.0}$) in na sredini ($Fr_{d.m}$). Da se lahko izračunata obe števili, je bilo treba najprej določiti višino toka in površino prečnega preseka (nastopa v enačbi za določitev hitrosti toka (2.52)) v obeh izbranih prečnih prerezih.

Ploščina prečnega preseka vtočne odprtine:

$$A_0 = D_0 \cdot h_0 \tag{3.7}$$

kjer sta: D_0 širina vtočne odprtine

h_0 višina vtočne odprtine

Ploščina prečnega preseka na sredini:

$$A_m = D_m \cdot h_m \tag{3.8}$$

kjer sta: D_m širina usedalnika v sredinskem prečnem prerezu

h_m višina usedalnika v sredinskem prečnem prerezu

Širina in višina krožnega izseka na sredini se določita po enačbah:

$$D_m = 2 \cdot \frac{L}{2} \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \tag{3.9}$$

$$h_m = h_p + \frac{L}{2} \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \tag{3.10}$$

kjer so: α kot, ki ga oklepata vodoravna ravnina in dno usedalnika (Slika 3.3)

θ središčni kot krožnega izseka, ki predstavlja model usedalnika (Slika 3.3)

h_p višina usedalnika na obodu

Zadnji parameter, ki je potreben za izračun Froudovega densimetričnega števila je relativna razlika v gostoti med dotekajočo suspenzijo in okoliškim medijem, ε. Na začetku poskusa so koncentracije oziroma gostote znane, enačba (2.56) pa dobi poenostavljeno obliko:

$$\varepsilon = \frac{\rho_{in}(t=0) - \rho_w}{\rho_w} \tag{3.11}$$

kjer sta: ρ_{in} gostota sveže suspenzije na vtoku v usedalnik

ρ_w gostota vode

Gostota dotoka je enaka gostoti v rezervoarju, za začetno stanje pa se jo lahko izračuna z enačbo (3.6):

$$\rho_{in}(t=0) = \rho_r(t=0) = \frac{1}{V - V_{st}} \cdot \left(\rho_p \cdot V_p + \rho_w \cdot (V_w - V_t)\right)$$

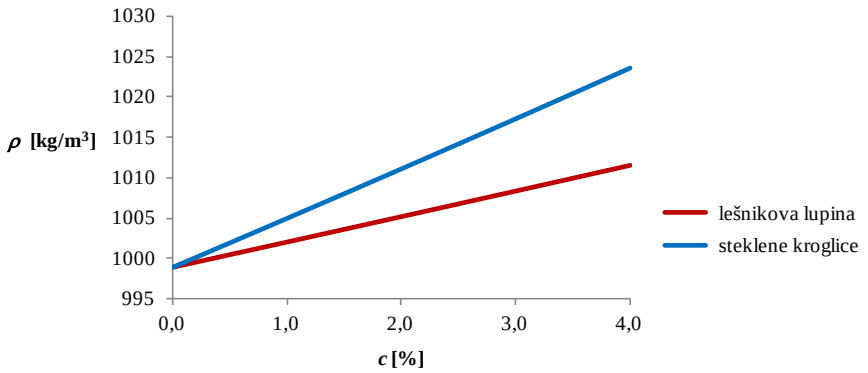
Preostale vrednosti Froudovega števila, ki se niso nanašale na začetno stanje, so se pri določitvi relativne razlike v gostoti opirale na rezultate vzorčenja. Gostota dotoka, ki nastopa v enačbi (2.56), je bila izračunana neposredno iz koncentracije vzorca na dotoku:

$$\rho_{in}(t) = \frac{\rho_w}{1 - c_{in}(t) \cdot \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_p}\right)} \tag{3.12}$$

Gostota medija v usedalniku je bila izračunana na podlagi grobe predpostavke, da je efektivna koncentracija (tista, ki pogojuje obnašanje gostotnih tokov) povprečje koncentracije na vtoku in iztoku in je bila tako izračunana po enačbi:

$$\rho_{st}(t) = \frac{\rho_w}{1 - \frac{1}{2} \cdot \left[c_{in}(t) + c_{ef}(t)\right] \cdot \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_p}\right)} \tag{3.13}$$

V literaturi je najti le enačbo, ki velja za dva sloja tekočin, ki imata različni, a znotraj sloja homogeni gostoti. Pri naknadnih usedalnikih neizbežno pride do mešanja teh dveh slojev in s tem do neenakomerne gostote. Enačba (3.13) tako predstavlja pavšalno določitev gostote suspenzije v usedalniku, merodajne za izračun relativne razlike gostote ε, ki nastopa v Froudovem densimetričnem številu.



Grafikon 3.3: Zveza med gostoto suspenzije in masnim deležem trdnih delcev v vodi (upoštevana je gostota vode pri 15 °C)

Graph 3.3: Correlation between suspension density and mass concentration of solid particles in water (values apply to density of water at 15 °C)

Enakost Froudovega densimetričnega števila na začetku poskusa je bilo vodilo pri izbiri nazivnih koncentracij poskusov. Nazivne koncentracije so bile izbrane tako, da ima vsak poskus z lešnikovo lupino svoj par v skupini med poskusi s steklenimi delci. Velikost delcev pri tem nima vpliva, zato se ena vrednost Froudovega densimetričnega števila ponovi petkrat, dvakrat pri poskusih z lešnikovo lupino in trikrat pri poskusih s steklenimi zrnci.

Preglednica 3.5 podaja vseh dvanajst vrednosti začetnega Froudovega densimetričnega števila, ki pripadajo vsem kombinacijam pretoka in utežne koncentracije za mleto lešnikovo lupino in za steklene delce.

Preglednica 3.5: Pregled začetnih vrednosti teoretičnega Froudovega densimetričnega števila na vtoku pri poskusih z mleto lešnikovo lupino in steklenimi mikrokroglicami

Table 3.5: Overview of the initial theoretical densimetric Froude number values at the inlet and at the mid cross-section for test runs with ground hazelnut shell and glass microbeads

		Q [l/min]				
		4	6	10		
mleta lešnikova lupina (fini in grobi delci) w_{hs} [%]	0,25	0,42	0,63	1,05	0,13	steklene mikrokroglice (delci A, B in C) w_{gb} [%]
	0,5	0,30	0,45	0,75	0,26	
	1,0	0,21	0,32	0,51	0,52	
	2,0	0,15	0,22	0,37	1,04	

Froudovo število

Froudovo število definira enačba (2.51), ki je bila že predstavljena v poglavju 2.3.3

$$Fr = \frac{\bar{v}^2}{g \cdot R}$$

Vrednost Froudovega števila je neodvisna od koncentracije ali kakršnihkoli fizikalnih lastnosti delcev. Računske vrednosti, ki so bile določene vsem poskusom, podaja Preglednica 3.6.

Reynoldsovo število

Reynoldsovo število definira enačba (2.60), ki je bila predstavljena v poglavju 2.3.3:

$$Re = \frac{R \cdot \overline{v}}{\nu_m}$$

Tudi vrednost Reynoldsovega števila je neodvisna od koncentracije in lastnosti suspendiranih delcev. Iz računskih vrednosti, ki so bile določene vsem poskusom in jih podaja Preglednica 3.6, je razvidno, da je pri največjem pretoku (10 l/min) vrednost Reynoldsovega števila 1150.

Še enkrat pa je treba poudariti, da je v računu brezdimenzijskih parametrov upoštevana hitrost, določena s poenostavljenim izrazom (2.52).

Pregled brezdimenzijskih števil

Preglednica 3.6 prikazuje vrednosti densimetričnega Froudovega števila na vtoku in na sredini ter Froudovo in Reynoldsovo število na sredini usedalnika. Slednja dva parametra sta neodvisna od nazivne koncentracije oziroma od relativne gostote; spreminjata se samo s prostorninskim pretokom.

Preglednica 3.6: Brezdimenzijska števila niza dvanajstih poskusov

Table 3.6: Dimensionless numbers of a series of twelve test runs

Q [l/min]	w_{hs} [%]	w_{gb} [%]	ε [-]	$Fr_{d.0}$ [-]	$Fr_{d.m}$ [-]	Fr [-]	Re [-]
4	0,25	0,13	0,0014	0,42	0,042	$2{,}6 \cdot 10^{-6}$	460
4	0,50	0,26	0,0028	0,30	0,030	$2{,}6 \cdot 10^{-6}$	460
4	1,00	0,52	0,0057	0,21	0,021	$2{,}6 \cdot 10^{-6}$	460
4	2,00	1,04	0,0114	0,15	0,015	$2{,}6 \cdot 10^{-6}$	460
6	0,25	0,13	0,0014	0,63	0,064	$5{,}7 \cdot 10^{-6}$	690
6	0,50	0,26	0,0028	0,45	0,045	$5{,}7 \cdot 10^{-6}$	690
6	1,00	0,52	0,0057	0,32	0,032	$5{,}7 \cdot 10^{-6}$	690
6	2,00	1,04	0,0114	0,22	0,022	$5{,}7 \cdot 10^{-6}$	690
10	0,25	0,13	0,0014	1,05	0,106	$1{,}6 \cdot 10^{-5}$	1150
10	0,50	0,26	0,0028	0,74	0,075	$1{,}6 \cdot 10^{-5}$	1150
10	1,00	0,52	0,0057	0,53	0,053	$1{,}6 \cdot 10^{-5}$	1150
10	2,00	1,04	0,0114	0,37	0,037	$1{,}6 \cdot 10^{-5}$	1150

Čeprav je bilo v študiji obravnavanih kar 60 različnih primerov (kombinacije treh različnih pretokov, štirih različnih nazivnih koncentracij in petih različnih modelnih delcev), preglednica zajame vse vrednosti začetnih brezdimenzijskih parametrov, saj so $Fr_{d.0}$, $Fr_{d.m}$, Fr in Re neodvisni od velikosti suspendiranih delcev.

3.2 Zajem podatkov in obdelava veličin

Za zajem podatkov sta bila uporabljena dva pristopa. Pri enem sklopu poskusov se je izvajalo vzorčenje, s katerim je bila določena koncentracija delcev v suspenziji na vtoku in iztoku. Pri drugem sklopu poskusov pa je bil fenomen posnet z digitalno kamero, sličice posnetka pa so bile podlaga za nadaljnje postopke: določitev indikatorja koncentracije s fotogrametrično metodo ter za računalniško podprto metodo vizualizacije tokovnega polja.

3.2.1 Vzorčenje

Na vtoku in iztoku iz usedalnika so se odvzemali 0,5-litrski vzorci, da bi se določila vsebnost trdnih delcev na vtoku in kakovost suspenzije na iztoku iz usedalnika. Dobro premešan vzorec je bil vlit v lij za sedimentacijo po Imhoffu in po 25 minutah usedanja je bila odčitana prostornina usedline. Standarden postopek sicer predvideva 1-litrske vzorce in dve uri usedanja v liju, vendar sta bila zaradi dobrega poznavanja lastnosti modelnih delcev prostornina vzorcev in čas usedanja lahko ustrezno skrajšana.

Vzorci so se odvzemali v določenih časovnih presledkih, ki so se med poskusi razlikovali glede na uporabljene modelne delce. Pri večjih delcih so namreč bile koncentracije po določenem času že tako nizke, da je bila prostornina usedline manjša od najnižje oznake na Imhoffovem liju. Preglednica 3.7 podaja časovne točke, v katerih so bili odvzeti vzorci pri poskusih s posameznimi modelnimi delci.

Preglednica 3.7: Brezdimenzijska števila niza dvanajstih poskusov

Table 3.7: Dimensionless numbers of a series of twelve test runs

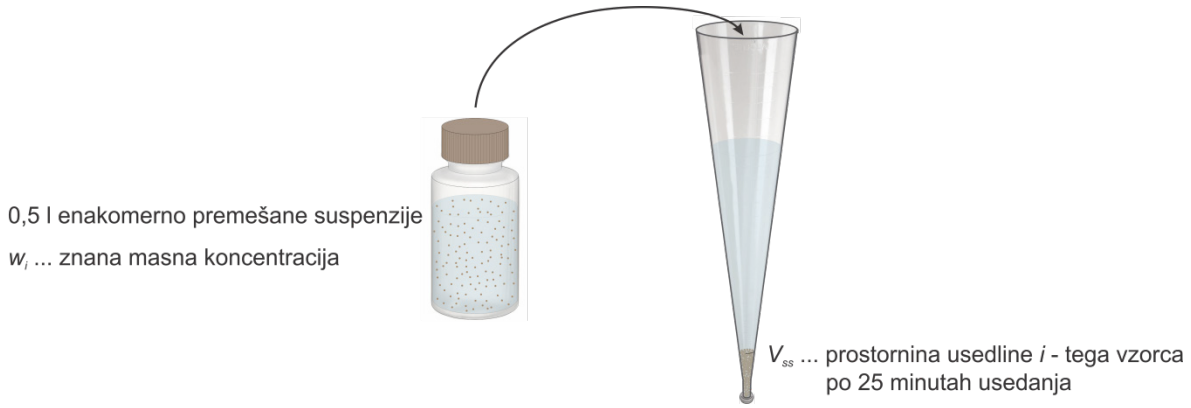
Modelni delci		čas od začetka poskusa do odvzema vzorca					
		1. odvzem	2. odvzem	3. odvzem	4. odvzem	5. odvzem	6. odvzem
lešnikova lupina	fini delci	t^* + 2 min	t^* + 5 min	t^* + 20 min	t^* + 50 min	t^* + 95 min	
	grobi delci	2 min	5 min	10 min	20 min	50 min	
steklena zrnca	zrnavost A	2 min	5 min	20 min	50 min	95 min	
	zrnavost B	2 min	5 min	10 min	20 min	50 min	95 min
	zrnavost C	2 min	5 min	10 min	20 min	50 min	

Posebnost pri časovnih presledkih so poskusi z mleto lešnikovo lupino, saj se je čas prvega odvzema (in s tem tudi vseh drugih) zamaknil za čas t^*, ki predstavlja čas od začetka poskusa pa do trenutka, ko je sveža suspenzija prvič dosegla iztočni preliv. Slednje je bilo ocenjeno na oko. Tak pristop, pri katerem so časi odvzema različni od poskusa do poskusa, je bil pri ostalih modelnih delcih opuščen oziroma poenostavljen.

Izdelava kalibracijskih krivulj

Poznavanje obnašanja trdnih delcev v sistemu je velika prednost pri odvzemih vzorcev pri laboratorijskih raziskavah v primerjavi z odvzemom vzorcev v naravi, na terenu ali v komunalni čistilni napravi. Kot že omenjeno, je ta dejavnik omogočil, da je bil postopek usedanja v sedimentacijskem liju krajši od standardnega postopka po Imhoffu. Poleg tega je bila možna izdelava kalibracijskih krivulj, ki podajajo zvezo med koncentracijami suspendirane snovi in prostornino usedline po Imhoffu.

Pripravljene so bile pollitrske suspenzije znanih masnih koncentracij. Na enak način kot pri vzorcih, ki so bili odvzeti med poskusom, se je suspenzijo dobro premešalo in vlilo v sedimentacijski lij (Slika 3.6). Masna koncentracija suspenzij in pripadajoči odčitki prostornine usedline po 25 minutah so bili podlaga za izris kalibracijskih krivulj, na podlagi katerih so se rezultati vzorčenja (prostornina usedline) lahko povezali s koncentracijami trdnih delcev.



Slika 3.6: Shema postopka za izdelavo kalibracijskih krivulj, ki povezujejo koncentracijo in prostornino usedline v Imhoffovem liju

Figure 3.6: Scheme of procedure of elaboration of calibration curves that connect concentrations and sludge volume in the Imhoff sedimentation cone

3.2.2 Zajem podatkov na podlagi posnetkov poskusa

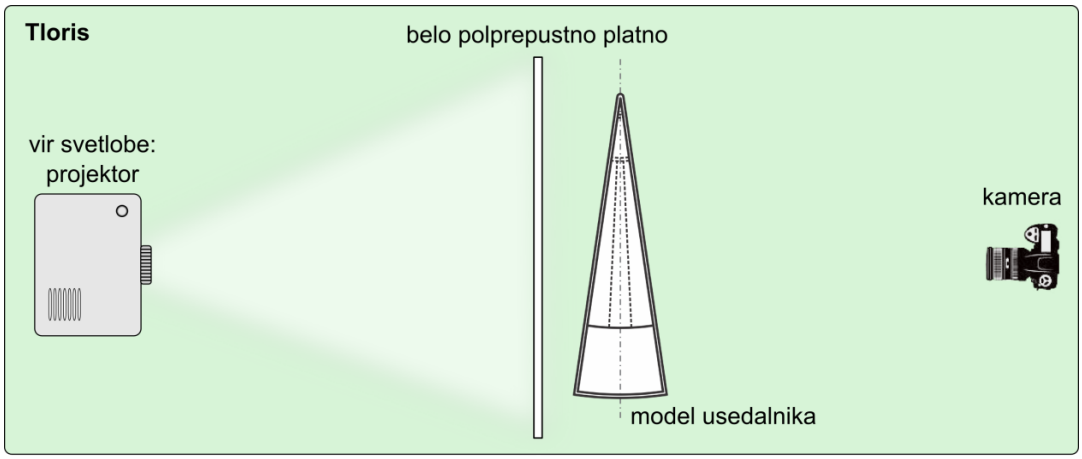
Za vseh šestdeset poskusov z delci in tri poskuse z barvilom so bili procesi na modelu usedalnika posneti z digitalno kamero. Posnetki so omogočali večkraten ogled fenomena in, kar je še bolj pomembno, uporabljeni so bili za določitev trendov kakovosti vode na iztoku iz usedalnika s fotogrametričnim pristopom ter za določitev tokovne slike v usedalniku s pomočjo računalniško podprte metode vizualizacije tokovnega polja.

Fizikalno ozadje in drugi principi fotogrametrične metode in računalniško podprte vizualizacije so bili že razloženi v poglavjih 2.5.1 in 2.5.3. V tem poglavju bodo zato predstavljene le specifike snemanja, ki jih je treba vsakokrat znova prilagoditi značilnostim obravnavanega fenomena oziroma poskusa.

Za zajem podatkov so bili poskusi posneti z digitalno kamero Casio EX-F1. Snemanje video posnetkov s frekvenco 30 sličic na sekundo je potekalo pri nastavitvi konstantne osvetlitve slike - količina svetlobe, ki jo objektiv spušča v kamero, je bila tako tekom eksperimenta ves čas enaka.

Snov, ki je bila dodana vodi, je bila odločilna za potek snemanja. S tehničnega vidika snemanja se lahko poskusi razdelijo na dve glavni skupini: uporaba fino mlete lešnikove lupine in barvila je bila posneta z enim pristopom, uporaba steklenih delcev pa z drugačnim pristopom.

Pri poskusih, pri katerih je bila uporabljena mleta lešnikova lupina, je bil proces osvetljevan s pomočjo projektorja. Na površino usedalnika je bila projicirana bela svetloba. Med virom svetlobe in modelom usedalnika je bil nameščen bel polprepusten zaslon, s čimer je bila dosežena bolj homogena osvetlitev (Slika 3.7). Pri takšni postavitvi kamere in tipu osvetlitve je posnetek fenomena odraz pravokotne projekcije na navpično sredinsko ravnino modela usedalnika in ne odraz procesov v radialnem prerezu usedalnika, v eni sami ravnini.

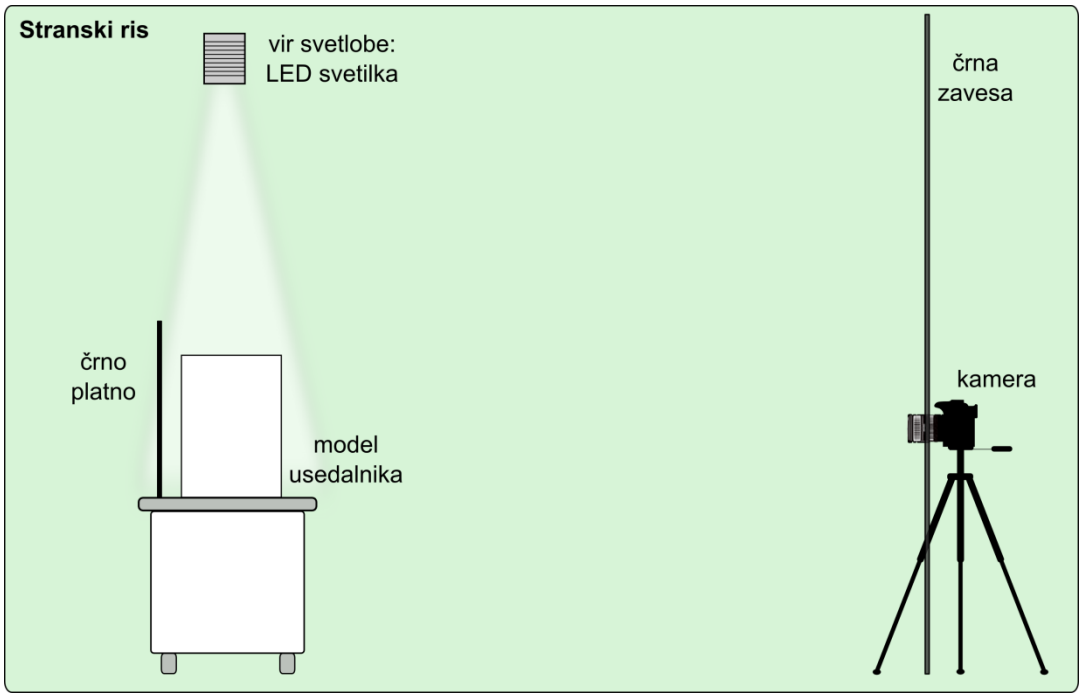


Slika 3.7: Shema snemanja poskusov; postavitev velja za eksperimente, pri katerih je bila uporabljena mleta lešnikova lupina, ter za kontrolne eksperimente z barvilom

Figure 3.7: Scheme of the shooting set-up; this configuration was used for filming the experiments with ground hazelnut shell and for control experiments with dye

Uporaba steklenih zrnc je zahtevala drugačen pristop snemanja. Ker so bile steklene mikrokroglice v vodi komaj opazne, je bilo treba zagotoviti ustrezen barvni kontrast. Narejenih je bilo več preliminarnih poskusov, na podlagi katerih so se določili idealni pogoji za snemanje. Glavni alternativi sta bili: obarvanost vode z barvilom, s čimer bi se dosegel večji kontrast med delci in medijem, ter črno platno za modelom usedalnika. Izkazalo se je, da je najboljša rešitev uporaba črnega platna v ozadju in kot vir svetlobe LED svetilo, ki je bilo nameščeno nad modelom usedalnika (Slika 3.8).

Neželeni stranski učinek te izvedbe je bilo odsevanje svetlobe od modela proti kameri. Črno ozadje za pleksi steklom je namreč povzročilo učinek ogledala. Motnja je bila uspešno odpravljena z veliko črno zaveso, v katero je bila vrezana odprtina za objektiv kamere (Slika 3.8).

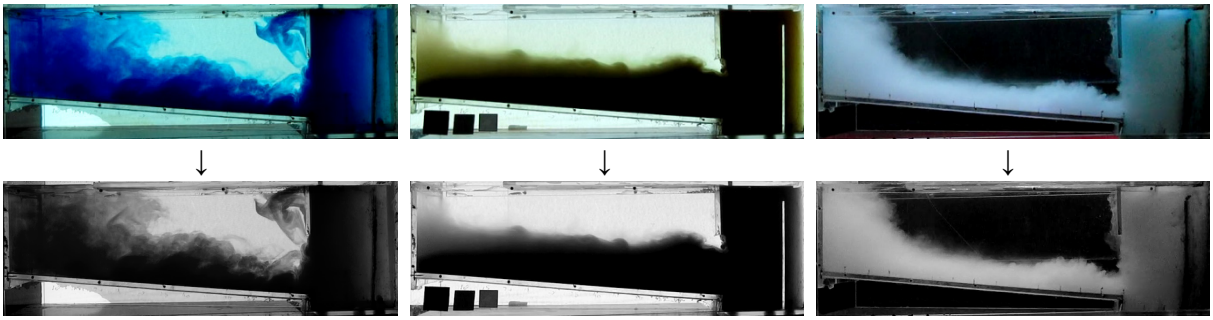


Slika 3.8: Shema snemanja poskusov; postavitev velja za eksperimente s steklenimi delci

Figure 3.8: Scheme of the shooting set-up; the configuration applies to experiments with glass particles

Priprava sličic posnetka

Iz video posnetkov poskusov so bile izdelane serije zaporednih sekvenc – barvnih sličic (ang. *frame*) v .bmp formatu (8-bitna barvna globina). Razrez filma na posamezne sličice je bil narejen s pomočjo programskega orodja RAD Video Tools. Za nadaljnjo obdelavo so bile barvne slike posnetka pretvorjene v črno-bele različice.



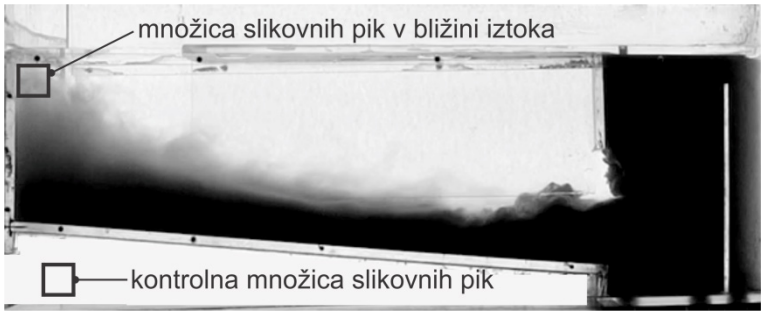
Slika 3.9: Prikaz doseženih barvnih kontrastov pred in po pretvorbi sličic posnetka v črno-belo barvo; od leve proti desni si sledijo primeri pri snemanju z vnosom različnih snovi: primer z barvilom (levo), primer z mleto lešnikovo lupino (na sredini), primer s steklenimi mikrokroglicami (desno)

Figure 3.9: Colour contrasts before and after conversion of bitmap to greyscale colour scheme; examples of frames from filming with different introduced matter, from left to right: an example with dye (left), an example with ground hazelnut shell (in the middle); an example with glass microspheres (right)

Za vse uporabljene snovi (barvilo, lešnikova lupina, steklo) prikazuje Slika 3.9 primere sličic posnetkov pred in po pretvorbi v črno-belo barvno skalo. Vidi se, da je bil pri obeh različicah snemanja dosežen ustrezen barvni kontrast, nujen za izvedbo fotogrametrične metode in računalniško podprte metode vizualizacije tokovnega polja.

Indikator koncentracije suspenzije

V neposredni bližini iztočnega preliva in znotraj vtočnega jaška je bil izbran kvadrat, ti. okno slikovnih pik, v katerem je bila opazovana stopnja sivine. Ker se je bilo v hidravličnem laboratoriju nemogoče popolnoma izogniti vplivu zunanje svetlobe, je bila na platnu izbrana tudi kontrolna množica slikovnih pik, ki je služila izločitvi vpliva manjših sprememb v svetlobi (med poskusom in razlike med posameznimi poskusi) na rezultate (Slika 3.10). Razsežnost vseh treh izbranih množic je bila 5 x 5 pikslov.



Slika 3.10: Okno slikovnih pik v bližini iztočnega preliva za opazovanje stopnje sivin ter kontrolno okno slikovnih pik

Figure 3.10: Window of pixels near the effluent to observe the average greyscale levels, and control window of pixels

Z digitalno obdelavo črno-belih sličic so bili pridobljeni časovni poteki povprečne intenzitete sivine za izbrani množici slikovnih pik. Intenziteta sivin na črno-beli sliki (8-bitne barvne globine) lahko zaseda vrednosti med 0 (črna) in 255 (bela). Temnejšemu odtenku sive tako pripada nižja vrednost intenzitete kot svetlejšemu odtenku sive.

Kadar koncentracija v opazovanem območju narašča, intenziteta sivine pri poskusih s fino mleto lešnikovo lupino pada (enačba (2.69a); Slika 3.9, na sredini), pri poskusih s steklenimi delci pa se veča (enačba (2.69b); Slika 3.9, desno). Zato je bil vpeljan indikator koncentracije kot enotni parameter, ki pri vseh modelnih delcih na enak način odraža spremembe v koncentraciji. Na osnovi začetnega stanja v bližini iztoka (čista voda) so bili vsi časovni nizi podatkov o povprečni intenziteti sivine normirani in prirejeni tako, da so bile izhodiščne vrednosti nastavljene na 0. Indikator koncentracije v izbranem oknu pikslov definirata enačbi:

$$I_G(t) = 1 - \frac{G(t)}{G_{max}}, \quad \text{za poskuse z mleto lešnikovo lupino} \tag{3.14a}$$

$$I_G(t) = \frac{G(t)}{G_{max}}, \quad \text{za poskuse s steklenimi zrnci} \tag{3.14b}$$

kjer sta: G povprečna intenziteta sivine v izbranem oknu slikovnih pik

G_{max} maksimalna intenziteta sivine znotraj obravnavanega niza podatkov o povprečni intenziteti sivine (velja za en posnetek in eno izbrano okno slikovnih pik)

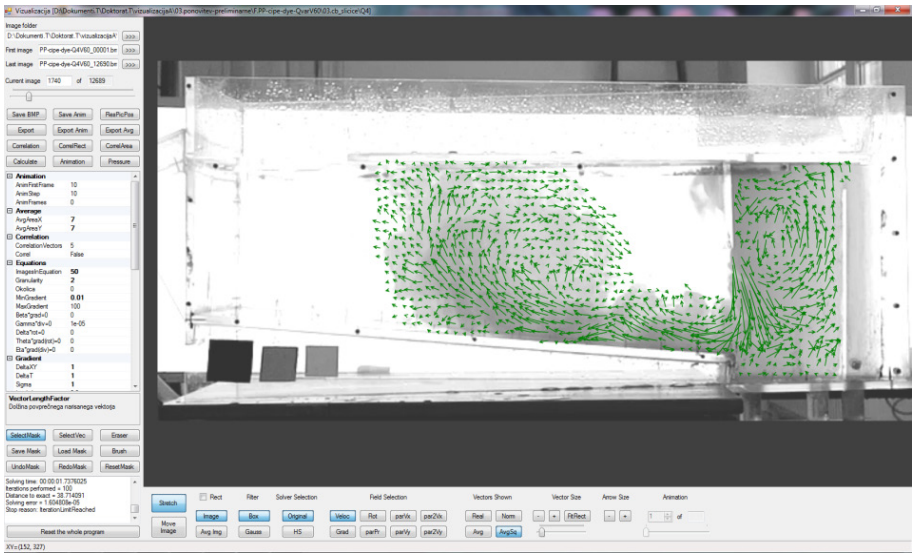
Intenziteta povprečne sivine kontrolne množice pikslov je služila kot neodvisni pokazatelj svetlobnih razmer, na osnovi katerega se je lahko ovrednotil vpliv zunanjih dejavnikov na osvetlitev. V dveh primerih so bile spremembe svetlobe tako izrazite, da je bilo treba poskus ponoviti.

Snemanje serije poskusov s fino mleto lešnikovo lupino je bila izvedeno dvakrat. Na podlagi rezultatov obdelave niza posnetkov iz preliminarne skupine je bil izbran čas trajanja eksperimenta. Glede na to, kdaj je pri veliki večini poskusov indikator koncentracije dosegel vrednost 1, tj. padel iz merilnega območja, je bilo določeno, da se bodo vsi poskusi snemali sedem minut. S prostim očesom je bil proces usedanja v usedalniku pogosto neprepoznaven že mnogo prej.

Računalniško podprta metoda vizualizacije tokovnega polja

Kinematika toka v modelu usedalnika je bila kvalitativno in kvantitativno preučevana s pomočjo neinvazivne računalniško podprte metode vizualizacije tokovnega polja, ki so jo razvili na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani (Bajcar et al., 2009) in Abelium d.o.o. Kot vhodni podatek je bilo treba v program poklicati zaporedne črno-bele sličice posnetka.

Poleg izbora časa (oziroma zaporedne sličice) za določitev vektorskega polja program v uporabniškem vmesniku omogoča določitev številnih drugih parametrov, ki vplivajo na numeričen izračun (Slika 3.11). To so npr.: število zaporednih sličic, ki bodo uporabljene pri numeričnem reševanju, resolucija rešitve (velikost najmanjše celice, za katero bo določen vektor), koeficient difuzije in še mnogi drugi.



Slika 3.11: Uporabniški vmesnik programske opreme za računalniško podprto vizualizacijo tokovnega polja

Figure 3.11: User interface of the software for computer-aided flow visualization

Metoda omogoča določitev vektorskega polja toka. To pomeni, da izračuna tako smer kot velikost hitrosti toka. Pri eksperimentalni študiji na modelu usedalnika je bil poudarek na določitvi splošne tokovne strukture v usedalni komori, medtem ko same magnitude vektorjev hitrosti niso bile podrobneje obravnavane oziroma analizirane.

Kvalitativna vizualizacija tokovnega polja

Poleg sodobnejšega pristopa opisane računalniško podprte metode vizualizacije tokovnega polja se je lahko hidrodinamične razmere na modelu opazovalo tudi s prostim očesom. Pri številnih poskusih pa so v neki fazi koncentracije na modelu postale tako visoke, da se tokovnih razmer ni več dalo razločiti. Še preden je fotogrametrično določena intenziteta sivine padla na 0 pri lešnikovi lupini oziroma zrasla na 1 pri steklenih delcih, je lahko vizualizacija toka postala (tako s prostim očesom kot računalniško podprta) nedoločljiva.

Zato je bilo osem minut po začetku poskusa v rezervoar dodano modro barvilo, s čimer je bila začasno ponovno omogočena kvalitativna vizualizacija tokovnih struktur (Slika 2.1). Vidnost toka sveže suspenzije je bila odvisna od snovi in koncentracije v vodi in ni bila vedno zadovoljiva; v nekaterih primerih pa je zadoščala za grobo oceno vzorca toka, ki se je vzpostavil v usedalniku po osmih minutah od začetka poskusa.

Slika 3.12: Kvalitativna vizualizacija tokovnih struktur pri visokih koncentracijah suspendiranih delcev z vnosom sledila

Figure 3.12: Qualitative visualization of flow structures at high suspended solids concentrations by introducing a tracer

3.2.3 Določitev učinkovitosti

Normirane intenzitete sivine v oknu pikslov v vtočnem jašku in v območju ob iztoku so služile kot pokazatelj časovnih trendov v kakovosti vode na vtoku in iztoku iz usedalnika. Za kvantitativno določitev učinkovitosti čiščenja pa je bil fotogrametrični pristop premalo natančen. Za izračun učinkovitosti so bili zato uporabljeni samo rezultati vzorčenja. Najprej so bile na podlagi kalibracijskih krivulj prostornine usedline v sedimentacijskem liju posameznih vzorcev pretvorjene v koncentracije. Kadar je bil volumen usedline po 25 minutah manjši od 0,1 ml, se koncentracije suspenzije ni dalo točno določiti. V teh primerih je bilo v preglednici zabeleženo, da je koncentracija vzorca nižja od tiste, ki pri danih modelnih delcih pripada 0,1-mililitrski prostornini usedline.

$$c(V_{ss} = 0{,}1\ \text{ml}) = c_{d.min} \tag{3.15}$$

kjer sta: V_{ss} prostornina usedline 0,5-litrskem v vzorcu po 25 minutah usedanja v Imhoffovem liju

$c_{d.min}$ najmanjši masni delež trdnih delcev v vzorcu suspenzije, ki se ji z uporabljeno metodo še lahko določi koncentracija

Učinkovitost čiščenja je bila izračunana po enačbi (2.1) za tiste pare vzorcev, ko sta bili določljivi koncentracija na vtoku in iztoku. V primeru, da je bila številčno določljiva samo koncentracija na vtoku, je bilo za učinkovitost zapisano, da je večja od vrednosti, ki bi veljala za $c_{ef} = c_{d.min}$, kakor podaja izraz:

$$\eta\left(c_{ef} < c_{d.min}\right) > 1 - \frac{c_{d.min}}{c_{in}} \tag{3.16}$$

V primeru, da je bila številčno določljiva samo koncentracija na iztoku ali pa sta bili nedoločljivi obe koncentraciji, je bilo nedoločljiva tudi učinkovitost.

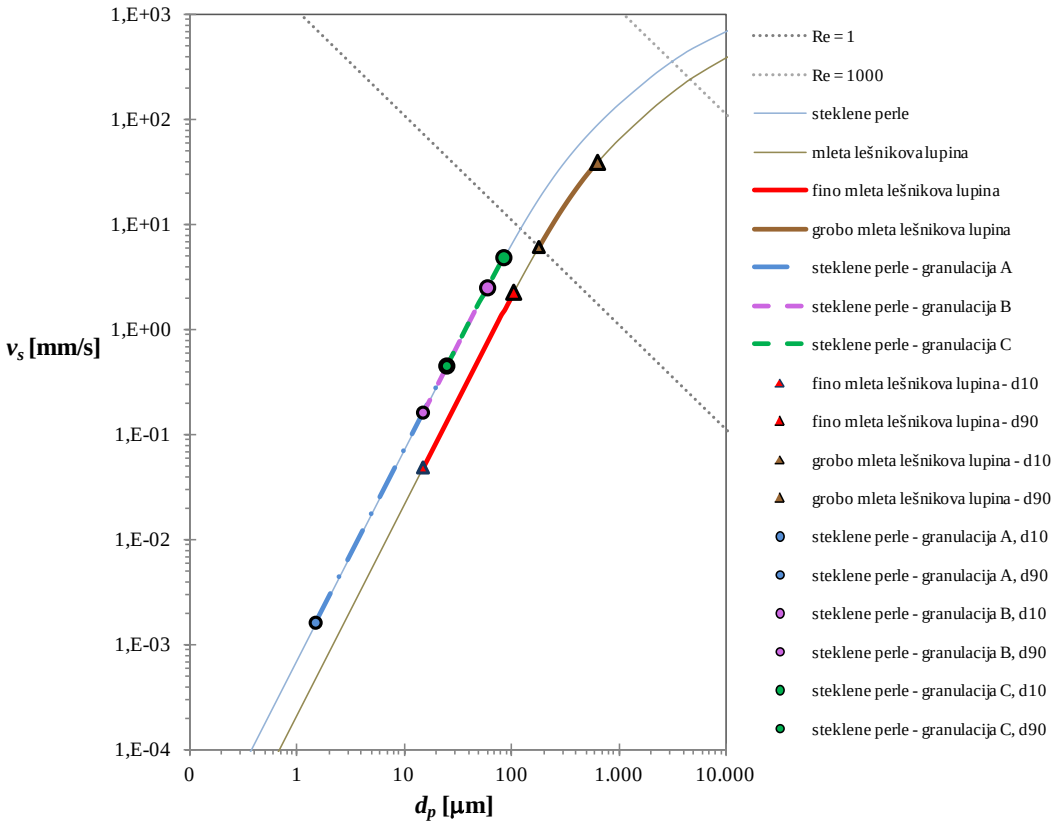
4 REZULTATI IN RAZPRAVA

Z različnimi pristopi oziroma metodami so bili določeni kakovost suspenzije na vtoku in iztoku, učinkovitost čiščenja ter tokovna slika v usedalniku. Analize rezultatov so omogočile opredelitev vplivov obratovalnih parametrov in fizikalnih lastnosti delcev na tokovno polje, ter vplivov same tokovne strukture na delovanje usedalnika.

4.1 Lastnosti usedanja delcev

Vsem modelnim delcem so bile na podlagi podatkov o njihovi gostoti in velikosti računsko določene hitrosti usedanja (diskretno usedanje delcev). Grafikon 4.1 podaja hitrosti usedanja modelnih delcev na velikostnem intervalu od 10. do 90. percentile premera delcev. Glede na pripadajoče vrednosti Reynoldsovega števila delca bi se pri večini modelnih delcev pri prostem, neoviranem usedanju v okolici delca vzpostavile laminarne razmere. Izjema je grobo mleta lešnikova lupina, katere delci zaradi visokih vrednosti Re_p v celoti padejo v prehodni režim toka (Grafikon 4.1).

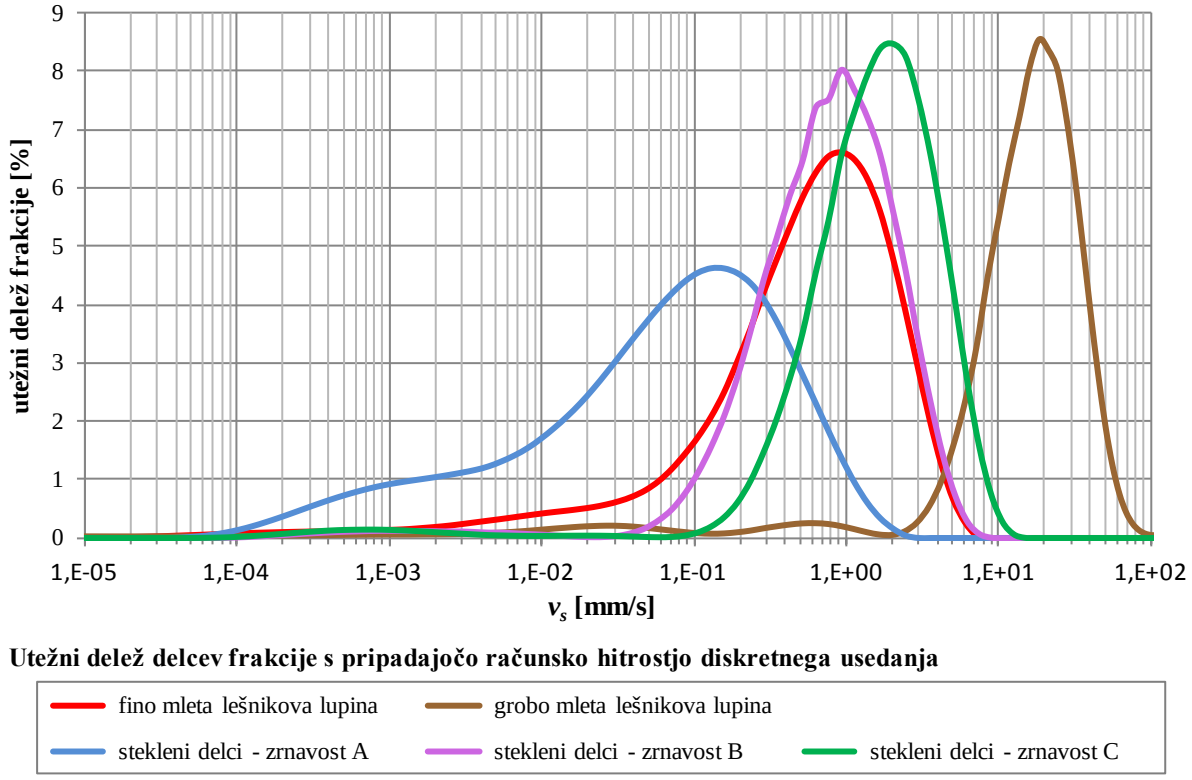
Pri določanju teoretičnih hitrosti usedanja so bile uporabljene enačbe, ki veljajo za okrogle delce z gladko površino. Zato je vrednosti za lešnikovo lupino treba jemati z zadržkom, saj njihova oblika ni znana, oziroma je ocenjena na oko kot približno okrogla. Če njihova oblika odstopa od oblike kroglice, so po teoriji njihove hitrosti diskretnega usedanja nekoliko manjše.



Grafikon 4.1: Hitrosti usedanja delcev, ki so v poskusih služili kot modelna suspendirana snov; vrednosti veljajo za usedanje posameznih delcev ob predpostavki okrogle oblike delca

Graph 4.1: Settling velocities of particles that served as a settling matter in experiments; the values apply to discrete particle settling and assuming a round shape of particle

Za lažjo primerjavo hitrosti usedanja med obravnavanimi modelnimi delci je bil izdelan še Grafikon 4.2, na katerem so na abscisni osi (v desetiškem logaritmičnem merilu) podane vrednosti računsko določenih hitrosti diskretnega usedanja s pripadajočimi utežnimi deleži frakcij na ordinatni osi. Za karakteristična zrna posameznih suspendiranih snovi podaja računske vrednosti hitrosti diskretnega usedanja Preglednica 4.1.



Grafikon 4.2: Porazdelitev hitrosti usedanja delcev, ki so v poskusih služili kot modelna suspendirana snov; vrednosti so računske in veljajo za diskretno usedanje ob predpostavki okrogle oblike delca

Graph 4.2: Distribution of settling velocities of particles that served as a settling matter in experiments; the values are calculated and apply to discrete particle settling assuming round shape of the particle

Steklene mikrokroglice zrnavosti B so bile izbrane na podlagi kriterija, da ima zrno srednjega premera računsko hitrost usedanja primerljivega velikostnega razreda kot zrno srednjega primera fino mlete lešnikove lupine. Za ti dve skupini delcev je zastopanost hitrosti usedanja očitno precej primerljiva na celotnem spektru delcev (Grafikon 4.2).

Preglednica 4.1: Računsko določene okvirne vrednosti hitrosti diskretnega usedanja delcev karakterističnih premerov za vseh pet suspendiranih snovi

Table 4.1: Calculated frame values of discrete settling velocities of characteristic diameter particles for all five mixtures of settling matter

suspendirana snov	mleta lešnikova lupina		steklene mikrokroglice		
	fino mleta	grobo mleta	zrnavost A	zrnavost B	zrnavost C
$v_s(d_{10})$ $[mm/min]$	3	368	0,1	10	27
$v_s(d_m)$ $[mm/min]$	55	1101	9	53	109
$v_s(d_{90})$ $[mm/min]$	137	2356	29	151	292

4.2 Kakovost suspenzije na vtoku in iztoku

Vsebnost trdnih delcev v vodi se je spremljala na vtoku in iztoku iz usedalnika kvantitativno z odvzemom vzorcev ter kvalitativno s fotogrametričnim pristopom.

4.2.1 Vzorčenje

Pri eni seriji šestdesetih poskusov vseh kombinacij obratovalnih parametrov (pretok in nazivna koncentracija) in modelnih delcev se je na vtoku (v rezervoarju) in na iztoku izvajalo vzorčenje.

Kalibracijske krivulje

Za vseh pet modelnih delcev so bile izdelane kalibracijske krivulje, na podlagi katerih so bili rezultati testov usedanja v Imhoffovem liju za vzorce, odvzete na vtoku in iztoku, pretvorjeni v masne deleže trdnih delcev.

Rezultate testov usedanja v liju za sedimentacijo po Imhoffu za kalibracijo podaja Preglednica 4.2.

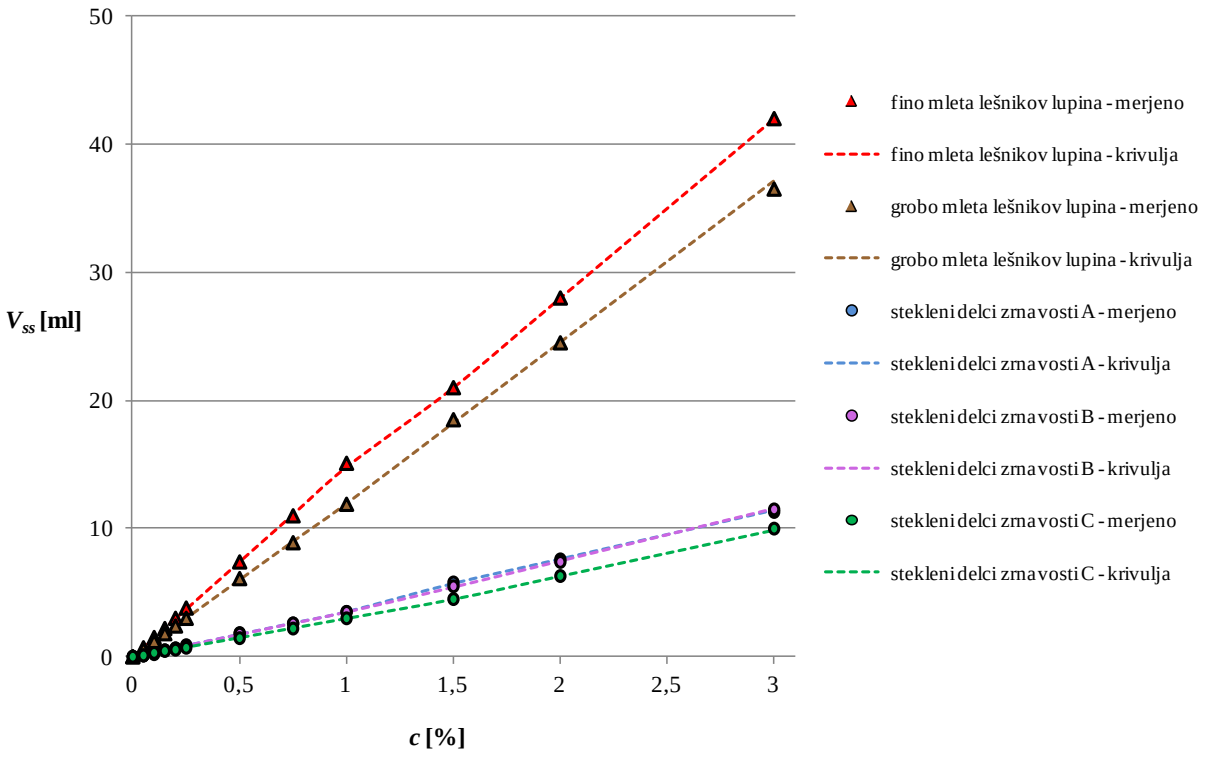
Preglednica 4.2: Prostornina usedline po 25 minutah usedanja suspenzije v Imhoffovem liju (rezultati testov za izdelavo kalibracijskih krivulj)

Table 4.2: Sludge volume after 25 minutes of suspension's settling in an Imhoff cone (tests results for elaboration of calibration curves)

	Masni delež trdnih delcev v pripravljeni suspenziji [%]										
Modelni delci	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,50	0,75	1,00	1,50	2,00	3,00
fino mleta lešnikova lupina	0,7	1,5	2,2	3,0	3,8	7,4	11,0	15,1	21	28	42
grobo mleta lešnikova lupina	0,6	1,2	1,8	2,4	3,0	6,1	8,9	11,9	18,5	24,5	36,5
zrnavost A	0,1	0,2	0,5	0,7	0,9	1,85	2,6	3,5	5,8	7,6	11,3
zrnavost B	0,1	0,3	0,5	0,7	0,85	1,8	2,6	3,5	5,5	7,4	11,5
zrnavost C	0,1	0,3	0,45	0,6	0,7	1,45	2,2	3,0	4,5	6,3	10,0

Na podlagi empirično določenih zvez med masnimi koncentracijami trdnih delcev in prostornino usedline v pollitrskem vzorcu (po 25 minutah usedanja) so bile izdelane kalibracijske krivulje (Grafikon 4.3).

Vedeti je treba, da usedlino poleg trdnih delcev sestavlja tudi določen delež vode, zato prostornina usedline ni enaka skupni prostornini delcev. Rezultati testov kažejo, da odvisnost med prostornino usedline in koncentracijo suspenzije ni povsem linearna. Pri vseh petih modelnih delcih se je naklon premice, ki se najbolje prilega empiričnim točkam, pri višjih koncentracijah malenkostno spremenil (Priloga D). Nezanemarljive razlike med rezultati so tudi med modelnimi delci različnih velikosti znotraj enake snovi (in s tem enake gostote). Kalibracijske krivulje večjih delcev so položnejše, kar pomeni, da je v usedlini trdnih delcev večjih velikosti manjši delež vode (Grafikon 4.3).



Grafikon 4.3: Zveza med masnim deležem trdnih delcev in prostornino usedline po 25 minutah usedanja pollitrskega vzorca v Imhoffovem liju (empirične točke in kalibracijske krivulje)

Graph 4.3: Dependence between mass fraction of solid particles and sludge volume after 25 minutes of settling of a half litre sample in an Imhoff cone (empirical data and calibration curves)

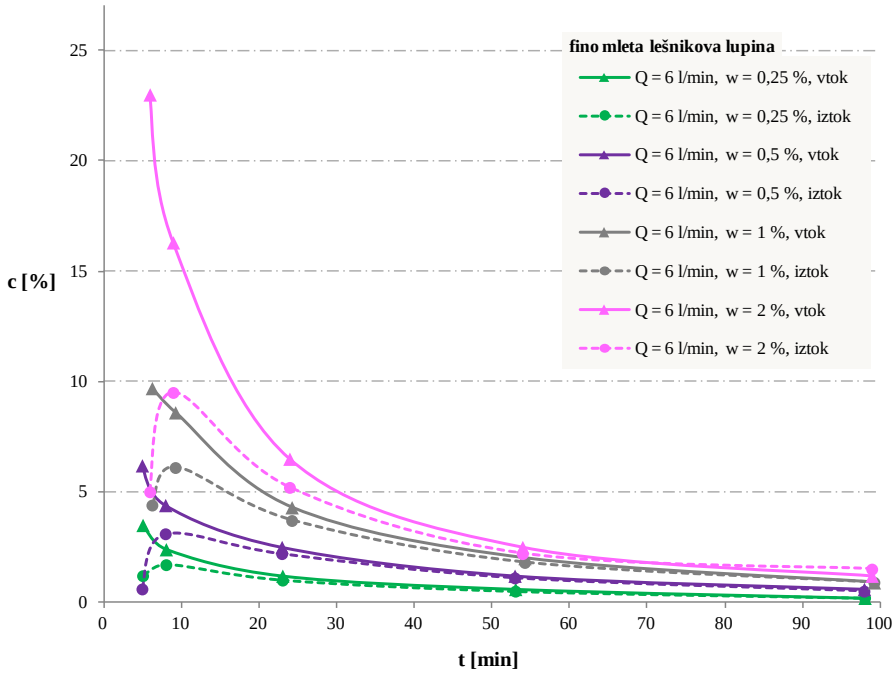
Vseh pet kalibracijskih krivulj podaja Grafikon 4.3, posamezne kalibracijske krivulje pa so zaradi boljše razločnosti prikazane še na samostojnih grafikonih v prilogah (Priloga D).

Rezultati vzorčenja

Preglednice z rezultati vseh vzorčenj in obdelavami podatkov so v prilogah (Priloga H), tudi grafični prikaz rezultatov vseh vzorčenj je na grafikonih v prilogah (Priloga F). V tem poglavju pa sta podana dva primera: koncentracije vzorcev za štiri poskuse s pretokom 6 l/ min prikazujeta Grafikon 4.4 za fino mleto lešnikovo lupino in Grafikon 4.5 za steklene mikrokroglice zrnavosti C.

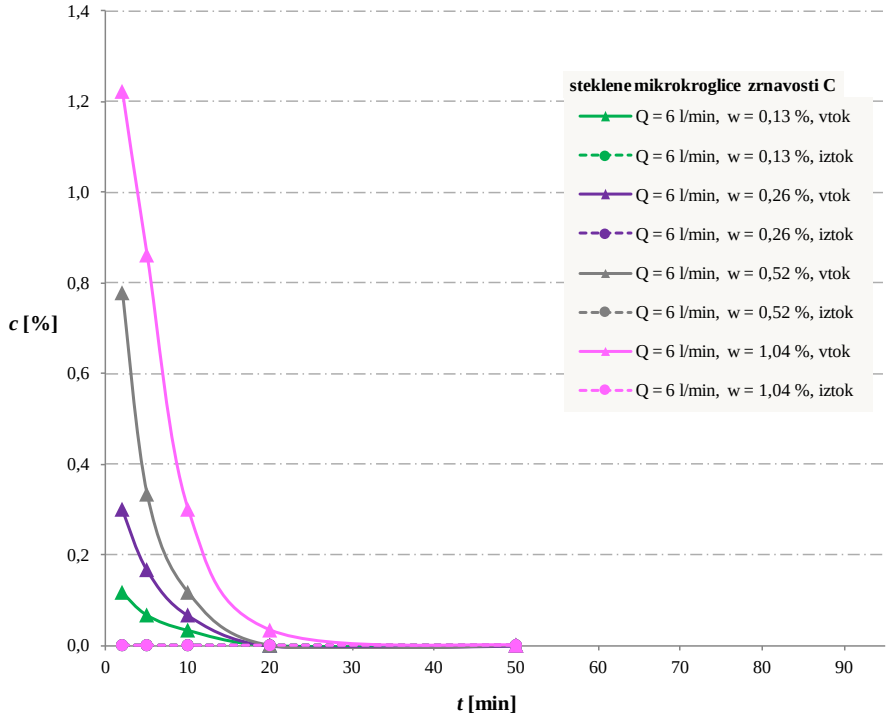
Pri vseh poskusih so vrednosti koncentracij s časom padale, tako na vtoku kot na iztoku. Izjema je le prvi del poskusa: ker je v začetnem stanju voda na iztoku povsem čista, koncentracije v začetku kratek čas naraščajo.

Pri grobo mleti lešnikovi lupini in pri steklenih delcih zrnavosti C je bilo veliko vzorcev s tako nizkim deležem trdnih delcev, da se s testi usedanja v Imhoffovem liju koncentracije ni dalo določiti (npr. Grafikon 4.5), ker je bila po 25 minutah prostornina usedline v sedimentacijskem liju še vedno manjša od 0,1 ml. Tudi sicer je bila zaradi načina izvedbe poskusov koncentracija sveže suspenzije že po 50 minutah zelo nizka in težje primerljiva z obremenjenostjo odpadne vode s trdnimi delci na realnih usedalnikih.



Grafikon 4.4: Masni delež delcev v vzorcu na vtoku in iztoku; fino mleta lešnikova lupina: primeri s pretokom 6 l/min

Graph 4.4: Time series of mass concentration in influent and effluent samples; fine ground hazelnut shell: cases with volume flow rate of 6 l/min



Grafikon 4.5: Masni delež delcev v vzorcu na vtoku in iztoku; stekleni delci zrnavosti C: primeri s pretokom 6 l/min

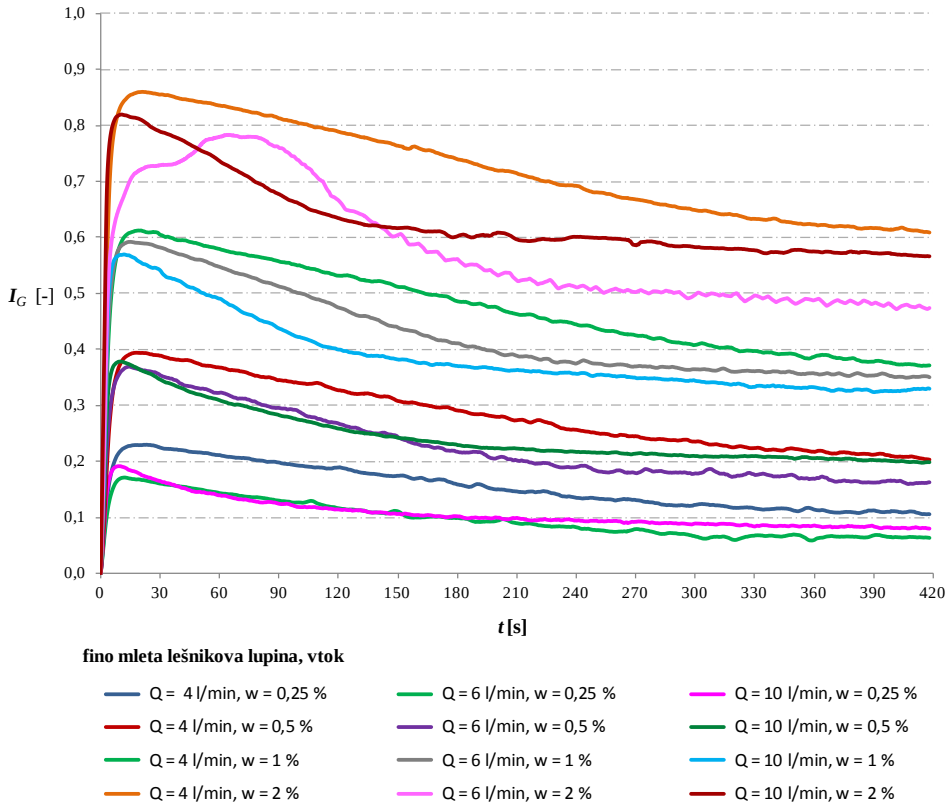
Graph 4.5: Time series of mass concentration in influent and effluent samples; C granulation glass particles: cases with volume flow rate of 6 l/min

4.2.2 Fotogrametrično določen indikator koncentracije

Indikator koncentracije suspenzije je bil za vse poskuse določen na vtoku in na iztoku iz usedalnika. Ker je eksperimentalno študijo s snemanjem fenomena sestavljalo šestdeset poskusov s trdnimi delci (tj. različne kombinacije treh pretokov, štirih relativnih razlik v gostoti med svežo suspenzijo in medijem v usedalniku ter petih različnih modelnih delcev), je bilo s fotogrametrično metodo izdelanih šestdeset krivulj indikatorja koncentracije za vtok in šestdeset krivulj indikatorja koncentracije za iztok. Omenjene krivulje prikazujejo za vtok Grafikon 4.6 za poskuse s fino mleto lešnikovo lupino, za iztok pa Grafikon 4.7 in Grafikon 4.8 za poskuse s fino mleto lešnikovo lupino ter Grafikon 4.9 za poskuse s steklenimi delci zrnavosti C. Preostale krivulje indikatorja koncentracije na iztoku so v prilogah (Priloga F), druge krivulje za vtok pa zaradi nerelevantnosti niso podane.

Indikator koncentracije vtoka

Časovni potek vrednosti indikatorja koncentracije na vtoku je relativno nezanimiv, saj o delovanju usedalnika pove zelo malo in je zelo podoben pri vseh obravnavanih poskusih. Na začetku, ko je v vtočnem jašku še čista voda, se krajši čas koncentracija trdnih delcev hitro povečuje, dokler ne doseže maksimalne vrednosti (Grafikon 4.6). Kasneje indikator koncentracije počasi pada, kar gre pripisati manjši vsebnosti trdnih delcev v rezervoarju zaradi dotekanja dokaj čiste vode preko iztočnega preliva.



Grafikon 4.6: Časovni potek indikatorja koncentracije suspenzije na vtoku; vsi primeri s fino mleto lešnikovo lupino

Graph 4.6: Time series of the concentration indicator of the influent concentration; all experiments with fine ground hazelnut shell

Zaradi dokaj enoličnega značaja krivulj, ki podajajo časovni potek indikatorja koncentracij, ti rezultati kakšne posebne obravnave niso bili deležni.

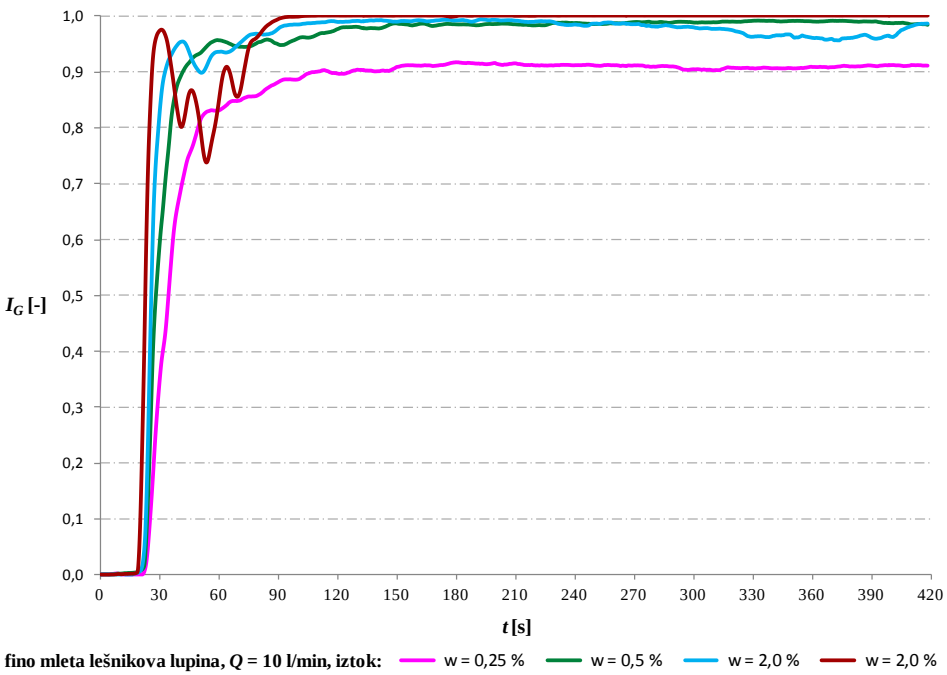
Indikator koncentracije iztoka

Izhodiščna vrednost indikatorja koncentracije je 0, kar se ujema z začetnim stanjem, ko je bila v modelu usedalnika samo čista voda. Ko koncentracija v opazovalnem oknu doseže ali celo preseže meje merljivega, ima indikator koncentracije vrednost 1.

Iz primerjave krivulj, ki opisujejo časovni potek indikatorja koncentracije na iztoku, je razvidno, da se pojavljata dva glavna tipa krivulj. Pri prvem tipu indikator koncentracije iztočne suspenzije v obravnavanem časovnem odseku (v sedmih minutah od začetka poskusa) pretežno ves čas narašča. Potek drugega tipa krivulje je bolj razgiban, saj ima poleg naraščajočih tudi enega ali več občutno padajočih odsekov.

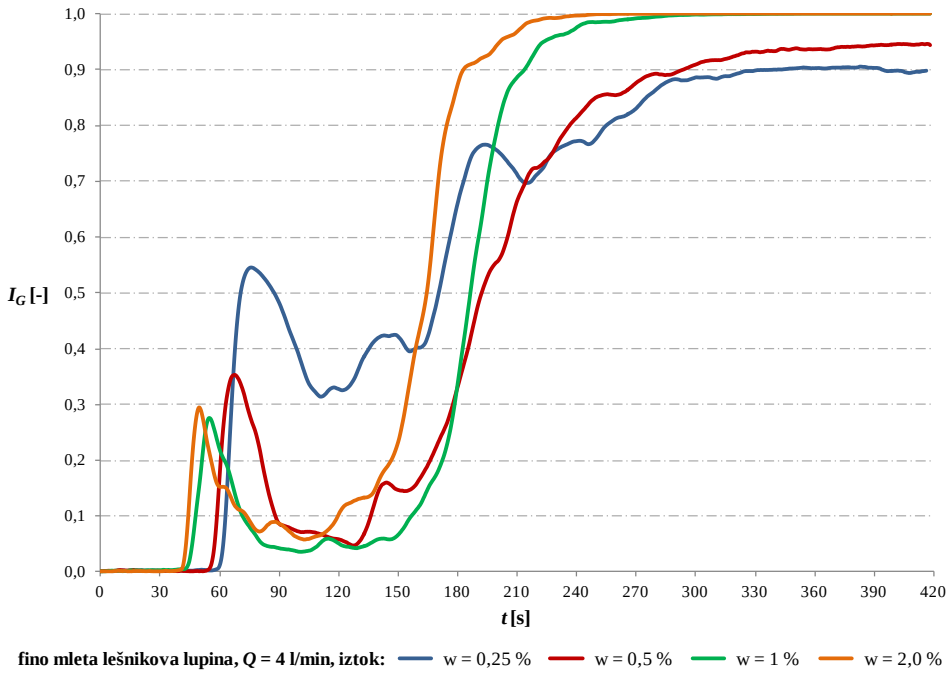
Obe krivulji se začneta s približno ravno horizontalno linijo (preden trdni delci dosežejo območje ob iztoku), ki ji sledi strmo linearno naraščanje, ko se zaradi dotekanja sveže suspenzije kakovost vode na iztoku slabša (Grafikon 4.7 in Grafikon 4.8). Kasneje bo prvi tip krivulje z blagim prehodom spremenil naklon tako, da je časovni prirast indikatorja bistveno manjši (Grafikon 4.7: w = 0,25 % in w = 0,5 %).

Kot že omenjeno, ima na začetku poskusa tudi drugi tip krivulje podobne značilnosti kot prvi tip: vodoravna linija, ki ji sledi strm prirast, kar fizikalno predstavlja hitro povečanje deleža trdnih delcev na iztoku. Na neki točki krivulja neha rasti in začne padati. Spremembe v trendu padanja in rasti indikatorja koncentracije se zgodijo vsaj enkrat, kar pomeni, da je v obravnavanem časovnem intervalu na krivulji najti vsaj en izrazitejši lokalni maksimum in lokalni minimum (Grafikon 4.8: vsi primeri). Takšno obnašanje nakazuje, da se je med poskusom koncentracija iztoka v določenem trenutku (enkrat ali večkrat) zmanjšala, čeprav je sveža suspenzija še vedno vstopala v usedalnik.



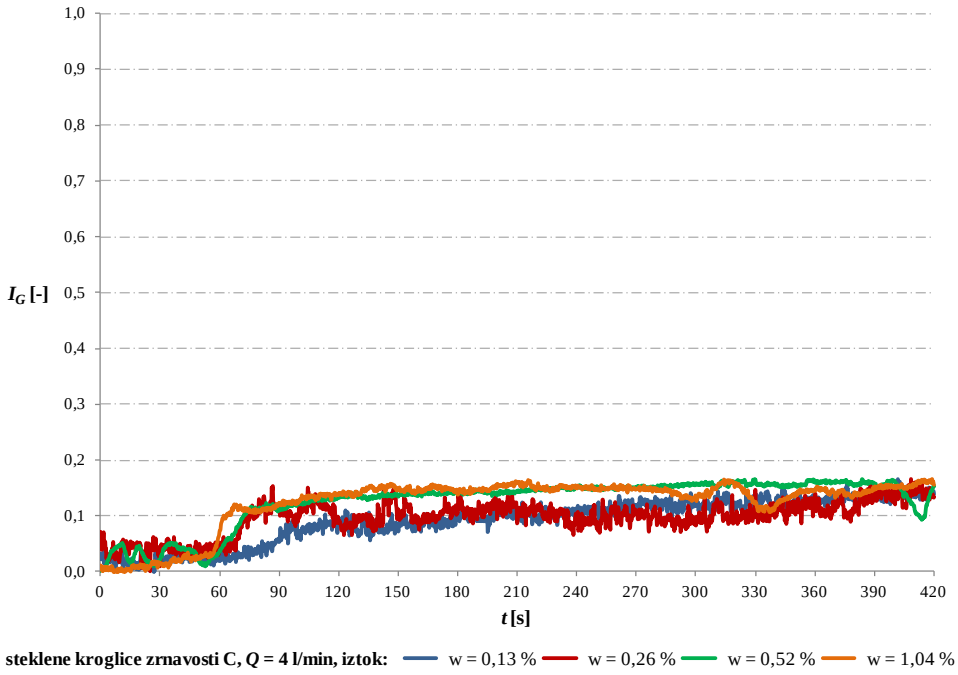
Grafikon 4.7: Časovni potek indikatorja koncentracije v območju v okolici iztočnega preliva; fino mleta lešnikova lupina, pretok skozi sistem 10 l/min

Graph 4.7: Time series of the concentration indicator in the region near the effluent weir; fine ground hazelnut shell, the flow rate in the system set to 10 l/min



Grafikon 4.8: Časovni potek indikatorja koncentracije v območju v okolici iztočnega preliva; fino mleta lešnikova lupina, pretok skozi sistem 4 l/min

Graph 4.8: Time series of the concentration indicator in the region near the effluent weir; fine ground hazelnut shell, the flow rate in the system set to 4 l/min



Grafikon 4.9: Časovni potek indikatorja koncentracije v območju v okolici iztočnega preliva; stekleni delci zrnavosti C, pretok skozi sistem 4 l/min

Graph 4.9: Time series of the concentration indicator in the region near the effluent weir; fine ground hazelnut shell, the flow rate in the system set to 10 l/min

Pri delcih velikih hitrosti diskretnega usedanja, tj. pri grobo mleti lešnikovi lupini in pri steklenih mikrokroglicah zrnavosti C, so pri vseh poskusih nastopile le krivulje prvega tipa (Grafikon 4.9). Hitra rast indikatorja koncentracije je pri teh modelnih delcih trajala le malo časa, zato so tudi končne

vrednosti indikatorja relativno nizke. Takšen trend rasti nakazuje, da se pri večjih delcih lešnikove lupine (grobo mleata lešnikova lupina) in pri največjih izmed uporabljenih steklenih delcev, koncentracije na iztoku nikoli bistveno ne povečajo. To pa pomeni visoko učinkovitost usedalnika, ne glede na obratovalne parametre.

Pri preostalih delcih (fino mleta lešnikova lupina, stekleni delci zrnavosti A in B) pa so obratovalni parametri izrazito vplivali na kakovost vode na iztoku. Krivulja drugega tipa izkazuje trende, ki nakazujejo na učinkovitejše delovanje usedalnika.

Pri interpretaciji rezultatov je zelo pomembno zavedanje, da lahko vrednost indikatorja koncentracije 1 v sebi skriva širok spekter masnih deležev, ki so bili previsoki, da bi razlike med njimi fotogrametrična metoda sploh še lahko zaznala. Pri lešnikovi lupini je pri zasičenosti intenziteta sivine padla na 1 (črna barva), pri steklenih zrncih pa na vrednosti okrog 200 (svetlo siva). Povsem bela barva (vrednost povprečne intenzitete sivine izbranega okna slikovnih pik 255) ni nastopila nikoli. Pri steklenih delcih je zato pri največjih vrednostih indikatorja težje ugotoviti, ali se je koncentracija iztoka ustalila ali je presegla zgornjo mejo merilnega območja.

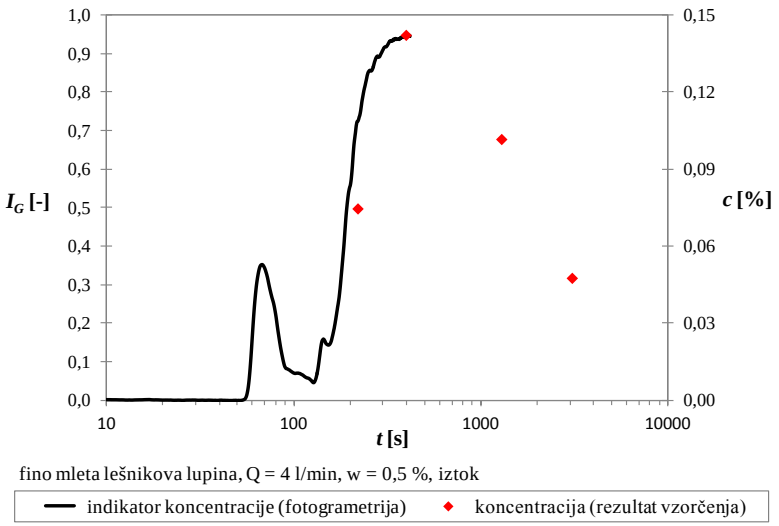
Ocena ustreznosti fotogrametrične metode

Kombinacija obeh pristopov se je izkazala za zelo smiselno. Fotogrametrični pristop omogoča zvezno spremljanje trendov v kakovosti vode na iztoku in vtoku in tako zazna tudi manjša in krajša nihanja. Uporaba tega pristopa pa je omejena, saj pri višjih koncentracijah povprečne vrednosti intenzitete sivin padejo iz merilnega območja. Na podlagi rezultatov preliminarnih poskusov je bil zato izbran enoten čas (sedem minut) za fotogrametrično obravnavo posnetka. Pri vzorčenju in določevanju koncentracij trdnih delcev s testi v sedimentacijskem liju pa je ravno nasprotno, saj je pri tej metodi merilno območje omejeno na nizke koncentracije.

Vzorčenje in določevanje vsebnosti trdnih delcev s sedimentacijskim lijem po Imhoffu sta že uveljavljeni metodi. Za vsako skupino modelnih delcev so bile izdelane tudi kalibracijske krivulje, ki povezujejo masni delež in prostornino usedline v Imhoffovem liju. Zaradi spremenljive debeline posode, zaradi ne povsem nadzorovanih zunanjih virov svetlobe in ker je veljavnost enačb (2.69a) in (2.69b) pri visokih koncentracijah vprašljiva, pa imajo rezultati fotogrametričnega pristopa nekoliko šibkejšo fizikalno podlago.

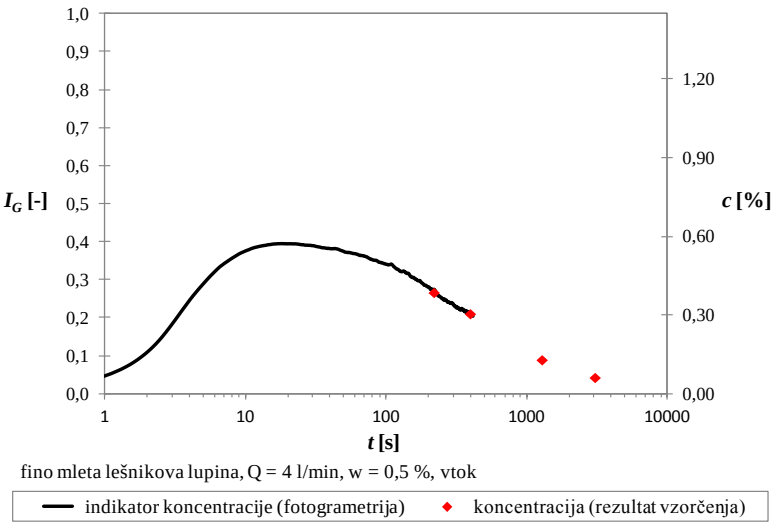
Da bi se ocenila pravilnost opisovanja trenda v spremembah koncentracij s fotogrametrično metodo, je bila izdelana primerjava rezultatov vzorčenja in indikatorjev koncentracij. Za primerjalno analizo so bile vrednosti indikatorja koncentracije ovrednotene v časovnih točkah, ki so se ujemale s časom odvzema vzorca. Ker sta bili izpeljani dve seriji poskusov (ena za snemanje fenomena in druga za vzorčenje), so se primerjane vrednosti nanašale na dva poskusa, pri katerih so bili obratovalni parametri in lastnosti modelnih delcev enaki.

Grafično primerjavo rezultatov obeh metod na primeru poskusa s fino mleto lešnikovo lupino z 0,5 % nazivno koncentracijo s pretokom 4 l/min podajata Grafikon 4.10 za iztok in Grafikon 4.11 za vtok. Zaradi relativno poznih odvzemov vzorcev je bil to edini primer s fino mleto lešnikovo lupino, kjer sta bili za primerjavo na voljo dve točki; primerjava zgolj z eno točko seveda ne bi bila smiselna. Merilo ordinatne osi za koncentracijo (desna os) je bilo izbrano tako, da se ena od dveh točk čim bolje prilega krivulji indikatorja koncentracije. Iz grafov je razvidno, da je pri prikazanem primeru ujemanje točk in krivulje pri vtoku odlično (Grafikon 4.11), pri iztoku pa v mejah sprejemljivega (Grafikon 4.10).



Grafikon 4.10: Kakovost suspenzije na iztoku: primerjava fotogrametrične določitve indikatorja koncentracije in merjenja koncentracije v vzorcih z metodo usedanja v Imhoffovem liju (primer)

Graph 4.10: Quality of the effluent: comparison of photogrammetric determination of concentration index and concentration measurements in samples by means of settling in the Imhoff cone (an example)



Grafikon 4.11: Vsebnost delcev na vtoku: primerjava fotogrametrične določitve indikatorja koncentracije in merjenja koncentracije v vzorcih z metodo usedanja v Imhoffovem liju (primer)

Graph 4.11: Particle fraction in influent: comparison of photogrammetric determination of concentration index and concentration measurements in samples by means of settling in the Imhoff cone (an example)

Ker je bilo pri izbiri nazivnih koncentracij vodilo enakost Froudovega densimetričnega števila, so morali biti pri enakih pretokih masni deleži steklenih delcev zaradi večje gostote za približno polovico manjši od svojih "parov" izmed poskusov z lešnikovo lupino (Preglednica 3.5). Zaradi večje gostote stekla je pri enaki masi manjši tudi skupen volumen delcev, kar prinaša še manjšo površino pravokotne projekcije delcev, ki jih snema kamera. Primerjava skupne prostornine delcev za dva poskusa z enakim Froudovim densimetričnim številom (enega z lešnikovo lupino in drugega s steklenimi delci) pokaže, da predstavlja prostornina steklenih delcev samo 30,2 odstotka prostornine mlete lešnikove lupine analognega poskusa. To je najpomembnejši dejavnik, zaradi katerega je bila na splošno vidljivost oz. razločnost hidrodinamičnih procesov pri poskusih s steklenimi mikrokroglicami slabša kot pri tistih z lešnikovo lupino. Še posebej pereče je to pri poskusih z nizkimi koncentracijami steklenih delcev (Slika 4.1: primera j in h)

4.3 Učinkovitost čiščenja

Fotogrametrično določen indikator koncentracije je zelo dober pokazatelj trendov vsebnosti trdnih delcev na vtoku in iztoku. Ker pa je zanesljiva kalibracija, ki bi omogočila pretvorbo vrednosti indikatorjev v vrednosti koncentracij, iz številnih razlogov (težave in pomisleki so bili predstavljeni že v poglavjih 2.5.1 in 3.2.2) praktično nemogoča, indikatorji koncentracije vtoka in iztoka niso bili uporabljeni za določitev učinkovitosti.

Primer vrednosti učinkovitosti čiščenja podaja Preglednica 4.3 za vse poskuse s steklenimi delci zrnavosti B. Grafično pa vrednosti učinkovitosti prikazujeta Grafikon 4.12 za poskuse s steklenimi delci zrnavosti A in s pretokom 10 l/min ter Grafikon 4.13 za poskuse s steklenimi delci zrnavosti B in s pretokom 6 l/min.

Preglednica 4.3: Učinkovitost usedalnika η [%] za primer steklenih mikrokroglic zrnavosti B

Table 4.3: Clarifier efficiency η [%] for tests with B granulation glass microspheres

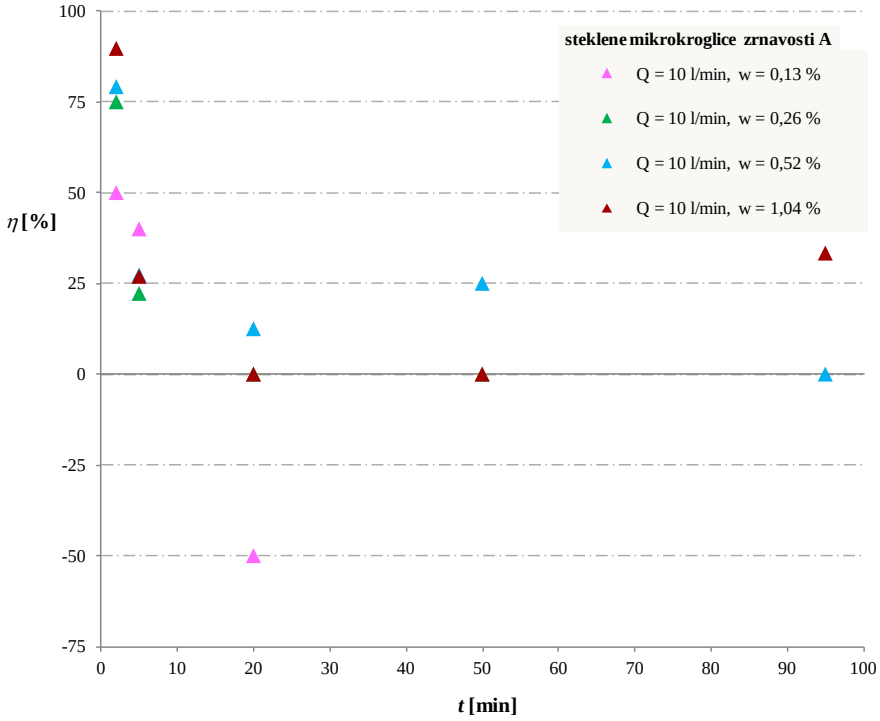
t	w = 0,13 %			w = 0,26 %			w = 0,52 %			w = 1,04 %		
[min]	4 l/min	6 l/min	10 l/min	4 l/min	6 l/min	10 l/min	4 l/min	6 l/min	10 l/min	4 l/min	6 l/min	10 l/min
2	> 79	> 79	50	> 90	> 89	64	> 96	> 95	82	> 98	> 97	88
5	> 70	60	25	> 85	61	42	> 94	50	36	96	73	30
10	> 40	50	33	> 74	43	13	71	36	13	82	47	4
20	> 10	0	> 10	> 55	25	20	42	13	0	61	28	36
50	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	> 10	0	33	0	0
95	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.

Kot je bilo že omenjeno v poglavju 4.2.1, je imelo kar precej vzorcev tako nizke koncentracije, da je bila prostornina usedline po 25 minutah usedanja v Imhoffovem liju manjša od najnižje oznake v liju, tj. manjša od 0,1 ml. V takih primerih izračun učinkovitosti ni bil mogoč.

Učinkovitost čiščenja je glede na rezultate odvzemov največja na začetku poskusov (Grafikon 4.12 in Grafikon 4.13). Vendar pa je časovno določitev učinkovitosti usedalnika treba jemati z določenim zadržkom. Ker je bila na začetku poskusa v usedalniku samo voda, koncentracija delcev na iztoku pa največja, bi bila teoretično gledano pri $t = 0$ učinkovitost čiščenja 100-odstotna, kar je zavajajoče. Tudi pri prvem odvzemu vzorcev ima čista voda v usedalniku še vedno velik (pozitiven) vpliv na kakovost suspenzije na iztoku. Kasneje, ko se velik delež delcev usede na dno usedalnika, se manjšata koncentraciji trdnih delcev na vtoku in iztoku.

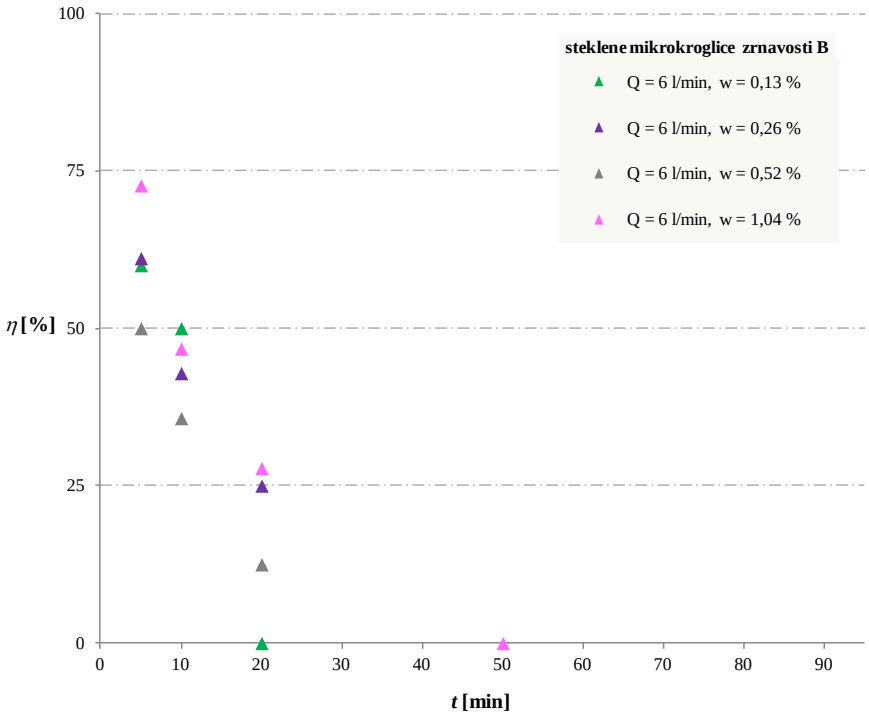
Zaradi enkratne obremenitve sistema s trdnimi delci koncentracija na vtoku ves čas pada, posledično se manjša tudi razlika v gostoti med svežo suspenzijo in medijem v usedalni komori. Sprememba se odraža tudi v Froudovem densimetričnem številu. Zveza med učinkovitostjo in teoretičnim Froudovim densimetričnim številu bo obravnavana v nadaljevanju, v poglavju 4.5.2.

Za vseh šestdeset poskusov so rezultati vzorčenja in obdelava merjenih veličin (vključno z določitvijo učinkovitosti) podani v preglednicah v prilogah (Priloga H). Grafični prikazi izračunanih učinkovitosti ob različnih časih pa so razen dveh primerov (Grafikon 4.12 in Grafikon 4.13) zaradi majhne sporočilne vrednosti izpuščeni.



Grafikon 4.12: Učinkovitost usedalnika za primere s steklenimi delci zrnavosti A s pretokom 10 l/min

Graph 4.12: Clarifier efficiency for experiments with A granulation glass particles with flow rate of 10 l/min

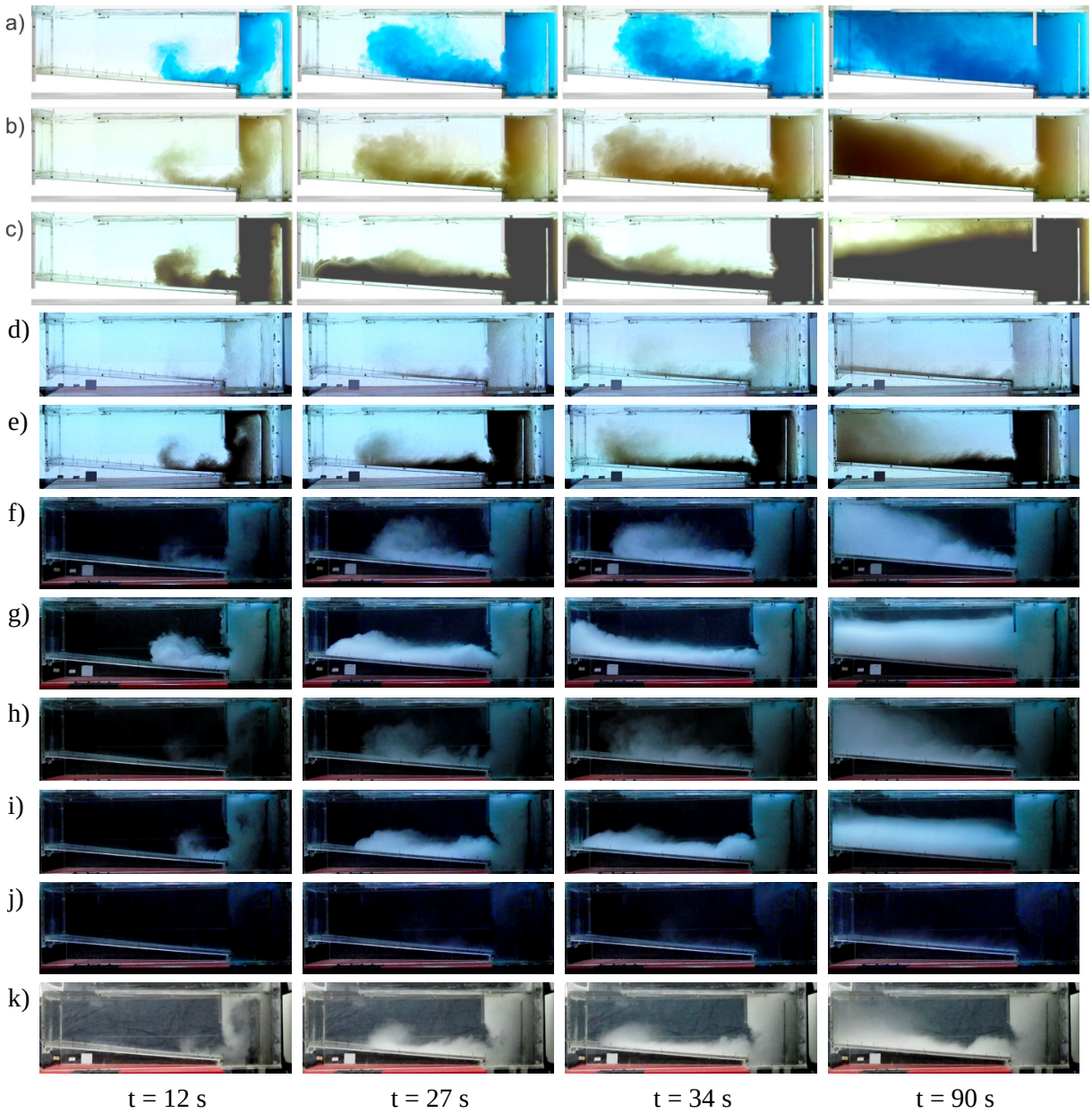


Grafikon 4.13: Učinkovitost usedalnika za primere s steklenimi delci zrnavosti B s pretokom 6 l/min

Graph 4.13: Clarifier efficiency for experiments with B granulation glass particles with flow rate of 6 l/min

4.4 Tokovna slika v usedalniku

Že na pogled se je dalo iz posnetkov oceniti, kako obratovalni parametri (koncentracija trdnih delcev v sveži suspenziji, pretok) in lastnosti delcev (gostota in velikost) vplivajo na tokovno strukturo, ki se vzpostavi v usedalniku (Slika 4.1 in Slika 4.2).



Slika 4.1: Sekvence zaporednih sličic toka suspenzije za poskuse s pretokom 6 l/min; a) barvilo; b) fino mleta lešnikova lupina: w = 0,25 %; c) fino mleta lešnikova lupina: w = 2,0 %; d) grobo mleta lešnikova lupina: w = 0,25 % nazivna utežna koncentracija; e) grobo mleta lešnikova lupina: w = 2,0 %; f) stekleni delci zrnavosti A: w = 0,13 %; g) stekleni delci zrnavosti A: w = 1,04 %; h) stekleni delci zrnavosti B: w = 0,13 %; i) stekleni delci zrnavosti B: w = 1,04 %; j) stekleni delci zrnavosti C: w = 0,13 %; k) stekleni delci zrnavosti C: w = 1,04 %

Figure 4.1: Sequence of consequent images of suspension flow for the experiment with a flow rate of 6 l/min; a) dye; b) fine ground hazelnut shell: w = 0.25 %; c) fine ground hazelnut shell: w = 2.0%; d) coarse ground hazelnut shell: w = 0.25 %; e) coarse ground hazelnut shell: w = 2.0%; f) A granulation glass particles: w = 0,13 %; g) A granulation glass particles: w = 1,04 %; h) B granulation glass particles: w = 0,13 %; i) B granulation glass particles: w = 1,04 %; j) C granulation glass particles: w = 0,13 %; k) C granulation glass particles: w = 1,04 %

Slika 4.1 prikazuje sekvence posnetka (v enakih časovnih zamikih od začetka poskusa) za poskuse z barvilom in z vsemi petimi modelnimi delci. Zajeti so vsi eksperimenti, pri katerih je bil pretok 6 l/min ter pri katerih je bila nazivna koncentracija najmanjša oziroma največja. Takšen izbor sličic omogoča primerjavo gostotnih tokov v usedalniku ter oceno vpliva relativne razlike v gostoti na hidrodinamične razmere.

Zaradi vertikalne pregrade, ki tok za vtokom usmerja proti dnu, se niti pri gostotno nevtralnih razmerah (vnos barvila: Slika 4.1 a) ne vzpostavijo vzporedne horizontalne tokovnice. Pri vseh poskusih se na čelu toka sveže suspenzije, ki potuje proti zunanjemu robu usedalnika, izoblikuje čelni vrtinec, ki kaže na prve zametke povratnega toka. Pri barvilu se dotekajoča mešanica hitreje širi v smeri, prečni na tok, tako da doseže zgornji sloj usedalnika, še preden pride do zunanje stene oziroma do iztočnega preliva (Slika 4.1 a, t = 34 s).

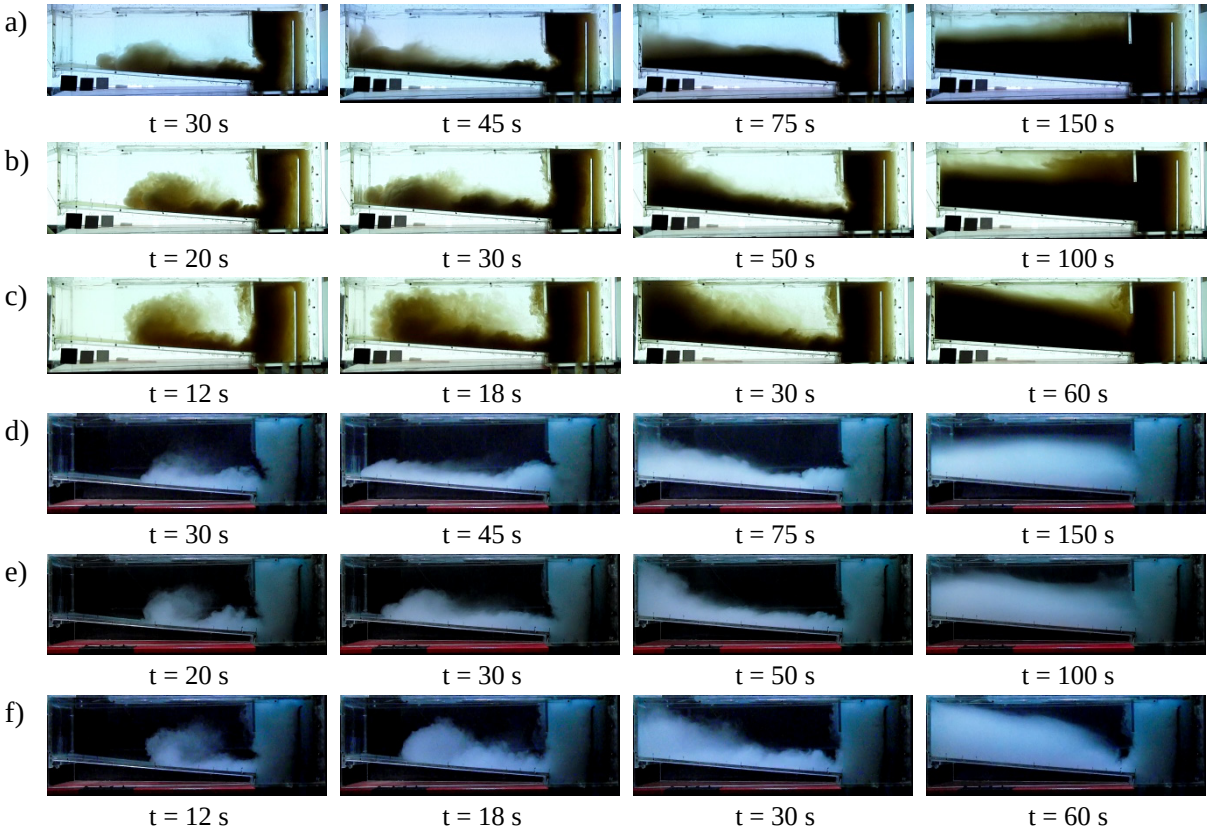
Kvalitativna primerjava toka v gostotno nevtralnih razmerah, pri najnižjih (0,25 % za mleto lešnikovo lupino in 0,13 % za steklene delce) in najvišjih koncentracijah (2,0 % za lešnikovo lupino in 1,04 % za steklene delce) pokaže izreden vpliv relativne razlike v gostoti med svežo suspenzijo in medijem v usedalniku. Višje nazivne koncentracije (in s tem višje relativne razlike v gostoti) se odražajo v izrazitejšem gostotnem toku in nižjem čelnem vrtincu, kar podaljša čas, ki ga sveža suspenzija potrebuje za pot od vtoka do iztočnega preliva. Drugačne zveze med koncentracijo in značilnostmi tokovne slike je opaziti edino pri modelnih delcih z največjimi hitrostmi usedanja, tj. pri grobo mleti lešnikovi lupini (Slika 4.1 d, e) in steklenih zrncih granulacije C (Slika 4.1 j, k).

Zelo zgovorne so slike posnetka po 90 sekundah od začetka poskusa (Slika 4.1, zadnji stolpec). Pri fino mleti lešnikovi lupini in pri steklenih delcih zrnavosti A in B se v tem času pri nizkih koncentracijah (Slika 4.1 b, f, h) oblikuje območje s suspendiranimi delci v delu, ki ga oklepajo dno usedalnika in diagonalna ravnina med vtokom in zgornjim robom usedalnika v bližini iztočnega preliva; v območju pod krovno steno in levo od usmerjevalne pregrade pa je voda še vedno praktično čista. Pri visokih koncentracijah pa je pri enakem pretoku in pri enakih modelnih delcih (fino mleta lešnikova lupina in stekleni delci zrnavosti A in B; Slika 4.1 c, g, i) ravno območje v bližini usedalnika še skorajda neobremenjeno s trdnimi delci. Ploskev, ki pri teh treh primerih deli zgornji sloj nizke koncentracije od spodnjega sloja višje koncentracije, ni povsem horizontalna, niti ravna – njena lega in oblika pa sta odvisni tudi od modelnih delcev. Kljub omenjenim razlikam je vsem trem modelnim delcem z nižjimi hitrostmi diskretnega usedanja (tj. izvzeti so grobo mleta lešnikova lupina in steklene kroglice zrnavosti C) skupno to, da po 90 sekundah od začetka poskusa višje koncentracije pogojujejo takšno razporeditev trdnih delcev, ki je za učinkovitost usedalnika bistveno ugodnejša od tiste, ki jo prinesejo nižje koncentracije. Pri visokih koncentracijah so namreč učinki gostotnega toka bolj izraženi in je tok sveže suspenzije pretežno omejen na globlje sloje usedalnika.

Tudi hitrost toka ob dnu je odvisna od fizikalnih lastnosti modelnih delcev. Težji delci (večjega premera, višje gostote) nudijo večji upor hidrodinamičnim silam, zato sveža suspenzija doseže zunanjo steno usedalnika kasneje kot pri lažjih delcih (Slika 4.1).

Če je Slika 4.1 bogat vir primerjav vplivov modelnih delcev in relativne razlike v gostoti, je Slika 4.2 izvrstna podlaga za prepoznavo vpliva hidravličnih obremenitev na tokovno polje v usedalniku. Prikazuje namreč skupino sekvenc, pri katerih je bil čas od začetka poskusa izbran tako, da je v navpičnem nizu sličic enotna prostornina sveže suspenzije (zmnožek časa in prostorninskega pretoka), ki je vstopila v model usedalnika. Prikazane so slike posnetka eksperimentov s fino mleto lešnikovo lupino z nazivno koncentracijo 1,0 % ter eksperimentov s steklenimi delci zrnavosti B z nazivno

koncentracijo 0,52 %. Za ene in druge modelne delce Slika 4.2 prikaže po štiri zaporedne slike, ki pripadajo vsem trem obravnavanim eksperimentalnim pretokom: 4, 6 in 10 l/min.



Slika 4.2: Sekvence zaporednih sličic toka suspenzije za poskuse s fino mleto lešnikovo lupino z nazivno koncentracijo w = 1,0 % (nizi a), b) in c)) ter za poskuse s steklenimi delci zrnavosti B z nazivno koncentracijo w = 0,52 % (nizi d), e) in f)); a) pretok Q = 4 l/min; b) pretok Q = 6 l/min; c) pretok Q = 10 l/min; d) pretok Q = 4 l/min; e) pretok Q = 6 l/min; f) pretok Q = 10 l/min

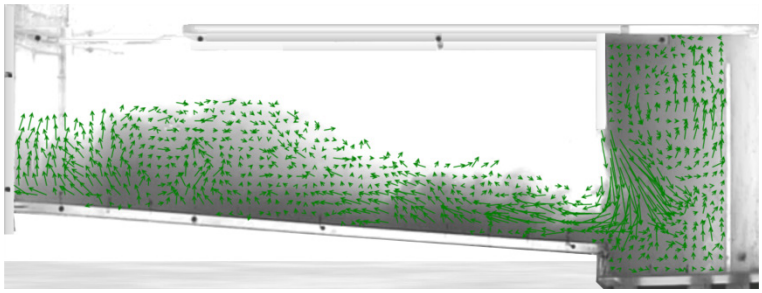
Figure 4.2: Sequence of consequent images of suspension flow for the experiment with fine ground hazelnut shell with nominal concentration of w = 1.0 % (sets a), b) and c)) and for the experiments with B granulation glass particles of w = 0.52 % (sets d), e) and f)); a) flow rate Q = 4 l/min; b) flow rate Q = 6 l/min; c) flow rate Q = 10 l/min; d) flow rate Q = 4 l/min; e) flow rate Q = 6 l/min; f) flow rate Q = 10 l/min

Pri pretoku 10 l/min glavni vrtinec, ki se oblikuje na čelu toka ob dnu, že v sredinskem prečnem prerezu zavzema več kot dve tretjini višine usedalnika (Slika 4.2 c, f). Pri enakem volumskem prirastu sveže suspenzije je pri nižjih pretokih tok po dnu bolj izrazit (Slika 4.2, drugi stolpec) in razporeditev suspendiranih delcev mnogo ugodnejša kot pri višjih pretokih (Slika 4.2, zadnji stolpec). Ne glede na to, da je nazivna koncentracija pri prikazanih eksperimentih relativno visoka, so pri največji hidravlični obremenitvi (10 l/min; Slika 4.2 c, f) tokovne razmere v usedalniku dokaj podobne tistim, ki nastopijo pri gostotno nevtralnih pogojih (Slika 4.1 a).

4.4.1 Določitev vzorca tokovnega polja z računalniško podprto metodo

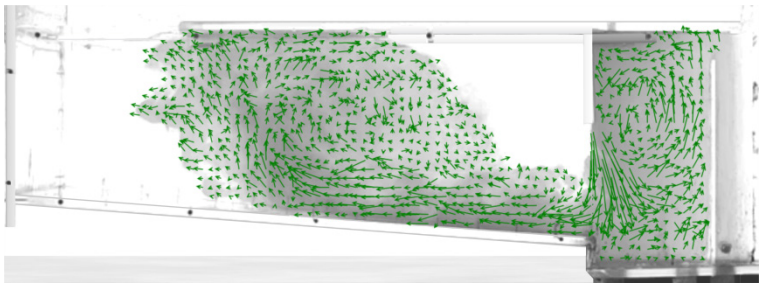
Poleg enostavnega opazovanja fenomena na modelu usedalnika so bile hidrodinamične razmere v usedalniku določene tudi z računalniško podprto metodo vizualizacije toka. S tem pristopom je bilo določeno dvodimenzionalno vektorsko polje hitrosti delcev v vertikalni ravnini (npr. Slika 4.3 in Slika 4.4).

Rezultati računalniško podprte metode so potrdili vplive hidravlične obremenitve, relativne razlike v gostoti med dotekajočo svežo suspenzijo in gostoto medija v usedalni komori ter fizikalnih lastnosti delcev na tokovne strukture, ki se izoblikujejo v usedalniku.



Slika 4.3: Tokovno polje v usedalniku; pretok 4 l/min, fino mleta lešnikova lupina: nazivna utežna koncentracija 0,25%; začetno stanje

Figure 4.3: Velocity field inside settling tank; flow rate of 4 l/min, fine ground hazelnut shell: nominal mass concentration 0.25 %; initial stage



Slika 4.4: Tokovno polje v usedalniku; pretok 4 l/min, svežo suspenzijo predstavljata voda in barvilo ; začetno stanje

Figure 4.4: Velocity field inside settling tank; flow rate of 4 l/min, fresh suspension consists of water and dye; initial stage

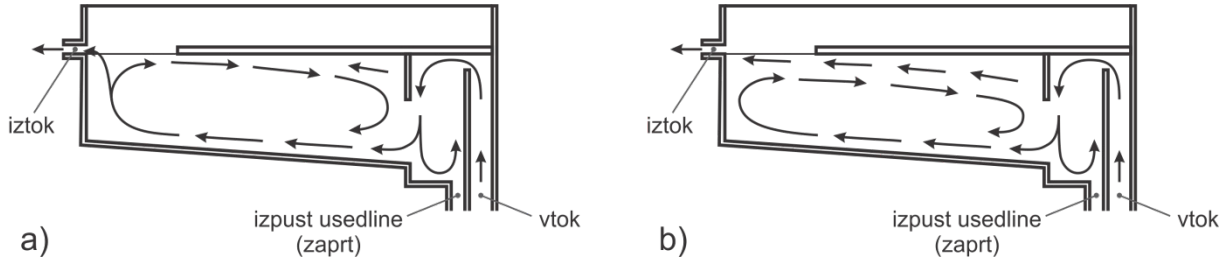
Višja relativna razlika v gostoti se je odrazila v izrazitejših vplivih gostotnih tokov, tj. v poudarjenem toku po dnu (Slika 4.3) in razločnem povratnem toku.

Tipične tokovne strukture

Že iz obravnave in primerjave primerov sekvenc različnih poskusov, ki ju prikazujeta Slika 4.1 in Slika 4.2 (v uvodnem besedilu poglavja 4.4), je razvidno, da so lahko hidrodinamične razmere in razporeditve trdnih delcev v usedalni komori zelo raznovrstne. Vseeno pa se je na podlagi rezultatov računalniško podprte metode vizualizacije toka poskuse lahko razvrstilo v dve glavni skupini, glede na tokovno polje, ki se je vzpostavilo v modelu usedalnika.

Slika 4.5 prikazuje shemo dveh tokovnih vzorcev, ki sta bila prepoznana pri poskusih na modelu usedalnika. Na shemah so z vektorji prikazani le glavni tokovi, medtem ko so manjši tokovi (npr. prehodi med sloji) zaradi večje preglednosti izpuščeni.

- Kot prvi vzorec je bila prepoznana tipična dvoslojna tokovna struktura gostotnega toka v usedalniku s tokom po dnu in povratnim tokom, ki teče proti vtočnemu jašku (Slika 4.5 a). Gre za učinek kratkega krogotoka, saj v takšnih hidrodinamičnih razmerah sveža suspenzija naredi relativno kratko pot od vtoka proti iztoku, kar neugodno vpliva na učinkovitost čiščenja.
- Kot drugi vzorec pa je bila prepoznana polno razvita troslojna struktura, pri kateri se poleg toka ob dnu in povratnega toka v zgornjem sloju usedalnika izoblikuje nekoliko šibkejši tok, usmerjen proti iztoku (Slika 4.5 b). Ker je pri vrhu koncentracija trdnih delcev nižja kot v globljih slojih, tretji tok, ki doseže iztočni preliv in tako delno tvori iztočno suspenzijo, prispeva k večji učinkovitosti usedalnika.



Slika 4.5: Shematski prikaz vzorcev troslojnega tokovnega polja a) kratki krogotok; b) polno razvit troslojni tok
Figure 4.5: Schematic view of three–layer flow patterns a) short circuiting; b) fully developed three–layer flow

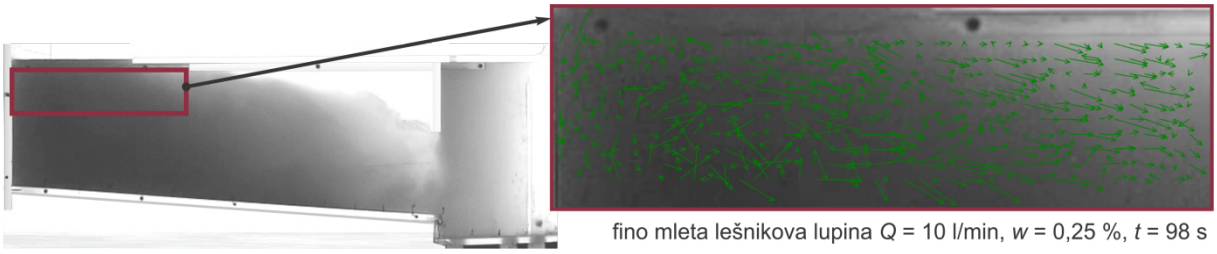
V zgornjem, tretjem sloju se je pravzaprav vedno izoblikoval tok, usmerjen proti iztoku, ki pa ni vedno dosegel iztočnega preliva, ker ga je pri primeru a) prej zadušil močnejši povratni tok, ki teče v smeri proti vtočnemu jašku. V tem primeru je vseeno prišlo do učinka kratkega krogotoka in takšen tokovni vzorec ni bil razvrščen med poskuse, pri katerih se vzpostavi polno razvita troslojna tokovna struktura.

Ker je bila pri izvedbah eksperimentov trdna snov v sistem rezervoarja in usedalnika dodana le na začetku, se je tekom poskusa vsebnost trdnih delcev na vtoku ves čas spreminjala. Po določenem času se je tako relativna razlika v gostoti med svežo suspenzijo in medijem v usedalniku začela manjšati in posledično so bili učinki gostotnih tokov v usedalniku vedno manj izraziti. Tudi v usedalnikih s kontinuirnim delovanjem so razmere nestacionarne, vendar pa koncentracija sveže suspenzije običajno ne pada na tak način, kot je pri izvedeni eksperimentalni študiji. Zato so bili vsi poskusi, pri katerih se je vsaj za določen čas izoblikoval polno razvit tok v zgornjem sloju usedalnika, razvrščeni med eksperimente s troslojno tokovno strukturo.

Smer toka v zgornjem sloju usedalnika

Kot že omenjeno, se je pri večini poskusov v zgornjem sloju levo od pregrade oblikoval blag tok proti zunanji obodni steni usedalnika. Za razvrstitev poskusa v skupino tistih, pri katerih je prišlo do učinka kratkega krogotoka (Slika 4.5 a), in tistih, pri katerih se je vsaj za določen čas izoblikoval polno razvit troslojni tok (Slika 4.5 b), je ključna določitev vektorskega polja hitrosti v vrhnjem sloju usedalnika v neposredni bližini iztočnega preliva. Tipične primere polja hitrosti, ki se vzpostavijo v tem območju, prikazujejo Slika 4.6, Slika 4.7 in Slika 4.8.

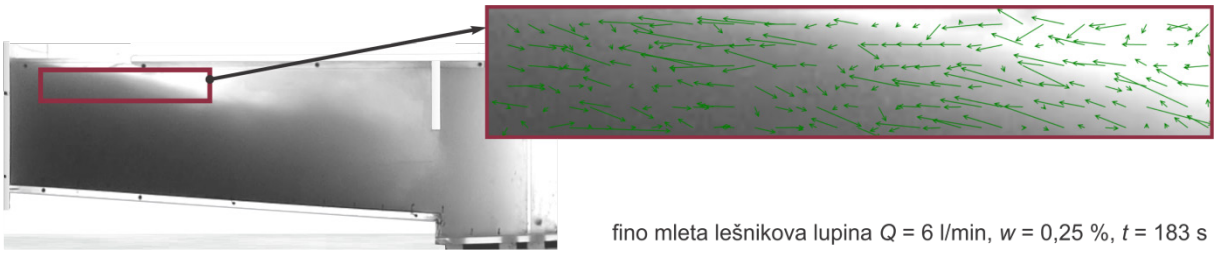
Slika 4.6 prikazuje primer, pri katerem je prišlo do učinka kratkega krogotoka in povratni tok sega vse do zgornjega roba usedalnika. Tik pod gladino in pod pokrovom usedalnika so tako vektorji hitrosti delcev usmerjeni proti vtočnemu jašku.



Slika 4.6: Hitrostno polje v zgornjem delu modela usedalnika: dvoslojni vzorec tokovnega polja

Figure 4.6: Velocity vector field in the model settling tank in vicinity of the effluent weir: two-layer flow pattern

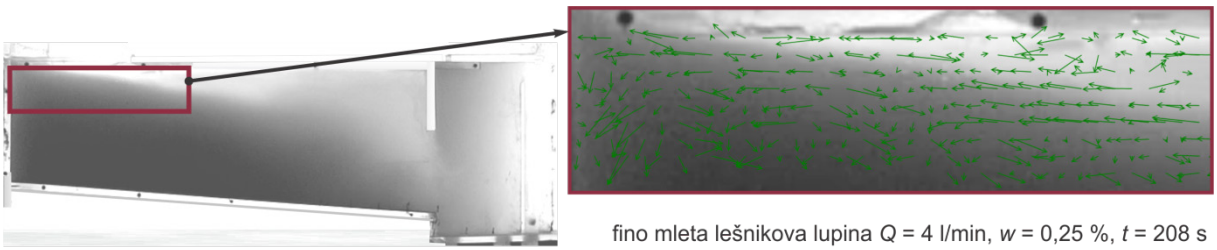
Vmesno situacijo, pri kateri kljub oblikovanju razločne troslojne tokovne strukture pride do učinka kratkega krogotoka, prikazuje Slika 4.7. V zgornjem sloju se oblikuje tok proti zunanji steni usedalnika, ki pa ne doseže iztoka. Hitrostno polje v zgornjem sloju desno od iztočnega preliva tako predstavljajo na eni strani vektorji, ki so usmerjeni proti vtočnemu jašku (povratni tok), na drugi strani pa vektorji, ki so usmerjeni proti prelivu (tok v najvišjem, tretjem sloju).



Slika 4.7: Hitrostno polje v zgornjem delu modela usedalnika: troslojni vzorec tokovnega polja z učinkom kratkega krogotoka; prepoznati je tok v dveh vodoravnih smereh

Figure 4.7: Velocity vector field at the top of the model settling tank: three-layer flow pattern with short circuiting; currents in two horizontal directions can be observed

Slika 4.8 prikazuje polno razvit troslojni vzorec tokovnega polja. Tok v zgornjem sloju doseže iztočni preliv in posledično vpliva na vsebnost trdnih delcev v vodi na iztoku. Vidi se, da vektorji hitrosti delcev obdržijo usmerjenost proti iztoku vse do zunanjega obodnega roba usedalnika.



Slika 4.8: Hitrostno polje v zgornjem delu modela usedalnika: polno razvit troslojni vzorec tokovnega polja

Figure 4.8: Velocity vector field at the top of the model settling tank: fully developed three-layer flow pattern

4.5 Pomen Froudovega densimetričnega števila

Številni raziskovalci so potrdili, da ima Froudovo densimetrično število pomemben vpliv na delovanje usedalnika (Krebs et al., 1998, Ueberl in Hager, 1997) in da nižja Froudova densimetrična števila pogojujejo izrazitejše učinke gostotnih tokov v usedalni komori (Jamshidnia et al., 2010). Krebs et al. (1998) so na modelu pravokotnega usedalnika ugotovili, da je Froudovo densimetrično število tudi tisti odločilni parameter, ki določa, ali se bo v usedalniku vzpostavila dvoslojna ali troslojna tokovna struktura. Zato sta bili za vseh šestdeset poskusov obravnavane eksperimentalne študije analizirani zveza med Froudovim densimetričnim številom in tokovnim poljem ter zveza med Froudovim densimetričnim številom in učinkovitostjo usedalnika.

4.5.1 Froudovo densimetrično število glede na vrsto tokovne slike

Na podlagi kriterija, ali se je v usedalniku v zgornjem (tretjem) sloju izoblikoval tok vse do iztočnega preliva, so bili vsi poskusi razvrščeni v dve glavni skupini: v skupino s polno razvitim troslojnim tokom ter v skupino s kratkim krogotokom.

Preglednica 4.4 podaja vse poskuse, pripadajoče vrednosti Froudovega densimetričnega števila na vtoku in na sredini usedalnika ter tokovno sliko, ki se je oblikovala pri posameznem poskusu. V okviru vsake uporabljene suspendirane snovi so poskusi razvrščeni padajoče glede na začetno vrednost teoretičnega Froudovega densimetričnega števila. Pri tem velja poudariti, da so vrednosti Froudovega densimetričnega števila na vtoku ($Fr_{d.0}$) in iztoku ($Fr_{d.m}$) linearno odvisne, zato je vseeno, kateri je upoštevan pri razvrstitvi od največje proti najmanjši vrednosti.

Pri največjih delcih iz vsake skupine suspendirane snovi, tj. pri poskusih z grobo mleto lešnikovo lupino in steklenimi delci zrnavosti C, se polno razviti tok ni oblikoval v nobenem primeru. Pri poskusih s fino mleto lešnikovo lupino in s steklenimi delci zrnavosti A in B pa se je v nekaterih primerih vzpostavila tokovna struktura z učinkom kratkega krogotoka, v drugih primerih pa polno razviti troslojni tok. Pri omenjenih modelnih delcih je iz rezultatov (Preglednica 4.4) razvidna tudi jasna ločnica – mejna vrednost Froudovega densimetričnega števila, ki ločuje poskuse, pri katerih pride do učinka kratkega krogotoka, in poskuse, pri katerih se oblikuje troslojna tokovna struktura.

Očitno je, da pri dani geometriji usedalnika obstajajo drugačne zakonitosti delovanja usedalnika za večje in težje delce kot za manjše in lažje. Samo gostota oziroma samo velikost delca nista odločilna; statični parameter, ki prevesi fenomen usedanja, je hitrost diskretnega usedanja modelnih delcev. Vrednosti slednjih pa za vseh pet obravnavnih suspendiranih snovi za karakteristična zrna (premerov d_{10}, d_m in d_{90}) podaja Preglednica 4.1. Za fino mleto lešnikovo lupino ta vrednost znaša 55 mm/min, medtem ko je pri steklenih delcih zrnavosti C pa 109 mm/min in pri grobo mleti lešnikovi lupini 1100 mm/min. Hitrosti diskretnega usedanja, pri kateri se v naknadnem usedalniku zgodi prehod iz ene v drugo zakonitost usedanja, samo iz obravnavanih primerov točno ni mogoče določiti; pri dani geometriji usedalnika je iz rezultatov razvidno, da se njena vrednost nahaja nekje med 55 in 110 mm/min.

Pri vseh treh modelnih delcih nižjih hitrosti diskretnega usedanja (pri fino mleti lešnikovi lupini in steklenih zrncih A in B) je mejna vrednost Froudovega densimetričnega števila enaka in torej neodvisna od hitrosti diskretnega usedanja (Preglednica 4.4). Do prehoda pride pri vrednostih Froudovega densimetričnega števila na vtoku ($Fr_{d.0}$) okrog 0,5 in na sredini ($Fr_{d.m}$) okrog 0,05.

Preglednica 4.4: Razvrstitev poskusov glede na vrsto tokovne slike (v okviru uporabljene suspendirani snovi so poskusi iz niza razvrščeni glede na začetno vrednost teoretičnega Froudovega densimetričnega števila – padajoče)

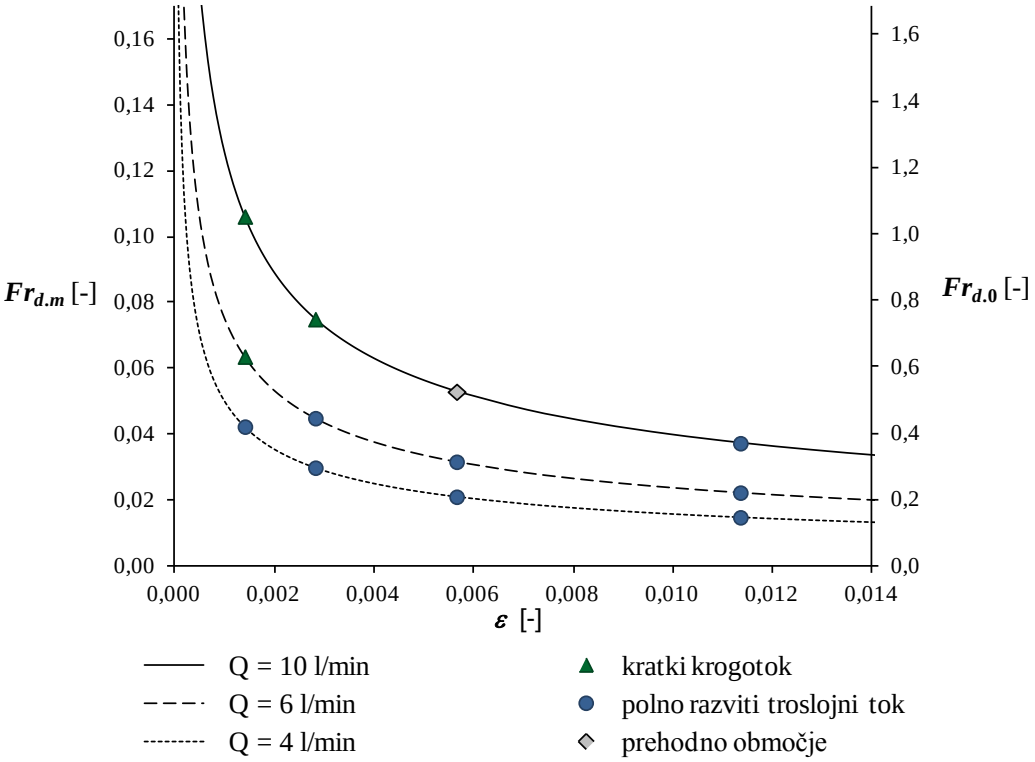
Table 4.4: Classification of test runs regarding to the flow pattern (within one settling matter used test runs are sorted in accordance with the initial value of the theoretical densimetric Froude number – descending)

Suspendirana snov	Q [l/min]	w [%]	$Fr_{d.0}$ [-]	$Fr_{d.m}$ [-]	Vzorec tokovne slike		
Mleta lešnikova lupina, gostota: 1450 kg/m^3					Fini delci $d_m \approx 65$ µm	Grobi delci $d_m \approx 355$ µm	
	10	0,25	1,054	0,106	kratki krogotok	kratki krogotok	
	10	0,5	0,745	0,075	kratki krogotok	kratki krogotok	
	6	0,25	0,633	0,064	kratki krogotok	kratki krogotok	
	10	1,0	0,526	0,053	prehodno obm.	kratki krogotok	
	6	0,5	0,447	0,045	troslojni tok	kratki krogotok	
	4	0,25	0,422	0,043	troslojni tok	kratki krogotok	
	10	2,0	0,372	0,037	troslojni tok	kratki krogotok	
	6	1,0	0,316	0,032	troslojni tok	kratki krogotok	
	4	0,5	0,298	0,030	troslojni tok	kratki krogotok	
	6	2,0	0,223	0,022	troslojni tok	kratki krogotok	
	4	1,0	0,211	0,021	troslojni tok	kratki krogotok	
	4	2,0	0,149	0,015	troslojni tok	kratki krogotok	
Stekleni delci, gostota: 2500 kg/m^3					Zrnavost A $d_m \approx 14$ µm	Zrnavost B $d_m \approx 35$ µm	Zrnavost C $d_m \approx 50$ µm
	10	0,13	1,054	0,106	kratki krogotok	kratki krogotok	kratki krogotok
	10	0,26	0,745	0,075	kratki krogotok	kratki krogotok	kratki krogotok
	6	0,13	0,633	0,064	kratki krogotok	kratki krogotok	kratki krogotok
	10	0,52	0,526	0,053	prehodno obm.	prehodno obm.	kratki krogotok
	6	0,26	0,447	0,045	troslojni tok	troslojni tok	kratki krogotok
	4	0,13	0,422	0,043	troslojni tok	troslojni tok	kratki krogotok
	10	1,04	0,372	0,037	troslojni tok	troslojni tok	nihanje*
	6	0,52	0,316	0,032	troslojni tok	troslojni tok	kratki krogotok
	4	0,26	0,298	0,030	troslojni tok	troslojni tok	kratki krogotok
	6	1,04	0,223	0,022	troslojni tok	troslojni tok	nihanje*
	4	0,52	0,211	0,021	troslojni tok	troslojni tok	kratki krogotok
	4	1,04	0,149	0,015	troslojni tok	troslojni tok	kratki krogotok

Delci nižjih hitrosti diskretnega usedanja

Grafikon 4.14 prikazuje začetne vrednosti Froudovih densimetričnih števil kot funkcije relativne razlike v gostoti ε. Krivulje za eksperimentalne pretoke so bile določene računsko, po enačbi (2.55). Razvrstitev točk poskusov med tiste, pri katerih se je vzpostavil kratki krogotok, in tiste, pri katerih se je oblikoval troslojni tok, je bila narejena na podlagi kvantitativne in kvalitativne analize poskusov.

Krivulje teoretičnega densimetričnega števila (Grafikon 4.14) sicer veljajo za vse modelne delce, vendar pa pri delcih velikih hitrosti diskretnega usedanja razvrstitev v dve glavni skupini glede na tokovno polje v usedalniku ni možna.



Grafikon 4.14: Froudovo densimetrično število na začetku poskusa (nobena od prikazanih vrednosti ni empirično določena; izračunane so bile po enačbi (2.55); razvrstitev glede na tokovno strukturo velja samo za fino mleto lešnikovo lupino in steklene delce zrnavosti A in B)

Graph 4.14: Densimetric Froude number at the beginning of the experiment (the demonstrated values were not evaluated empirically; they have been calculated according to the equation (2.55); classification regarding the flow structure applies only to fine ground hazelnut shell and glass particles of A and B granulation)

Razvrstitev poskusov glede na tokovno polje, ki se je oblikovalo v usedalniku, pri delcih nižjih hitrosti usedanja potrjujejo izreden pomen Froudovega densimetričnega števila na delovanje usedalnika. Pri vseh teh delcih pride do prehoda iz ene v drugo skupino tokovnih razmer v usedalniku pri isti vrednosti Froudovega densimetričnega števila. To pa ne pomeni, da fizikalne lastnosti delcev v območju delcev nižjih hitrosti usedanja nimajo vpliva na razmere v usedalniku.

Primerjava sličic posnetkov poskusov za različne modelne delce pri pretoku 6 l/min (Slika 4.1) jasno pokaže, da tudi znotraj te skupine (fino mleta lešnikova lupina, steklene mikrokroglice zrnavosti A in B) pri enakih vrednostih Froudovega densimetričnega števila obstajajo razlike med razporeditvami delcev (polji koncentracij) v usedalni komori. Teoretično Froudovo densimetrično število zadošča za grobo napoved tokovne slike (razvrstitev v dva glavna tipa), na fenomen usedanja (polje koncentracij, polje hitrosti) pa vplivajo tudi lastnosti delcev oziroma hitrosti diskretnega usedanja delcev.

Delci višjih hitrosti diskretnega usedanja

Pri grobih delcih so eksperimenti pokazali, da je učinkovitost usedanja pri danih gabaritih usedalnika velika, kljub temu, da je v vseh dvanajstih primerih prišlo do učinka kratkega krogotoka. Zaradi

relativno velike hitrosti usedanja se je večina delcev izločila iz sveže suspenzije že v neposredni bližini vtočnega jaška (Slika 4.9; tudi Slika 4.10, a manj izrazito).

Slika 4.9: Stanje v usedalniku; pretok 4 l/min; grobo mleta lešnikova lupina; nazivna utežna koncentracija 2 %; začetno stanje.

Figure 4.9: Conditions in the settling tank; coarse ground hazelnut shell; nominal concentration of 2 %; initial stage

Slika 4.10: Stanje v usedalniku; pretok 4 l/min; steklene kroglice zrnavosti C; nazivna utežna koncentracija 2 %; stanje po šestih minutah.

Figure 4.10: Conditions in the settling tank; granulation C glass spheres; nominal concentration of 2 %; conditions after six minutes

Kadar so hitrosti usedanja tako velike, da se pri danih razsežnostih usedalnika veliko trdnih delcev usede že v neposredni bližini vtočnega jaška, se koncentracija delcev v sveži suspenziji na sredini usedalnika že močno zmanjša. Od vtoka do sredine usedalnika se tako izrazito zmanjša relativna razlika med dotekajočo svežo suspenzijo in okoliško gostoto. Posledično tako računsko določeno teoretično začetno Froudovo densimetrično število v sredinskem prerezu zato močno odstopa od dejanskega Froudovega densimetričnega števila. To pojasni, zakaj pri delcih visokih hitrostih usedanja Froudovo densimetrično število na videz nima vpliva na tokovno polje. Če bi se pri računu začetnega $Fr_{d.m}$ upoštevale dejanske koncentracije trdnih delcev v toku sveže suspenzije po dnu usedalnika, bi bile vrednosti Froudovega densimetričnega števila višje, poskus pa bi bil tudi po kriteriju $Fr_{d.m}$ razvrščen med tiste, pri katerih pride do tokovnega polja z učinkom kratke zanke.

Pri grobo mleti lešnikovi lupini pride poleg odstopanja v vrednosti računskega $Fr_{d.m}$ od dejanskega $Fr_{d.m}$ po določenem času tudi do znatne prostornine usedline (Slika 4.9), ki drastično spremeni geometrijske robne pogoje. Rezultate teh poskusov je zato težko obravnavati povsem enakovredno kot preostale poskuse, tj. tiste s fino mleto lešnikov lupino in tiste s steklenimi zrnci.

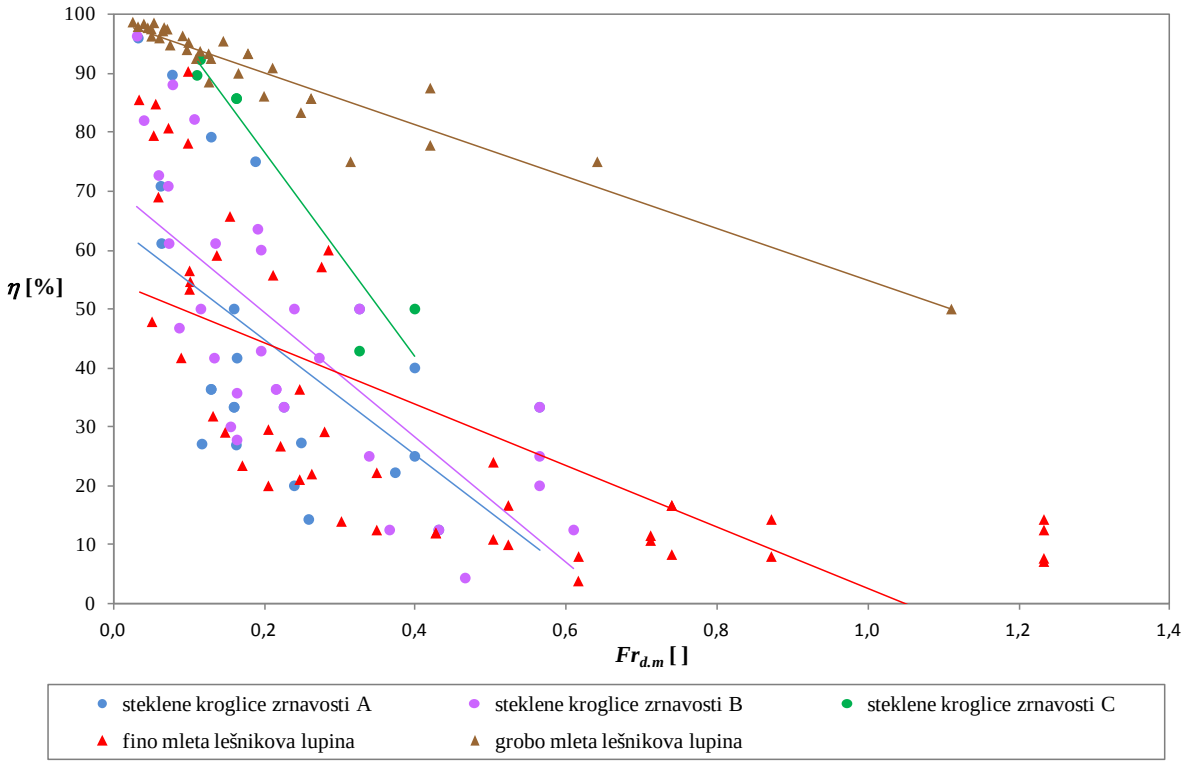
Pri obravnavi oziroma načrtovanju industrijskega usedalnika, ki ni del verige čiščenja tipične komunalne čistilne naprave, je zelo pomembno, da se predvidijo značilnosti trdnih delcev, ki bodo med običajnim obratovanjem prisotne v tehnološki odpadni vodi. Glede na pričakovane hitrosti usedanja je treba načrtovati dimenzije usedalnika tako, da bodo ob kriteriju sprejemljive vsebnosti trdnih delcev na iztoku investicijski in obratovalni stroški čim nižji.

Delci, katerih hitrosti usedanja so tako velike, da se jih velik del usede že v neposredni bližini vtočnega jaška (v obravnavani eksperimentalni študiji so se tako obnašale steklene mikrokroglice zrnavosti C in grobo mleta lešnikova lupina), na komunalni čistilni napravi najverjetneje niti ne bi prišli do naknadnega usedalnika, ker bi se izločili iz odpadne vode že na drugih objektih (npr. na peskolovu, v primarnem usedalniku) v predhodnih fazah čiščenja. V duhu splošnejše obravnave usedalnikov s kontinuirnim delovanjem podrobnejše preučevanje fenomena usedanja delcev visokih hitrosti usedanja tako niti nima smisla.

4.5.2 Zveza med Froudovim densimetričnim številom in učinkovitostjo

Iz rezultatov vzorčenja je bila določena učinkovitost usedalnika v različnih časovnih točkah. Precejšen delež parov vzorcev na vtoku in iztoku je pri določevanju učinkovitosti odpadel, ker je bil masni delež trdnih delcev v enem ali v obeh vzorcih premajhen, da bi se ga dalo z metodo usedanja v Imhoffovem liju določiti. V pripadajočih časovnih točkah je bilo določeno tudi Froudovo densimetrično število.

Grafikon 4.15 podaja zvezo med Froudovim densimetričnim številom in učinkovitostjo čiščenja. Čeprav je opaziti precejšen raztros točk, je pri vseh petih modelnih delcih z naraščanjem Froudovega densimetričnega števila opaziti jasen trend padanja učinkovitosti.



Grafikon 4.15: Zveza med Froudovim densimetričnim številom in učinkovitostjo usedalnika

Graph 4.15: Correlation between the densimetric Froude number and clarifier's efficiency

Iz analize zveze med učinkovitostjo usedalnika in vrednostmi Froudovega densimetričnega števila je razvidno, da ima Froudovo densimetrično število vpliv na učinkovitost čiščenja, ne glede na to, kateri modelni delci so bili uporabljeni v nizu poskusov. Po pričakovanjih je pri uporabi delcev visokih hitrosti diskretnega usedanja učinek čiščenja večji.

4.5.3 Primerjava rezultatov študije z ugotovitvami iz literature

Da bi se ocenil pomen Froudovega densimetričnega števila pri procesih usedanja v usedalnikih s kontinuirnim delovanjem, je bil narejen pregled literature, ki obravnava pomen Froudovega densimetričnega števila in delovanjem naknadnega usedalnika (Preglednica 4.5). Primerjava posameznih študij pokaže, da se rezultati ujemajo v omejenem obsegu.

Večina avtorjev (Zhou et al., 1992; van Marle in Krannenburg, 1994; Ueberl in Hager, 1997) se opira samo na Froudovo densimetrično število na vtoku. Van Marle in Krannenburg (1994) sta pri vseh poskusih enotnega Froudovega densimetričnega števila ($Fr_{d.0}$ =0,11) opazila troslojno tokovno strukturo, kar se ujema z rezultati pričujoče študije, saj tako nizke vrednosti pri delcih nižjih hitrosti usedanja $Fr_{d.0}$ ustrezajo polno razvitemu troslojnemu toku. Optimalne vrednosti Froudovega densimetričnega števila na vtoku opredelijo Zhou et al. (1992) ter Ueberl in Hager (1997). Zanimivo je, da oboji navajajo omejitev optimalnih vrednosti $Fr_{d.0}$ navzdol. V pričujoči raziskavi tovrstnih negativnih učinkov nizkih vrednosti $Fr_{d.0}$ ni bilo zaznati. Res pa je, da ena izmed omenjenih študij temelji na numeričnih izračunih (Zhou et al., 1992), druga pa na meritvah na prototipu (Ueberl in Hager, 1997). Zaradi zunanjih dejavnikov (veter, temperaturne razlike), ki na realnem usedalniku še dodatno vplivajo na procese v usedalniku, je verjetno potreba po stabilnih tokovnih razmerah toliko večja. Stabilnost toka zagotavljajo višje hitrosti toka, ki se odražajo v višjih Froudovih densimetričnih številih. Možno je, da do odstopanj pride zato, ker poskusi na fizičnem hidravličnem modelu pri nadzorovanih pogojih hidravličnega laboratorija niso obravnavali zunanjih dejavnikov in tako niso zaznali negativnih učinkov manj stabilnega tokovnega polja.

Primerjava ugotovitev, do katerih so za vrednost Froudovega densimetričnega števila v sredinskem prerezu prišli Krebs et al. (1998), pokaže boljše ujemanje rezultatov. Froudovo densimetrično število na vtoku $Fr_{d.m}$, ki razmejuje tiste razmere, ko se v usedalniku vzpostavi tokovna slika z učinkom kratkega krogotoka, in tiste razmere, ko se izoblikuje troslojna tokovna slika, je enaka za pravokoten usedalnik (Krebs et al., 1998) in za okrogel usedalnik (znaša 0,04). Dejstvo, da so Krebs et al. (1998) preučevali pravokotni usedalnik, pričujoča študija pa krožni usedalni, kaže na možnosti posplošitve te vrednosti na poljubno geometrijo.

Vseeno pa je pri posploševanju veljavnosti Froudovega števila težko presoditi, kje so upoštevani dejavniki geometrije. Povsem verjetno je, da se faktor oblike izgubi, ker se laboratorijske raziskave izvajajo na usedalnikih, ki so oblikovani po uveljavljenih smernicah, tako da je razmerje globine in dolžine usedalnika optimalno. Krebs et al. (1998) so sicer izdelali eksperimentalno analizo pri različnih geometrijah, vendar je bilo primerov premalo, da bi bila možna sistematična analiza. Da bi se potrdilo splošno veljavo mejne vrednosti $Fr_{d.m}$, oziroma njeno neodvisnost od geometrije usedalnika, bi bilo treba izvesti dodatne nize poskusov pri različnih geometrijah.

Ugotovitev glede vpliva velikosti delcev v suspenziji na delovanje usedalnika ni bilo mogoče primerjati z drugimi avtorji, saj tega do sedaj še nihče ni preučeval.

Preglednica 4.5: Pregled študij, ki so pri obravnavi tokovne slike v usedalniku upoštevale pomen vrednosti teoretičnega Froudovega densimetričnega števila

Table 4.5: Review of studies that took in consideration the value of the theoretical densimetric Froude number when investigating the efficiency or flow pattern in settling tank

Raziskava	Zhou et al. (1992)	Van Marle in Krannenburg (1994)	Ueberl in Hager (1997)	Krebs et al. (1998)	pričujoča raziskava
Oblika usedalnika	krožni	krožni	pravokotni	pravokotni	krožni
Vrsta modela	numerični, verificiran s fizičnim (krožni izsek, 20°)	fizični (krožni izsek, 60°)	eksperimentalna študija na prototipu	fizični	fizični (krožni izsek, 16,5°)
Geometrijsko merilo	pomanjšan, a premalo podatkov o merilu	1 : 8	1 : 1 (prototip)	pomanjšan, a premalo podatkov o merilu	1 : 1
Največja dolžina (na modelu)	1,52 m	2,95 m	50 m	2,0 m	0,89 m
Suspendirana snov	barvilo, temperatura dotekajoče suspenzije nižja od okoliške	kaolinit	biološka usedlina	steklene mikrokroglice	mleta lešnikova lupina; steklene mikrokroglice
Gostota suspendirane snovi	ni primerljivo	2600 kg/m^3	ni podatka (relativna razlika v gostoti ε je med 0,002 in 0,004)	2500 kg/m^3	1450 kg/m^3; 2500 kg/m^3
Velikost delcev	brez delcev	ni podatka	ni podatka	$d_{10} \approx 15$ μm; $d_{90} \approx 65$ μm	glej str. 55, Preglednica 3.1
Kosmičenje	ne	da	da	ne	da (lešnikova l.); ne (stekleni delci)
Spremenljivi parametri	pretok	konstrukcijski detajli	geometrija, koncentracija suspenzije, pretok	geometrija, koncentracija suspenzije, pretok	koncentracija suspenzije, pretok, delci
Ugotovitve glede vpliva $Fr_{d.0}$	optimalno delovanje med 0,38 in 0,58	konstantna vrednost (0,11) pri vseh poskusih	priporočene so vrednosti med 0,5 in 2, ker ustvarjajo stabilen tok		0,53 delno, 0,45 polno razvit troslojni vzorec tokovne slike *
Ugotovitve glede vpliva $Fr_{d.m}$				0,08 delno, 0,04 polno razvit troslojni vzorec tokovne slike	0,05 delno, 0,04 polno razvit troslojni vzorec tokovne slike *

* velja samo za delce nižjih hitrosti diskretnega usedanja; pri delcih višjih hitrosti diskretnega usedanja je tokovna slika neodvisna od vrednosti računskega Froudovega densimetričnega števila

5 ZAKLJUČEK

Osnove za načrtovanje usedalnikov so dolgo temeljile na predpostavki idealnega usedalnika, v katerem so vse tokovnice vodoravne in vlada laminarni režim toka. Predvsem zaradi učinka gostotnih tokov so dejanske hidrodinamične razmere v usedalnikih s kontinuirnim delovanjem precej bolj kompleksne. Številne eksperimentalne študije in meritve na prototipih so pokazale, da je tipična tokovna slika sestavljena iz toka sveže suspenzije po dnu in povratnega toka, usmerjenega proti vtočnemu jašku. Včasih se tudi v zgornjem sloju usedalne komore oblikuje še en, nekoliko šibkejši tok, ki je usmerjen proti iztočnemu profilu. Gre za troslojno tokovno strukturo, ki lahko stabilizira hidrodinamične razmere v usedalniku in ima pozitiven vpliv na učinkovitost čiščenja.

Predpostavljeno je bilo, da tokovne razmere v usedalniku vplivajo na delovanje in učinkovitost usedalnika. Predvideno je bilo, da je nabor eksperimentalnih podatkov o tokovnem polju znotraj usedalnika iz lastnih, s sodobno opremo podprtih meritev, dobra podlaga za preučevanje fenomenoloških relacij parametrov v krožnem usedalniku, s čimer naj bi se nadgradilo poznavanje fizikalnega ozadja usedanja trdnih delcev v usedalniku. Poleg tega je bil namen študije ugotoviti, kakšna je vloga Froudovega densimetričnega števila pri procesih v usedalniku.

Zato je disertacija na fizičnem modelu naknadnega krožnega usedalnika preučila vpliv tokovnega polja na delovanje usedalnika. Eksperimentalna študija je obsegala dvanajst različnih kombinacij obratovalnih parametrov, tj. hidravlične obremenitve in koncentracije suspenzije na vtoku. Poleg že omenjenih so bili spremenljiv parameter tudi trdni delci, ki so služili kot suspendirana snov. Prva skupina uporabljenih delcev je bila mleta lešnikova lupina, ki je bila na voljo v dveh sestavih glede na strukturo velikosti zrn; drugo skupino so zastopali stekleni delci v treh različnih granulacijah. v dveh sestavih glede na strukturo velikosti zrn; drugo skupino so zastopali stekleni delci v treh različnih granulacijah. Trije kontrolni poskusi so se izvedli pri gostotno nevtralnih pogojih z vnosom barvila.

Vsi poskusi so bili snemani s kamero, iz posnetkov je bil s fotogrametričnim pristopom v vtočnem jašku in v neposredni bližini iztoka določen indikator koncentracije v suspenziji, s pomočjo računalniško podprte vizualizacije pa so bili pridobljeni podatki o tokovnem polju. Pri ponovitvi prve serije poskusov se je izvajalo še vzorčenje suspenzije na vtoku in iztoku.

Velik obseg eksperimentov s skrbno izbranimi parametri je omogočal sistematično obravnavo hidrodinamičnih fenomenov v usedalni komori. Poudarek je bil na obravnavi tipičnih tokovnih struktur, ki se vzpostavijo v usedalniku, ter na določitvi učinkovitosti usedalnika.

Rezultati eksperimentalne študije so potrdili tezo, da ima tokovna slika, ki se oblikuje v usedalni komori, izreden vpliv na delovanje oziroma učinkovitost usedalnika (Prešeren et al., 2013). Ugotovljeno je bilo, da je pri delcih nižjih hitrosti usedanja (fino mleta lešnikova lupina, steklene mikrokroglice zrnavosti A in B) Froudovo densimetrično število na vtoku tisti parameter, ki odloča, kakšno tokovno polje se bo vzpostavilo v usedalni komori (Prešeren et al., 2013). Pri teh delcih je nizka vrednost Fr_d pogojevala vzpostavitev ugodne troslojne tokovne strukture, pri čemer je bila mejna vrednost Fr_d, nad katero se troslojni tok ne oblikuje več, neodvisna od tipa in velikosti delcev. Pri poskusih, katerih začetna vrednost Froudovega densimetričnega števila je bila enaka ali manjša od 0,04 v sredinskem prerezu (oziroma manjša ali enaka od 0,045 na vtoku) se je vzpostavil polno razvit troslojni tok (Prešeren et al., 2013).

Pri delcih višjih hitrosti usedanja (grobo mleta lešnikova lupina ter steklene mikrokroglice zrnavosti C) teoretično Froudovo densimetrično število ni imelo vpliva. Pri največjih izmed steklenih mikrokroglic in grobo mlete lešnikove lupine se namreč troslojni tok ni nikoli pojavil. Iz opazovanja posnetkov je bilo moč razbrati, da je usedanje pri teh modelnih delcih tako učinkovito, da je računsko določeno Froudovo densimetrično število na sredini segmenta usedalnika zaradi velikih odstopanj med dejansko in računsko relativno razliko med gostoto sveže dotekajoče suspenzije in medija v usedalni komori bistveno višje od dejanskega. To nakazuje na možnost, da je dejansko Froudovo densimetrično število na sredini usedalnika vendarle tisto, ki je pokazatelj tokovnih razmer v usedalniku.

Večji delci, ki ne sledijo kriteriju Froudovega densimetričnega števila, se najverjetneje v naknadnem usedalniku čistilne naprave niti ne bi pojavili, ker bi se izločili iz vode že med predčiščenjem in v primarni fazi čiščenja odpadne vode. Pri industrijskih usedalnikih s kontinuirnim delovanjem, ki niso sestavni del klasične verige čiščenja na komunalnih čistilnih napravah, pa je tudi ta podatek pri optimizaciji razsežnosti usedalnika zelo pomemben.

Ne glede na modelne delce pa je bila učinkovitost čiščenja vedno tesno povezana z vrednostjo Froudovega densimetričnega števila Fr_d (Prešeren et al., 2013). Pri vseh poskusih je bil opažen trend naraščanja učinkovitosti s padanjem vrednosti Fr_d. Pri obravnavi modela, ki je tekom eksperimentalne študije ostajal enak od prvega do zadnjega poskusa, je pravzaprav vseeno, v katerem prečnem prerezu se določi vrednost Froudovega densimetričnega števila – ali na sredini usedalne komore ali na vtoku. Izračunani vrednosti $Fr_{d.m}$ in $Fr_{d.0}$ sta namreč linearno odvisni, pri obravnavanem modelu usedalnika pa je sredinsko Froudovo densimetrično število približno desetkrat manjše od Froudovega densimetričnega števila na vtoku v usedalnik. Navedba izbranega prečnega prereza je vseeno pomembna zaradi primerjave z ugotovitvami drugih avtorjev. Tu se nasploh pojavlja vprašanje, kateri od teh dveh brezdimenzijskih parametrov je bolj univerzalen oziroma bolj primeren za primerjavo rezultatov študij na različnih usedalnikih. Z vidika točnosti določitve Froudovega densimetričnega števila je bolj smotrna odločitev za vrednost na vtoku, ker računska srednja hitrost v vtočnem prerezu praktično ne odstopa od dejanske hitrosti, do česar lahko zaradi kompleksnejših struktur hitro pride v sredinskem prerezu. Po drugi strani pa je bilo izvedeno nemalo raziskav na modelih in prototipih usedalnika, ki so izkazovale zelo majhen vpliv razsežnosti in oblike vtoka na učinkovitost usedalnika. To bi lahko pomenilo velika odstopanja med $Fr_{d.0}$ pri usedalnikih, v katerih bi se pri enakih obratovalnih pogojih lahko vzpostavila podobna tokovna slika.

V splošnem je bilo ugotovljeno, da je učinkovitost usedalnika odvisna od teoretičnega Froudovega densimetričnega števila Fr_d (Prešeren et al., 2013) ter od hitrosti diskretnega usedanja suspendiranih delcev. Hitrost usedanja delca je odvisna od njegove velikosti, gostote in oblike, Froudovo densimetrično število pa je odvisno od obratovalnih parametrov in sicer, od srednje hitrosti toka (neposredno odvisna od pretoka) ter od relativne razlike v gostoti dotekajoče suspenzije in medija v usedalni komori. Rezultati vzorčenja so pokazali na trend naraščanja učinkovitosti usedanja v usedalniku, kadar se Froudovo densimetrično število niža. Pri tem je treba opozoriti, da so bili s poskusi obravnavani primeri z razponom vrednosti Froudovega densimetričnega števila od 0,015 do 0,11 na sredini usedalnika (oziroma 0,15 do 1,05 na vtoku v usedalnik). Pri višjih hitrostih diskretnega usedanja delcev je pričakovano tudi učinkovitost usedanja večja; pri večjih oziroma težjih delcih so namreč zaradi večjih težnostnih sil vplivi hidrodinamičnih sil na gibanje delca manjši.

Poznavanje fenomenoloških zvez med učinkovitim delovanjem usedalnika ter dejavniki, na katere lahko vplivamo oziroma jih lahko upoštevamo pri načrtovanju objekta, je tisto, kar omogoča, da se lahko učinkovitost uspešno upošteva kot vodilo pri zasnovi in dimenzioniranju usedalnika. Pri

nekaterih suspendiranih snoveh se lahko vpliva na velikosti delcev (s kemičnim ali fizikalnim spodbujanjem procesov kosmičenja), na obratovalne parametre pa se lahko vpliva z dodatnimi zadrževalnimi bazeni (za uravnavanje pretoka oziroma hitrosti) ter z vračanjem usedline v usedalnik (uravnavane koncentracije vstopne suspenzije in s tem relativne razlike v gostoti).

Ne glede na dejstvo, da so Krebs et al. (1998) pri preučevanju pravokotnega usedalnika in Prešeren et al. (2013) pri preučevanju okroglega usedalnika prišli do enake mejne vrednosti Froudovega densimetričnega števila na vtoku ($Fr_{d.m}$), ki razmejuje tiste razmere, ko se v usedalniku vzpostavi tokovna slika z učinkom kratkega krogotoka, in tiste razmere, ko se izoblikuje troslojna tokovna slika, se samo na osnovi teh dveh študij mejne vrednosti $Fr_{d.m}$), še ne sme nekritično posplošiti na vse usedalnike poljubnih oblik in razsežnosti. Povsem verjetno je, da se dejavniki oblike izgubijo, ker se laboratorijske raziskave izvajajo na usedalnikih, ki so oblikovani po uveljavljenih smernicah, tako da je razmerje globine in dolžine usedalnika optimalno.

Zaradi kompleksnosti delovanja usedalnika s kontinuirnim delovanjem so bili v disertaciji obravnavani samo fizikalni oziroma hidrodinamični vplivi na učinkovitost. Nabor eksperimentov je zajel velik obseg kombinacij prostorninskega pretoka in koncentracije ter kar pet izborov modelnih delcev, drugi parametri pa se niso spreminjali.

Vsekakor tudi oblika in razsežnosti usedalnika vplivajo na učinkovitost čiščenja. Ker so eksperimenti potekali samo na enem modelu usedalnika, njegova geometrija pa je bila pri vseh poskusih enaka, teh vplivov na podlagi rezultatov pričujoče študije ni mogoče ovrednotiti. V prihodnosti bi bilo zato smiselno izvesti nove eksperimentalne študije, ki bi omogočile sistematično analizo vpliva oblike in razsežnosti usedalnika na mejno vrednost Froudovega densimetričnega števila, ki ločuje obratovalne pogoje, pri katerih se vzpostavi troslojna tokovna slika, in pogoje, pri katerih pride do učinka kratkega krogotoka. Tovrstne raziskave so sicer povezane z višjimi stroški, a le na tak način bi se lahko opredelila splošna dognanja glede vloge Froudovega densimetričnega števila na procese v usedalniku.

Poleg tega bi nabor poskusov z enakimi obratovalnimi parametri na modelih različnih razsežnosti in oblik omogočil, da bi se odgovorilo na odprto vprašanje, v katerem prečnem prerezu je pri različnih usedalnikih Froudovo densimetrično število najbolj primerno za primerjavo rezultatov (z različnih usedalnikov) in s tem najbolj merodajno za opredelitev tokovne slike.

POVZETEK

Usedalniki predstavljajo pomemeben člen v procesu čiščenja odpadnih voda. Odstranjevanje trdnih delcev iz odpadne vode v usedalniku temelji na zelo preprostem fizikalnem načelu – delci se usedajo proti dnu zaradi svoje teže. V primarnih usedalnikih so z načrtovanjem zagotovljene nizke hitrosti, pri katerih se večji delci brez težav izločijo iz odpadne vode. Vpliv hidrodinamičnih razmer na delovanje primarnega usedalnika je zato v splošnem dokaj majhen. Povsem drugače je pri sekundarnih usedalnikih, katerih delovanje je kontinuirno. Na procese v usedalniku vpliva že samo neprenehno dotekanje sveže suspenzije in spremenljivi obratovalni parametri (pretok in delež trdnih delcev v odpadni vodi, fizikalne lastnosti delcev), poleg naštetih dejavnikov pa imajo vpliv še reologija (starost suspenzije), oblikovne značilnosti usedalnika, zunanji vplivi (temperatura okolice, veter). Zaradi kompleksnosti delovanja usedalnika se disertacija omejuje na obravnavo hidravličnih vplivov.

Prve teorije o učinkovitosti gravitacijskega usedanja je razvil Hazen (1904) za diskretno usedanje v "idealnem usedalniku", v katerem je tok enakomeren in vladajo laminarne razmere. Na njegovih temeljih je Camp (1946) razvil računski model, ki je bil dolga leta podlaga za dimenzioniranje primarnih in naknadnih usedalnikov. Že Anderson (1945) je na podlagi številnih meritev na prototipih ugotovil, da se učinkov gostotnih tokov v usedalnikih s kontinuirnim delovanjem ne bo dalo preprečiti. V večini naknadnih usedalnikov so prisotni gostotni tokovi, ki narekujejo hidrodinamične razmere, tako da te praviloma bistveno odstopajo od enakomerne tokovne slike (DeVantier in Larock, 1987).

Običajno se v naknadnih usedalnikih v spodnjem sloju oblikuje tok sveže suspenzije po dnu, v zgornjem sloju pa se oblikuje povratni tok, usmerjen proti vtočnem jašku (Ueberl, 1995). Številne eksperimentalne raziskave so pokazale, da se standardni začetni dvoslojni tokovni vzorec pri določenih pogojih spremeni in preoblikuje v troslojni tok (Kim et al., 2003), kar izboljša učinkovitost usedalnika (Bajcar et al., 2011; Krebs et al., 1998; van Marle in Krannenburg, 1992). V tem primeru se namreč sveža suspenzija ob zunanji steni komore obrne nazaj proti vtoku še preden doseže iztočni preliv, s čimer je učinek kratkega krogotoka zadušen in čas, ko se delci zadržujejo v usedalniku, podaljšan (Bajcar et al., 2011). Poleg tega se v zgornjem sloju v smeri proti iztoku izoblikuje šibek tok nizke koncentracije, ki lahko še dodatno izboljša kakovost suspenzije na iztoku iz usedalnika.

Predpostavljeno je bilo, da tokovne razmere v usedalniku vplivajo na delovanje in učinkovitost usedalnika. Poleg tega je bil namen študije ugotoviti, kakšna je vloga Froudovega densimetričnega števila pri procesih v usedalniku.

Da bi se določile tipične tokovne razmere in njihov vpliv na učinkovitost usedalnika je bil izdelan fizični hidravlični model manjšega industrijskega usedalnika s kontinuirnim delovanjem. Fizični model predstavlja krožni izsek prototipa, pri čemer je predvidena osna simetrija fenomena okrog središčne navpičnice. Zunanje stene modela so iz pleksi stekla, kar je omogočilo opazovanje tokovnih struktur v vtočnem jašku in v usedalni komori.

Vsi poskusi so bili snemani s kamero, na podlagi digitalnih posnetkov je bil s fotogrametričnim pristopom v vtočnem jašku in v neposredni bližini iztoka določen indikator koncentracije v suspenziji, s pomočjo računalniško podprte vizualizacije pa so bili pridobljeni podatki o tokovnem polju. Pri ponovitvi prve serije poskusov se je izvajalo še vzorčenje suspenzije na vtoku in iztoku, določitev masnega deleža trdnih delcev v vzorcu se je določila s testom usedanja v Imhoffovem liju.

Kot suspendirana snov so bili uporabljeni mleta lešnikova lupina in steklena zrnca, prva v dveh različnih velikostih (kot fino in kot grobo mleta), druga pa v treh različnih zrnavostih, ki so bile zaradi lažjega sklicevanja na poskuse poimenovane kot zrnavost A (najmanjša), zrnavost B (srednje velika) in zrnavost C (največja). Poleg trdnih delcev je bilo v kontrolnih poskusih pri gostotno nevtralnih razmerah uporabljeno barvilo vodi enake gostote. To je omogočilo ovrednotenje učinka gostotnih tokov v usedalniku.

Obravnavanih je bilo kar šestdeset različnih kombinacij obratovalnih parametrov (trije različni prostorninski pretoki ter štiri različne relativne razlike v gostoti med dotekajočo suspenzijo in okoliškim medijem v usedalni komori) in različnih modelnih delcev. Pri izbiri nazivnih koncentracij poskusov s steklenimi zrnci je bilo vodilo enotnost Froudovega densimetričnega števila na začetku poskusa. Nazivne koncentracije so bile izbrane tako, da ima vsak poskus z lešnikovo lupino svoj par v skupini med poskusi s steklenimi delci. Velikost delcev pri tem nima vpliva, zato se ena vrednost Froudovega densimetričnega števila ponovi petkrat, dvakrat pri poskusih z lešnikovo lupino in trikrat pri poskusih s steklenimi zrnci. Velik obseg eksperimentov s skrbno izbranimi parametri je omogočal sistematično obravnavo hidrodinamičnih fenomenov v usedalni komori. Poudarek je bil na obravnavi tipičnih tokovnih struktur, ki se vzpostavijo v usedalniku, ter na določitvi učinkovitosti usedalnika.

Rezultati eksperimentalne študije so potrdili tezo, da ima tokovna slika, ki se oblikuje v usedalni komori, izreden vpliv na delovanje oziroma učinkovitost usedalnika (Prešeren et al., 2013). Ugotovljeno je bilo, da je pri delcih nižjih hitrosti usedanja (fino mleta lešnikova lupina, steklene mikrokroglice zrnavosti A in B) Froudovo densimetrično število na vtoku tisti parameter, ki odloča, kakšno tokovno polje se bo vzpostavilo v usedalni komori. Pri teh delcih je nizka vrednost Fr_d pogojevala vzpostavitev ugodne troslojne tokovne strukture, pri čemer je bila mejna vrednost Fr_d, nad katero se troslojni tok ne oblikuje več, neodvisna od tipa in velikosti delcev. Pri poskusih, katerih začetna vrednost Froudovega densimetričnega števila v sredinskem prerezu je bila enaka ali večja od 0,04, se je vzpostavilo polno razvit troslojni tok (Prešeren et al., 2013).

Pri delcih višjih hitrosti usedanja (grobo mleta lešnikova lupina ter steklene mikrokroglice zrnavosti C) teoretično Froudovo densimetrično število ni imelo enakega vpliva. Pri največjih izmed steklenih mikrokroglic in grobo mlete lešnikove lupine se namreč troslojni tok ni nikoli pojavil. Iz opazovanja posnetkov je bilo moč razbrati, da je usedanje pri teh modelnih delcih tako učinkovito, da računsko določeno Froudovo densimetrično število na sredini segmenta usedalnika zaradi velikih odstopanj med dejansko in računsko relativno razliko med gostoto sveže dotekajoče suspenzije in medija v usedalni komori izrazito odstopa od dejanskega Froudovega densimetričnega števila.

Večji delci, ki ne sledijo kriteriju Froudovega densimetričnega števila, se najverjetneje v naknadnem usedalniku čistilne naprave niti ne bi pojavili, ker bi se izločili iz vode že med predčiščenjem in v primarni fazi čiščenja odpadne vode. Pri industrijskih usedalnikih s kontinuirnim delovanjem, ki niso sestavni del klasične verige čiščenja na komunalnih čistilnih napravah, pa je tudi ta podatek pri optimizaciji razsežnosti usedalnika zelo pomemben.

Ne glede na modelne delce pa je bila učinkovitost čiščenja vedno tesno povezana z vrednostjo Froudovega densimetričnega števila Fr_d. Pri vseh poskusih je bil opažen trend naraščanja učinkovitosti s padanjem vrednosti Fr_d. Eksperimentalna študija je tako potrdila izjemen vpliv Froudovega densimetričnega števila na procese, ki se odvijajo v usedalniku, ter hkrati opozorila na to, da se vplivov fizikalnih lastnosti delcev pri preučevanju usedalnikov ne sme povsem zanemariti.

SUMMARY

Settling tanks are an important element in the wastewater treatment chain. Removal of solid particles is based on a very simple physical criterion – the particles settle down toward the bottom due to their gravity. Design of primary clarifiers assures low flow velocities conditions that allow bigger particles to settle down easily. Therefore in general the impact of hydrodynamic conditions on the performance of a primary clarifier is rather insignificant. When dealing with secondary clarifiers the situation is quite the opposite. The processes in the settling vessel are submerged to the influences of the unceasing inflow of fresh suspension, variable operative conditions (mass inflow and solid particles concentration in the wastewater, physical characteristics of particles); furthermore the process is influenced by the rheology, design characteristics of the settling tank, and external influences (such as exterior temperature, wind). Due to the complexity of the settling tank operation dissertation scope is limited to the hydraulic influences.

First theories on the gravitational settling efficiency were developed by Hazen (1904) for discrete settling in an "ideal clarifier" which is characterised by steady flow and laminar conditions. Based on his theory Camp (1946) developed a mathematical model which was for many years used for design of primary and secondary clarifiers. On the basis of numerous measurements on settling tank prototypes Anderson (1945) concluded that in clarifiers with continuous operation the density currents cannot be prevented. Density currents are present in most secondary clarifiers and these currents dictate the hydrodynamic conditions, which consecutively differ from ideal steady flow pattern significantly (DeVantier and Larock, 1987).

The common flow pattern in the secondary clarifier is characterised by formation of a bottom current of fresh suspension in the lower layer of the sedimentation vessel and formation of the reverse current heading back towards the feedwell (Ueberl, 1995). Numerous experimental researches had shown that in certain conditions the usual two-layer flow pattern changes and evolves into a three-layer flow pattern (Kim et al., 2003), which improves the clarifier's efficiency (Bajcar et al., 2011; Krebs et al., 1998; van Marle and Krannenburg, 1992). Namely, at the outer wall the fresh suspension turns back toward the inflow even before rising up to the effluent weir; hence the short circuiting effect is suppressed and retention time prolonged (Bajcar et al., 2011). Besides, in the upper layer a weak low concentration current is formed that can even additionally improve the quality of the effluent.

It was assumed that performance and efficiency of a clarifier is submerged to flow conditions in the clarifier. Moreover, the aim of the study was to identify the relevance of the densimetric Froud number when dealing with processes in settling tanks.

In order to define typical flow conditions and evaluate their impact on the clarifier efficiency a physical hydraulic model of a small industrial settling tank with continuous operation was constructed. The model represents a radial section of the prototype, where axisymmetry around the vertical axis is assumed. The model tank is made entirely of plexi-glass which enabled clear observation of flow structures in the weed well and in the settling vessel. For each experiment images of the suspension flow were acquired by a digital camera. By processing video clips of experiments an indicator of concentration in the inflow and in the vicinity of the effluent was captured by photogrammetric approach and data on flow field was obtained by computer-aided flow visualization. A repetition of the first series was carried out in order to collect samples of inflow and outflow suspension. The mass concentration of the samples was determined by means of Imhoff tests.

Ground hazelnut shell and glass micro beads served as a settling matter; the first one was used in two different sizes (as fine and as coarse ground), the second one was used in three different granulations – in order to simplify reference to each of these granulations the glass particles were named as A (the smallest), B (middle sized) and C (the biggest). Beside application of solid particles three control experiments were conducted at neutral density conditions by introducing a dye. This enabled evaluation of the density flow effects in the clarifier.

The experimental work consists of sixty different combinations of operative parameters (three different mass flows and four different relative density differences between the inflowing suspension and the ambient medium in the settling vessel) and different model particles. The nominal concentrations were chosen in such manner that the initial densimetric Froud number values meet the criterion of unity; meaning that each experiment with ground hazelnut shell has its pair among the experiments with glass particles. Since the particle size has no influence on the densimetric Froud number, a group of five experiments out of the entire range share the same value of the densimetric Froud number. A wide set of experiments with carefully chosen parameters enabled a systematic study of hydrodynamic phenomena in the sedimentation chamber. The focus of the study was on typical flow structures that develop in the clarifier and on clarifier's efficiency.

The results of the experiment confirmed the thesis that the flow field formed in the settling vessel has a great impact on the clarifier's performance, hence efficiency (Prešeren et al., 2013). It was found out that for particles of low discrete settling velocities (fine ground hazelnut shell, glass microspheres of A and B granulation) the densimetric Froud number is the parameter that determines the flow field which is to establish in the sedimentation vessel. The analysis within the scope of these particles showed that the low value of Fr_d is related to the establishment of the beneficial three-layer flow structure; the threshold value of Fr_d (above which the three-layer flow is no longer formed) turned out to be independent from the type or size of solid particles. In experiments of initial value of densimetric Froud number in the mid cross-section equal or lower than 0.04 a fully developed three-layer flow was established (Prešeren et al., 2013).

For particles of higher discrete settling velocities (coarse ground hazelnut shell and glass microspheres of C granulation) the theoretical densimetric Froud number did not have the same impact. A three-layer flow structure never occurred when the biggest particle granulation from glass microspheres and when coarse ground hazelnut shell was used. Video clips of experiments exhibited that with these model particles the settling process was so efficient that in the mid cross-section came to a great disparity between the actual and the calculated relative density difference. Hence also the calculated densimetric Froud number ($Fr_{d.m}$) significantly differs from the actual value.

Bigger particles which are not submerged to the densimetric Froud number criterion would probably never even occur in the secondary clarifier as they would most likely be removed from the water already in the previous phases of water treatment. By autonomous industrial clarifiers with continuous operation also the behavior of these particles is very relevant.

Nevertheless, regardless of the particles used, the flow field and clarification efficiency were found out to be closely related to the value of the densimetric Froude number Fr_d. All experiments exhibited trends of growing efficiency when values of the densimetric Froude number Fr_d were decreasing Experimental study confirmed the substantial influence of the densimetric Froud number on the processes that evolve in the clarifier. It also pointed out that the impact of physical properties of the particles should not be totally excluded when investigating the settling tank performance.

VIRI

Aider, J.-L., Westfreid, J.E., 1995. Visualizations and PDF of the fluctuations of a passive scalar in a turbulent Goertler flow. Experimental and Numerical Flow Visualization 218: 123–130.

Al-Sammarraee, M., Chan, A. 2009. Large-eddy simulations of particle sedimentation in a longitudinal sedimentation basin of a water treatment plant. Part 2: The effects of baffles. Chemical Engineering Journal 152: 315–321.

Anderson, N.E. 1945. Design of final settling tanks for activated sludge. Sewage Works Journal 17, 1: 50–63.

The American heritage dictionary of the English language, 4th Edition. Houghton Mifflin Company: 2112 str.

Bajcar, T., Širok, B., Eberlinc, M. 2009. Quantification of flow kinematics using computer-aided visualization. Strojniški vestnik, 55, 4: 215–223.

Bajcar, T., Gosar, L., Širok, B., Steinman, F., Rak, G. 2010. Influence of flow field on sedimentation efficiency in a circular settling tank with peripheral inflow and central effluent. Chemical Engineering and Processing 49: 514–522.

Bajcar, T., Steinman, F., Širok, B., Prešeren, T. 2011. Sedimentation efficiency of two continuously operating circular settling tanks with different inlet- and outlet arrangements. Chemical Engineering Journal 178: 217–224.

Barczewski, B. 1990. Optische Methoden zur in-situ Tracerkonzentrationsmessung in Strömungen. Wasserwirtschaft 80, 11: 553–561.

Benjamin, T.B. 1968. Gravity currents and related phenomena. Journal of Fluid Mechanics 31: 209–248.

Biggs, C.A., Lant, P.A. 2002. Modelling activated sludge flocculation using population balances. Powder Technology 124, 3: 201–211.

Bond, A.W. 1960. Behaviour of suspensions. Journal of the Sanitary Engineering Division ASCE 86, 3: 57–85.

Brater, E.F., King, H.W., Lindell, J.E., Wei, C.Y. 1996. Handbook of hydraulics, 7th Edition. New York, McGraw-Hill.

Bretscher, U., Krebs, P., Hager, W.H. 1992. Improvement of flow in final settling tanks. Journal of Environmental Engineering 118, 3: 307–321.

Brilly, M., Šraj, M., 2005. Osnove hidrologije. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 309 str.

Brown, P.P., Lawler, D.F. 2003. Sphere Drag and Settling Velocity Revisited. Journal of Environmental Engineering 129, 3: 222–231.

Bürger, R. Karlsen, K.H., Towers, J.D., 2005. A model of contiuous sedimentation of flocculated suspensions in clarifier-thickener unit. SIAM Journal on Applied Mathematics 65, 3: 882–940.

Bürger, R. Karlsen, K.H., Lie, K.A. 2000 a. Numerical methods for the simulation of the settling of flocculated suspensions. Chemical Engineering Journal 80: 91–104.

Bürger, R., Concha, F., Tiller, F.M. 2000 b. Applications of the phenomenological theory to several published experimental cases of sedimentation processes. Chemical Engineering Journal 80: 105–117.

Bürger, R., Butstos, M.C., Concha, F. 1999. Settling velocities of particulate system: 9. Phenomenological theory of sedimentation processes: numerical simulation of the transient behaviour of flocculated suspenisions in an ideal batch or contiuous thickener. International Journal of Mineral Processing 55, 4: 267–282

Bürger, R., Concha, F., 1998. Mathematical model and numerical simulation of the settling of flocculated suspensions. International Journal of Multiphase Flow 24: 1005–1023.

Camp, T.R. 1946. Sedimentation and the Design of Settling Tanks. Transactions of the American Society of Civil Engineers 111, 1: 895–936.

Casey, T.J. 1997. Unit Treatment Processes in Water and Wastewater Engineering, 1st Edition. Chicester, Wiley: 292 str.

Chanson, H. 2004. The hydraulics of open channel flow : an introduction ; basic principles, sediment motion, hydraulic modelling, design of hydraulic structures, 2nd Edition. Amsterdam; Boston, Elsevier Butterworth Heinemann: 585 str.

Chhabra, R.P., Agarwal, L., Sinha, N.K., 1999. Drag on non-spherical particles: an evaluation of available methods. Powder Technology 101: 288–295.

Ciccarello, A., Bolognesi, A., Maglionico, M., Artina, S. 2012. The role of settling velocity formulation in the determination of gully pot trapping efficiency: comparison between analytical and experimental data. Water Science and Technology 65, 1: 15–21.

Clift, R., Grace, J.R., Weber, M.E. 1978. Bubbles, drops, and particles. New York, Academic Press.

David, R., Saucez, P., Vasel, J.-L., Vande Wouwer, A., 2009. Modeling and numerical simulation of secondary settlers: a method of lines strategy, Water Research 43: 319–330.

De Clercq, B. 2003. Computational fluid dynamics of settling tank: Development of experiments and rheological, settling and scraper submodels. Doctor Thesis. University of Gent.

De Clercq, B., Lant, P.A., Vanrolleghem, P.A. 2004. Focused beam reflectance technique for in situ particle sizing in wastewater treatment settling tanks. Journal of Chemical Technology and Biotechnology 79, 6: 610–618.

Deininger, A. Holthausen, E., Wilderer, P.A., 1998. Velocity and solids distribution in circular secondary clarifiers: full scale measurements and numerical modelling, Water Research 32, 10: 2951–2958.

Demir, A. 1995. Determination of settling efficiency and optimum plate angle for plated settling tanks, Water Research 29: 611–616.

DeVantier B.A., Larock B.E. 1986. Modeling a recirculation density-driven turbulent flow. International Journal for Numerical Methods in Fluids 6, 4: 241–253.

DeVantier B.A., Larock B.E. 1987. Modeling sediment-induced density current in sedimentation basins. Journal of Hydraulic Engineering 113: 80–94.

van Deventer, B.G.B., Usher, S.P., Kumar, A., Rudman, M., Scales, P.J. 2011. Aggregate densification and batch settling. Chemical Engineering Journal 171: 141–151.

Diehl, S. 2000. On boundary conditions and solutions for ideal clarifier–thickener units. Chemical Engineering Journal 80: 119–133.

Diehl, S., 2007. Estimation of the batch-settling flux function for an ideal suspension from only two experiments. Chemical Engineering Science 62, 17: 4589–4601.

Ding, A., Hounslow, M.J., Biggs, C.A. 2006. Population balance modelling of activated sludge flocculation: Investigating the size dependence of aggregation, breakage and collision efficiency. Chemical Engineering Science 61, 1: 63–74.

Dupont, R., Dahl, C. 1995. A one-dimensional model for a secondary settling tank including density current and short-circuiting. Water Science and Technology 31, 2: 215–224.

Fair, G., Geyer, J. 1954. Water supply and waste water disposal. New York, Wiley.

Ganser, G.H. 1993. A rational approach to drag prediction of spherical and nonspherical particles. Powder Technology 7, 2: 143–152.

Garrido, P., Bürger, R., Butstos, M.C., Concha, F. 2000. Settling velocities of particulate system: 11. Comparison of the phenomenological sedimentation-consolidation model with published experimental results. International Journal of Mineral Processing 60: 213–227.

Garrido, P., Burgos R., Concha, F., Bürger, R. 2004. Settling velocities of particulate system: 13. A simulator for batch and continuous sedimentation of flocculated suspensions. International Journal of Mineral Processing 73: 131–144.

Gosar, L., Steinman, F., Širok, B., Bajcar, T. 2009. Phenomenological sedimentation model for an industrial circular settling tank, Journal of Mechanical Engineering 55: 319–326.

Goula, A.M., Kostoglou, M., Karapantsios, T.D., Zouboulis, A.I. 2008. The effect of influent temperature variations in a sedimentation tank for potable water treatment - A computational fluid dynamics study. Water Research 42: 3405–3414.

Govoreanu, R., Saveyn, H., Van der Meeren, P., Vanrolleghem, P.A. 2004. Simultaneous determination of activated sludge floc size distribution by different techniques. Watter Science Technology 50, 12: 39–46.

Guetter, A.K., Jain, S.C. 1991. Analytical solution for density currents in settling basins. Journal of Hydraulic Engineering 117, 3: 324–345.

Guo, J. 2011. Motion of spheres falling through fluids. Journal of Hydraulic Research 49, 1: 32–41.

Haider, A., Levenspiel, O. 1989. Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles. Powder Technology 58, 1: 63–70.

Hazen, A. 1904. On Sedimentation. Transactions of the American Society of Civil Engineers LIII, 2: 45–71.

Helmig, R., Mielke, A., Wohlmuth, B.I. (ur.) 2006. Multifield Problems in Solid and Fluid Mechanics. Berlin, Springer-Verlag: 571 str.

Jamshidnia, H., Firoozabadi, B., Takeda, Y. 2010. An experimental study of the flow structure in a rectangular sedimentation open channel in the presence of a baffle. Journal of Applied Mechanics 13: 899–907.

Jamshidnia, H., Takeda, Y. 2010. An experimental study of the effect of a baffle on the flow structure in a rectangular open channel using UVP. Journal of Fluid Science and Technology 5, 3: 542–557.

Kim, H.S., Shin, M.S., Jang, D.S., Jung, S.H., Jin, J.H. 2005. Study of flow characteristics in a secondary clarifier by numerical simulation and radioisotope tracer technique. Applied Radiation and Isotopes 63, 4: 519–526.

Kim, J., Kim, S., Yoon, J. 2003. The evaluation of a density current experiment as a verification tool of a secondary clarifier model. Water Science and Technology 47, 12: 113–118.

Knop, E. 1966. Design Studies for the Emscher Mouth Treatment Plant. Water Pollution Control Federation 38, 7: 1194–1207.

Krebs, P. 1991. The hydraulics of final settling tanks. Water Science and Technology 23, 4–6: 1037–1046.

Krebs, P., Vischer, D., Gujer, W. 1995. Inlet-structure for final clarifiers. Journal of Environmental Engineering 121: 8, 558–564.

Krebs, P. , Armbruster, M., Rodi, W. 1998. Laboratory experiments of buoyancy-influenced flow in clarifiers. Journal of Hydraulic Research 36: 831–851.

Kynch, G.J. 1952. A theory of sedimentation, Transactions of the Faraday Society 48: 166–176.

Larsen, P. 1977. On the hydraulics of rectangular settling basins, vol. 1001, Department of Water Research Engineering, Lund Institute for Technology, University of Lund, Sweden.

Larsen, T. 2000. Measuring the variations of the apparent settling velocity for fine particles. Water Research 34, 4: 1417–1418.

Li, D., Ganczarczyk, J. 1991. Size distribution of activated sludge flocs. Journal of Water Pollution Control Federation 63, 5: 806–814.

Lin, S.D. 2001. Water and wastewater calculations manual. McGraw-Hill, New York.

López, P.R., Lavín, A.G., López, M.M.M., Bueno de las Heras, J.L., 2008, Flow models for rectangular sedimentation tanks, Chemical Engineering and Processing 47, 9–10: 1705–1716.

Lowe, R. J., Linden, P. F., Rottman, J. W. 2002. A laboratory study of the velocity structure in an intrusive gravity current. Journal of Fluid Mechanics 456: 33–48.

Lyn, D.A. 1992. Laboruntersuchungen der Stromungsverhaltnisse in Einem Lang Sdurchstrometen Mdellabsetzbecken. Report SFB210/T/82. Karlsruhe, University of Karlsruhe: 45–65.

Lynggaard-Jensen, A., Andreasen, P., Husum, F., Nygaard, M., Kaltoft, J., Landgren, L., Møller, F., Brodersen, E. 2009. Increased performance of secondary clarifiers using dynamic distribution of minimum return sludge rates. Water Science and Technology 60, 9: 2439–2445.

Malačič, V. 1998. Gostotni tok. Obzornik za matematiko in fiziko 45, 5: 144–155.

van Marle, C., Kranenburg, C. 1994. Effects of gravity currents in circular secondary clarifiers, Journal of Environmental Engineering 120, 4: 943–960.

McComb, W.D. 1996. The Physics of Fluid Turbulence, Oxford Engineering Science, Clarendon Press, Oxford, 462 str.

McCorquodale, J.A. 1976. Hydraulic study of the circular settling tanks at the West Windsor pollution control plant. Report. Windsor. University of Windsor.

McCorquodale, J.A., Zhou, S. 1993. Effects of hydraulic and solids loading on clarifier performance. Journal of Hydraulic Research 31, 4: 461–478.

Mosby's Medical Dictionary, 8th Edition. Amsterdam, Elsevier: 2056 str.

Moursi, A. M., McCorquodale, J. A., El-Sebakhy, I., 1995. Experimental study of heavy radial density currents. Journal of Environmental Engineering 121, 12: 920–929.

Nogueira, H.I.S., Adduce, C., Alves, E., Franca, M.J. 2013. Image analysis technique applied to lock-exchange gravity currents. Measurement Science and Technology 24 (047001), 4 str.

Nopens, I., Koegst, T., Mahieu, K. Vanrolleghem, P.A. 2005. PBM and activated sludge flocculation: From experimental data to a calibrated model. AIChE Journal 51, 5: 1548–1557.

Novak, G., Steinman, F., Müller, M., Bajcar, T. 2012. Study of velocity field at model sideweir using visualization method. Journal of Hydraulic Research 50, 1: 129–133.

Panjan, J. 1988. Analyse der Einflüsse auf Sedimentation und Flotation. Wasserwirtschaft 78, 4: 161–167.

Peker, S.M., Helvaci, Ş.Ş., 2008. Solid–Liquid Two Phase Flow, Elsevier, Amsterdam, 245–289.

Prešeren, T., Steinman F., Širok, B., Bajcar, T. 2013. The theoretical densimetric Froude number values with favourable effect on the clarifier performance. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification 74: 97–105.

Radojević, M., Bashkin, V.N. 2006. Practical Environmental Analysis, 2nd Edition. Cambridge, The Royal Society of Chemistry: 457 str.

Reichel, G., Nachtnebel, H.P. 1994. Suspended sediment monitoring in a fluvial environment: Advantages and limitations applying an acoustic Doppler current profiler. Water Research 28: 751–761.

Rhodes, M. (ur.). 2008. Introduction to Particle Technology, 2nd Edition. West Sussex, Wiley: 474 str.

de Rooij, F. 1999. Sedimenting particle-laden flows in confined geometries. Doktorska disertacija. Cambridge. University of Cambridge: 203 str.

Samstag, R.W., Dittmar, D.F., Vitasovic, Z., McCorquodale, J.A. 1992. Underflow Geometry in Secondary Sedimentation. Water Environment Research 64, 3: 204–212.

Shannon , P. T. Stroupe , E. Tory, E. M. 1963. Batch and continuous thickening: Basic theory. Solids flux for rigid spheres. Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals 2, 3: 203–211.

Shannon, P.T., Dehaas, R.D., Stroupe, E.P., Tory., E.M. 1964. Batch and Continuous Thickening: Prediction of batch settling behavior from initial rate data with results for rigid spheres. Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals 3, 3: 250–260.

Shahrokhi, M., Rostami, F., Md. Said, M., Yazdi, S., Syafalni. 2013. Experimental investigation of the influence of baffle position on the flow field, sediment concentration, and efficiency of rectangular primary sedimentation tanks. Journal of Hydraulic Engineering 139, 1: 88-94.

Simoens, S., Ayrault, M., 1994. Concentration flux measurements of a scalar quantity in turbulent flows, Experiments in Fluids 16: 273–281.

Simpson, J.E. 1982. Gravity currents in the laboratory, atmosphere, and ocean. Annual Review of Fluid Mechanics 14: 213–234.

Simpson, J.E. 1997. Gravity currents in the environment and the laboratory, 2nd Edition. Cambridge, Cambridge University Press, 262 str.

Spicer, P.T., Pratsinis, S.E. 1996. Shear-induced flocculation: The evolution of floc structure and the shape of the size distribution at steady state. Water Research 30: 1049–1056.

SSKJ (1994); Bajec, A. et al. (ur.) 1994. Slovar slovenskega knjižnega jezika. Ljubljana: DZS.

Steinman, F. 2010. Hidravlika, 2. ponatis. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 294 str.

Širok, B., Bajcar, T., Dular, M. 2002. Reverse flow phenomenon in a rotating diffuser. Journal of Flow Visualization and Image Processing 9: 193–210.

Tamayol, A., Firoozabadi, B., Ahmadi, G. 2008. Effects of inlet position and baffle configuration on the hydraulic performance of primary settling tanks. Journal of Hydraulic Engineering 134, 7: 1004–1009.

Tamayol, A., Firoozabadi, B, Ashjari, M.A. 2010. Hydrodynamics of Secondary Settling Tanks and Increasing Their Performance Using Baffles. Journal of Environmental Engineering 136, 1: 32–39.

Tarud, F., Aybar, M., Pizarro, G., Cienfuegos, R., Pastén, P. 2010. Integrating Fluorescent Dye Flow-Curve Testing and Acoustic Doppler Velocimetry Profiling for In Situ Hydraulic Evaluation and Improvement of Clarifier Performance. Water Environment Research 82, 8: 675–685.

Tay, A.J., Heinke, G.W. 1983. Velocity and suspended solids distribution in settling tanks. Journal of the Water Pollution Control Federation 55, 3: 261–269.

Taebi-Harandy A., Schroeder E.D. 1995. Analysis of structural features on performance of secondary clarifiers. Journal of Environmental Engineering 121, 12911–919.

Taebi-Harandy, A., Schroeder, E.D. 2000. Formation of density currents in secondary clarifier. Water Research 34: 1225–1232.

Tekippe, R.J., Bender, J.H. 1987. Activated sludge clarifiers: Design requirements and research priorities. Water Pollution Control Federation 59, 10: 865–870

Thirumurthi, D. 1969. A Break-Through in the Tracer Studies of Sedimentation Tanks. Water Pollution Control Federation 41, 11: 405–418.

Tory, E.M., Bürger, R., Concha, F., Bustos, M.C. 1999. Sedimentation and thickening, Phenomenological foundation and mathematical theory. Berlin, Springer-Verlag, 285 str.

Tran-Cong, S., Gay, M., Michaelides, E.E. 2004. Drag coefficients of irregularly shaped particles. Powder Technology 139: 21–32.

Turton, R., Levenspiel, O. 1986. A short note on the drag correlation for spheres. Powder Technology 47: 83–86.

Ueberl, J. 1995. Verbesserung der Absetzwirkung von Nachklärbecken, Mitteilung VAW ETH Zürich Nr. 136: 254 str.

Ueberl, J., Hager, W. 1997. Improved design of final settling tanks. Journal of Environmental Engineering 123, 3: 259–268.

Vanrolleghem, P.A., Clercq, B.D., Clercq, J.D., Devisscher, M.,Kinnear, D.J., Nopens, I. 2006. New measurement techniques for secondary settlers: a review. Water Science and Technology 53, 4–5: 419–429.

Wadell, H. 1933. Sphericity and roundness of rock particles. The Journal of Geology 41, 3: 310–331.

Water Environment Federation: Clarifier Design. WEF Manual of Practice No. FD-8, 2nd Edition, 2005. McGraw-Hill, New York.

Water Pollution Control Federation, 1977. Wastewater treatment plant design – Manual of practice No.8. WPCF and Asce, Lancaster Press Inc., Lancester.

Wells, S.A., LaLiberte, D.M. 1998. Winter temperature gradients in circular clarifiers. Water Environment Research 70, 7: 1274–1279.

White, B.L., Helfrich., K.R. 2012. A general description of a gravity current front propagating in a two-layer stratified fluid. Journal of Fluid Mechanics 711: 545–575.

Wouda, T.W.M, Rietema, K., Ottengraf, S.P.P. 1977. Continuous sedimentation theory: effects of density gradients and velocity profiles on sedimentation efficiency. Chemical Engineering Science 32: 351–358

Zajic, J.E. 1971. Water Pollution: Disposal and Reuse. New York, Marcel Dekker: 648 str.

Zhang, D., Li, Z., Lu, P., Zhang, T., Xu, D. 2006. A method for characterizing the complete settling process of activated sludge, Water Research 40: 2637–2644.

Zhao, Y.Q. 2004. Settling behaviour of polymer flocculated water-treatment sludge II: effects of floc structure and floc packing. Separation and Purification Technology 35: 175–183.

Zhou, S., McCorquodale, J.A. 1992. Mathematical modelling of a circular clarifier. Canadian Journal of Civil Engineering 19, 3: 365–374.

Zhou, S., McCorquodale, J.A., Vitasovic, Z. 1992. Influences of density on circular clarifiers with baffles. Journal of Environmental Engineering 118, 6: 829–847.

Zhou, S., McCorquodale, J.A., Godo, A.M. 1994. Short-circuiting and density interface in primary clarifiers. Journal of Hydraulic Engineering 120, 9: 1060–1080.

Ta stran je namenoma prazna.

PRILOGE

Ta stran je namenoma prazna.

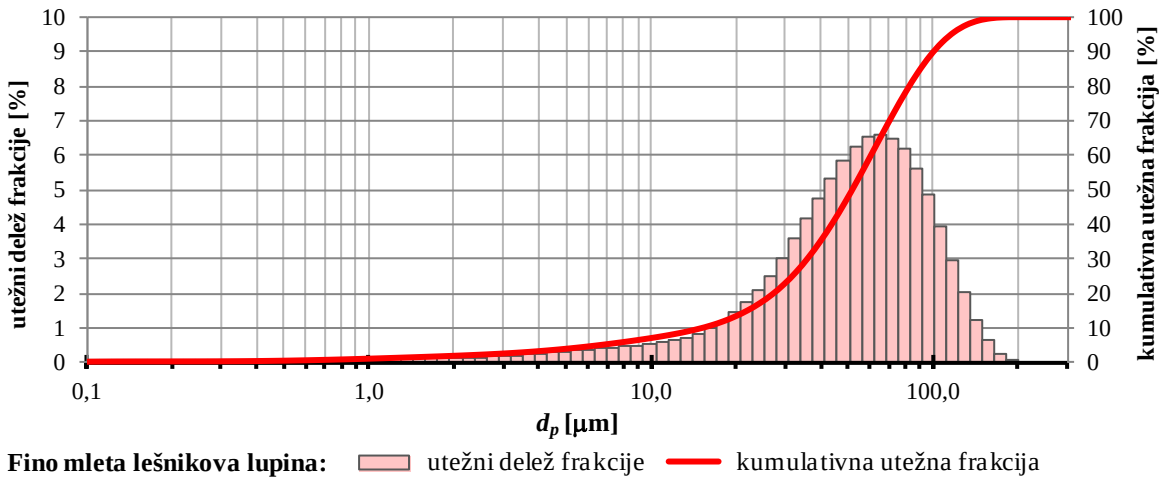
PRILOGA A: SPLOŠNI PODATKI O MODELNIH DELCIH

APPENDIX A: GENERAL DATA ON MODEL PARTICLES

Preglednica A.1: Pregled splošnih podatkov o modelnih delcih

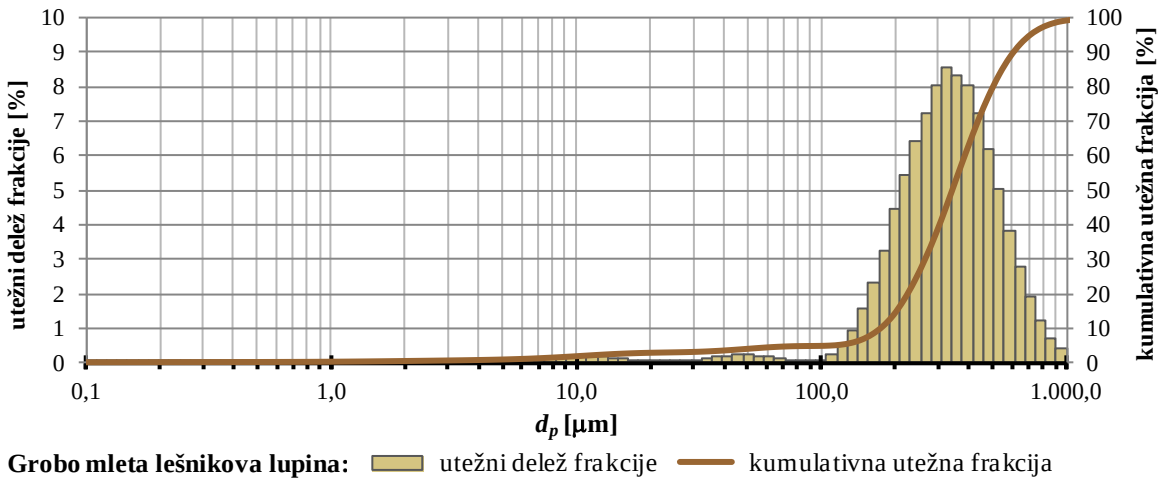
Table A.1: Overwiew of general data on model particles

Lastnost	Mleta lešnikova lupina	Steklena zrnca
izvor	organski	anorganski
gostota	1450 kg/m^3	2500 kg/m^3
oblika	približno okrogla	okrogla
barva	rjava	bela
površina	ni znano	gladka
poroznost	ni znano	neporozna



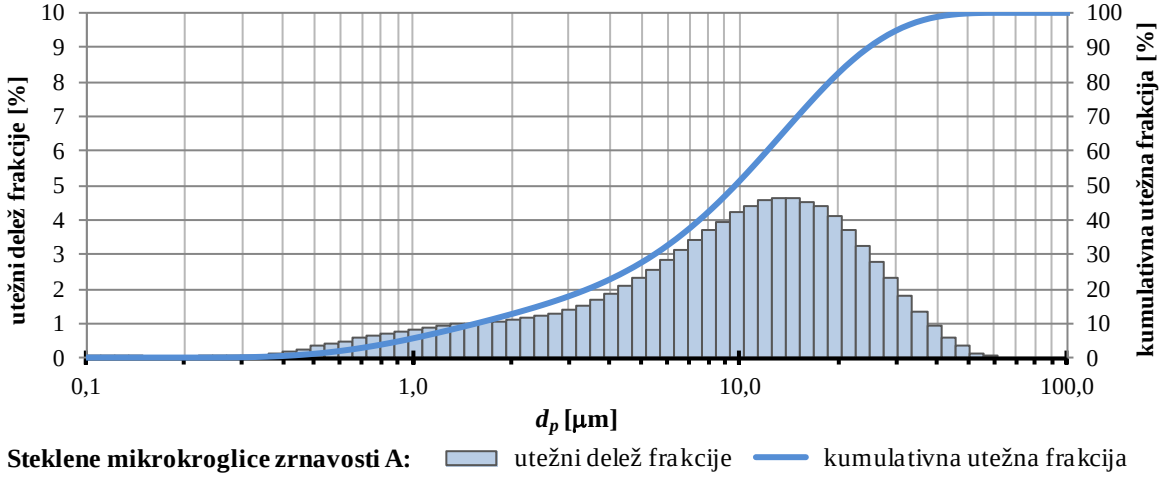
Grafikon A.1: Zrnavostna analiza velikosti delcev v fino mleti lešnikovi lupini

Graph A.1: Distribution of particle size of fine ground hazelnut shell



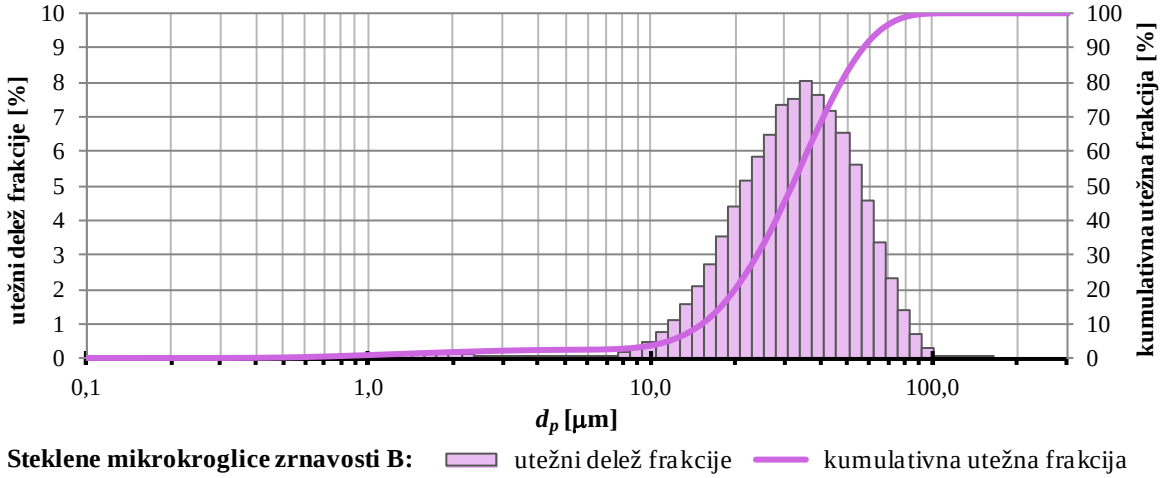
Grafikon A.2: Zrnavostna analiza velikosti delcev v grobo mleti lešnikovi lupini

Graph A.2: Distribution of particle size of coarse ground hazelnut shell



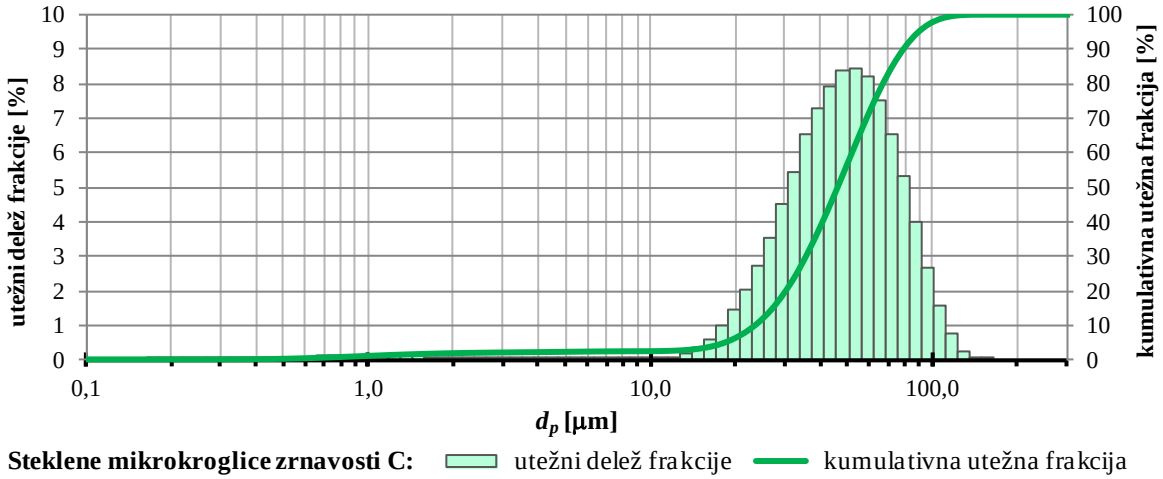
Grafikon A.3: Zrnavostna analiza velikosti delcev pri steklenih mikrokroglicah zrnavosti A

Graph A.3: Distribution of particle size of glass microbeads of the A granulation



Grafikon A.4: Zrnavostna analiza velikosti delcev pri steklenih mikrokroglicah zrnavosti A

Graph A.4: Distribution of particle size of glass microbeads of the A granulation



Grafikon A.5: Zrnavostna analiza velikosti delcev pri steklenih mikrokroglicah zrnavosti A

Graph A.5: Distribution of particle size of glass microbeads of the A granulation

PRILOGA B: PREGLED IZVEDENIH EKSPERIMENTOV

APPENDIX B: SUMMARY OF EXPERIMENTS

Preglednica B.1: Nabor poskusov, izvedenih na fizičnem modelu usedalnika

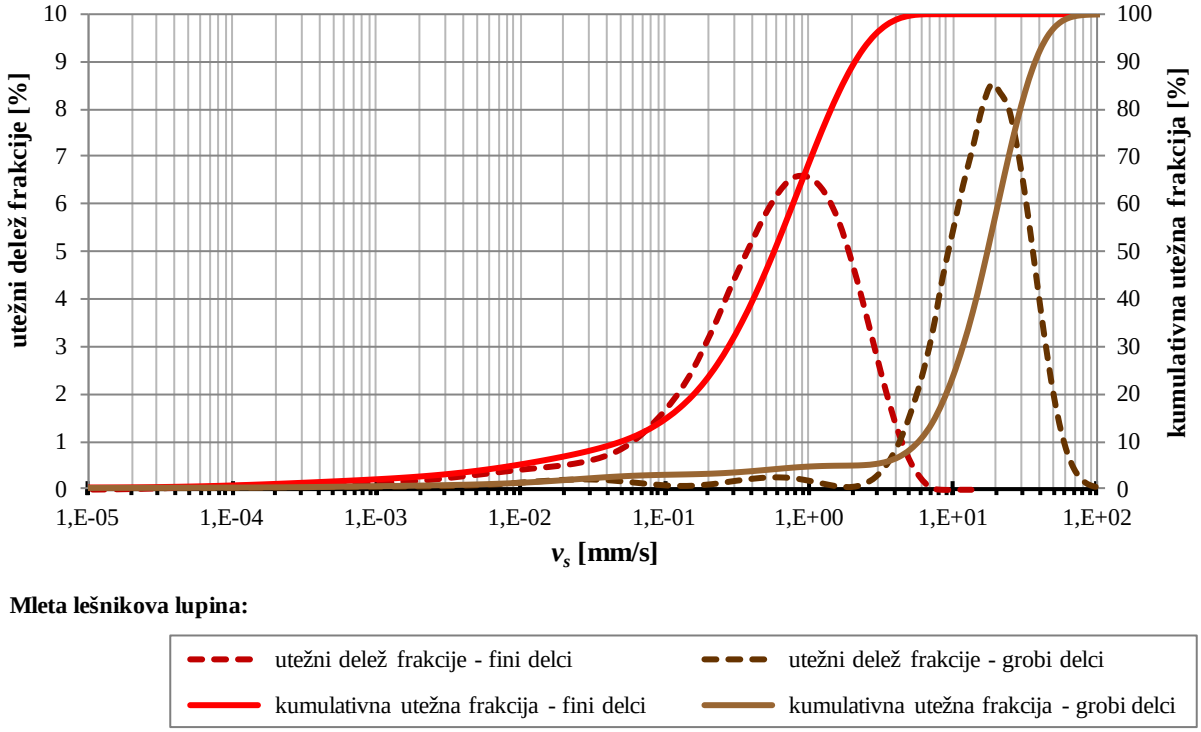
Table B.1: Test runs executed on the physcal settling tank model

	Šifra poskusa	*Suspendirana snov*	*Pretok*	*Masna koncentracija*	*Froudovo densimetrično število*
			Q [l/min]	*w* [%]	$Fr_{d,0}$ [ ]
	Snemanje poskusa: barvilo				
1	PP-cipe-dye-Q4M5mlV60	barvilo	4		/
2	PP-cipe-dye-Q6.M5mlV60	barvilo	6		/
3	PP-cipe-dye-Q10M5mlV60	barvilo	10		/
	Snemanje poskusa: fino mleta lešnikova lupina				
4	PP-cipe-Q4w0.25V60	fina LL	4	0,25	0,0427
5	PP-cipe-Q6w0.25V60	fina LL	6	0,25	0,0640
6	PP-cipe-Q10w0.25V60	fina LL	10	0,25	0,1067
7	PP-cipe-Q4w0.5V60	fina LL	4	0,5	0,0302
8	PP-cipe-Q6w0.5V60	fina LL	6	0,5	0,0452
9	PP-cipe-Q10w0.5V60	fina LL	10	0,5	0,0754
10	PP-cipe-Q4w1V60	fina LL	4	1	0,0213
11	PP-cipe-Q6w1V60	fina LL	6	1	0,0320
12	PP-cipe-Q10w1V60	fina LL	10	1	0,0533
13	PP-cipe-Q4w2V60	fina LL	4	2	0,0150
14	PP-cipe-Q6w2V60	fina LL	6	2	0,0226
15	PP-cipe-Q10w2V60	fina LL	10	2	0,0376
	Snemanje poskusa: grobo mleta lešnikova lupina				
16	cipe-cog-Q4w0.25V60	groba LL	4	0,25	0,0427
17	cipe-cog-Q6w0.25V60	groba LL	6	0,25	0,0640
18	cipe-cog-Q10w0.25V60	groba LL	10	0,25	0,1067
19	cipe-cog-Q4w0.5V60	groba LL	4	0,5	0,0302
20	cipe-cog-Q6w0.5V60	groba LL	6	0,5	0,0452
21	cipe-cog-Q10w0.5V60	groba LL	10	0,5	0,0754
22	cipe-cog-Q4w1V60	groba LL	4	1	0,0213
23	cipe-cog-Q6w1V60	groba LL	6	1	0,0320
24	cipe-cog-Q10w1V60	groba LL	10	1	0,0533
25	cipe-cog-Q4w2V60	groba LL	4	2	0,0150
26	cipe-cog-Q6w2V60	groba LL	6	2	0,0226
27	cipe-cog-Q10w2V60	groba LL	10	2	0,0376
	Odvzem vzorcev** (+ snemanje)**: fino mleta lešnikova lupina				
28	samp-fLL-Q4w0.25V60	fina LL	4	0,25	0,0427
29	samp-fLL-Q6w0.25V60	fina LL	6	0,25	0,0640
30	samp-fLL-Q10w0.25V60	fina LL	10	0,25	0,1067
31	samp-fLL-Q4w0.5V60	fina LL	4	0,5	0,0302
32	samp-fLL-Q6w0.5V60	fina LL	6	0,5	0,0452
33	samp-fLL-Q10w0.5V60	fina LL	10	0,5	0,0754
34	samp-fLL-Q4w1V60	fina LL	4	1	0,0213
35	samp-fLL-Q6w1V60	fina LL	6	1	0,0320
36	samp-fLL-Q10w1V60	fina LL	10	1	0,0533
37	samp-fLL-Q4w2V60	fina LL	4	2	0,0150
38	samp-fLL-Q6w2V60	fina LL	6	2	0,0226
39	samp-fLL-Q10w2V60	fina LL	10	2	0,0376
	Odvzem vzorcev** (+ snemanje)**: grobo mleta lešnikova lupina				
40	samp-gLL-Q4w0.25V60	groba LL	4	0,25	0,0427
41	samp-gLL-Q6w0.25V60	groba LL	6	0,25	0,0640
42	samp-gLL-Q10w0.25V60	groba LL	10	0,25	0,1067
43	samp-gLL-Q4w0.5V60	groba LL	4	0,5	0,0302
44	samp-gLL-Q6w0.5V60	groba LL	6	0,5	0,0452
45	samp-gLL-Q10w0.5V60	groba LL	10	0,5	0,0754
46	samp-gLL-Q4w1V60	groba LL	4	1	0,0213
47	samp-gLL-Q6w1V60	groba LL	6	1	0,0320
48	samp-gLL-Q10w1V60	groba LL	10	1	0,0533
49	samp-gLL-Q4w2V60	groba LL	4	2	0,0150
50	samp-gLL-Q6w2V60	groba LL	6	2	0,0226
51	samp-gLL-Q10w2V60	groba LL	10	2	0,0376

	Snemanje poskusa: steklene kroglice, frakcija A				
52	GS_A-Q4w0.13V60	GS - A	4	0,13	0,0425
53	GS_A-Q6w0.13V60	GS - A	6	0,13	0,0638
54	GS_A-Q10w0.13V60	GS - A	10	0,13	0,1064
55	GS_A-Q4w0.26V60	GS - A	4	0,26	0,0301
56	GS_A-Q6w0.26V60	GS - A	6	0,26	0,0451
57	GS_A-Q10w0.26V60	GS - A	10	0,26	0,0752
58	GS_A-Q4w0.52V60	GS - A	4	0,52	0,0212
59	GS_A-Q6w0.52V60	GS - A	6	0,52	0,0319
60	GS_A-Q10w0.52V60	GS - A	10	0,52	0,0531
61	GS_A-Q4w1.04V60	GS - A	4	1,04	0,0151
62	GS_A-Q6w1.04V60	GS - A	6	1,04	0,0227
63	GS_A-Q10w1.04V60	GS - A	10	1,04	0,0379
	Snemanje poskusa: steklene kroglice, frakcija B				
64	GS_B-Q4w0.13V60	GS - B	4	0,13	0,0425
65	GS_B-Q6w0.13V60	GS - B	6	0,13	0,0638
66	GS_B-Q10w0.13V60	GS - B	10	0,13	0,1064
67	GS_B-Q4w0.26V60	GS - B	4	0,26	0,0301
68	GS_B-Q6w0.26V60	GS - B	6	0,26	0,0451
69	GS_B-Q10w0.26V60	GS - B	10	0,26	0,0752
70	GS_B-Q4w0.52V60	GS - B	4	0,52	0,0212
71	GS_B-Q6w0.52V60	GS - B	6	0,52	0,0319
72	GS_B-Q10w0.52V60	GS - B	10	0,52	0,0531
73	GS_B-Q4w1.04V60	GS - B	4	1,04	0,0151
74	GS_B-Q6w1.04V60	GS - B	6	1,04	0,0227
75	GS_B-Q10w1.04V60	GS - B	10	1,04	0,0379
	Snemanje poskusa: steklene kroglice, frakcija C				
76	GS_C-Q4w0.13V60	GS - C	4	0,13	0,0425
77	GS_C-Q6w0.13V60	GS - C	6	0,13	0,0638
78	GS_C-Q10w0.13V60	GS - C	10	0,13	0,1064
79	GS_C-Q4w0.26V60	GS - C	4	0,26	0,0301
80	GS_C-Q6w0.26V60	GS - C	6	0,26	0,0451
81	GS_C-Q10w0.26V60	GS - C	10	0,26	0,0752
82	GS_C-Q4w0.52V60	GS - C	4	0,52	0,0212
83	GS_C-Q6w0.52V60	GS - C	6	0,52	0,0319
84	GS_C-Q10w0.52V60	GS - C	10	0,52	0,0531
85	GS_C-Q4w1.04V60	GS - C	4	1,04	0,0151
86	GS_C-Q6w1.04V60	GS - C	6	1,04	0,0227
87	GS_C-Q10w1.04V60	GS - C	10	1,04	0,0379
	Odvzem vzorcev** (+ snemanje)**: steklene kroglice, frakcija A				
88	GS_A-Q4w0.13V60	GS - A	4	0,13	0,0425
89	GS_A-Q6w0.13V60	GS - A	6	0,13	0,0638
90	GS_A-Q10w0.13V60	GS - A	10	0,13	0,1064
91	GS_A-Q4w0.26V60	GS - A	4	0,26	0,0301
92	GS_A-Q6w0.26V60	GS - A	6	0,26	0,0451
93	GS_A-Q10w0.26V60	GS - A	10	0,26	0,0752
94	GS_A-Q4w0.52V60	GS - A	4	0,52	0,0212
95	GS_A-Q6w0.52V60	GS - A	6	0,52	0,0319
96	GS_A-Q10w0.52V60	GS - A	10	0,52	0,0531
97	GS_A-Q4w1.04V60	GS - A	4	1,04	0,0151
98	GS_A-Q6w1.04V60	GS - A	6	1,04	0,0227
99	GS_A-Q10w1.04V60	GS - A	10	1,04	0,0379
	Odvzem vzorcev** (+ snemanje)**: steklene kroglice, frakcija B				
100	GS_B-Q4w0.13V60	GS - B	4	0,13	0,0425
101	GS_B-Q6w0.13V60	GS - B	6	0,13	0,0638
102	GS_B-Q10w0.13V60	GS - B	10	0,13	0,1064
103	GS_B-Q4w0.26V60	GS - B	4	0,26	0,0301
104	GS_B-Q6w0.26V60	GS - B	6	0,26	0,0451
105	GS_B-Q10w0.26V60	GS - B	10	0,26	0,0752
106	GS_B-Q4w0.52V60	GS - B	4	0,52	0,0212
107	GS_B-Q6w0.52V60	GS - B	6	0,52	0,0319
108	GS_B-Q10w0.52V60	GS - B	10	0,52	0,0531
109	GS_B-Q4w1.04V60	GS - B	4	1,04	0,0151
110	GS_B-Q6w1.04V60	GS - B	6	1,04	0,0227
111	GS_B-Q10w1.04V60	GS - B	10	1,04	0,0379
	Odvzem vzorcev** (+ snemanje)**: steklene kroglice, frakcija C				
112	GS_C-Q4w0.13V60	GS - C	4	0,13	0,0425
113	GS_C-Q6w0.13V60	GS - C	6	0,13	0,0638
114	GS_C-Q10w0.13V60	GS - C	10	0,13	0,1064
115	GS_C-Q4w0.26V60	GS - C	4	0,26	0,0301
116	GS_C-Q6w0.26V60	GS - C	6	0,26	0,0451
117	GS_C-Q10w0.26V60	GS - C	10	0,26	0,0752
118	GS_C-Q4w0.52V60	GS - C	4	0,52	0,0212
119	GS_C-Q6w0.52V60	GS - C	6	0,52	0,0319
120	GS_C-Q10w0.52V60	GS - C	10	0,52	0,0531
121	GS_C-Q4w1.04V60	GS - C	4	1,04	0,0151
122	GS_C-Q6w1.04V60	GS - C	6	1,04	0,0227
123	GS_C-Q10w1.04V60	GS - C	10	1,04	0,0379

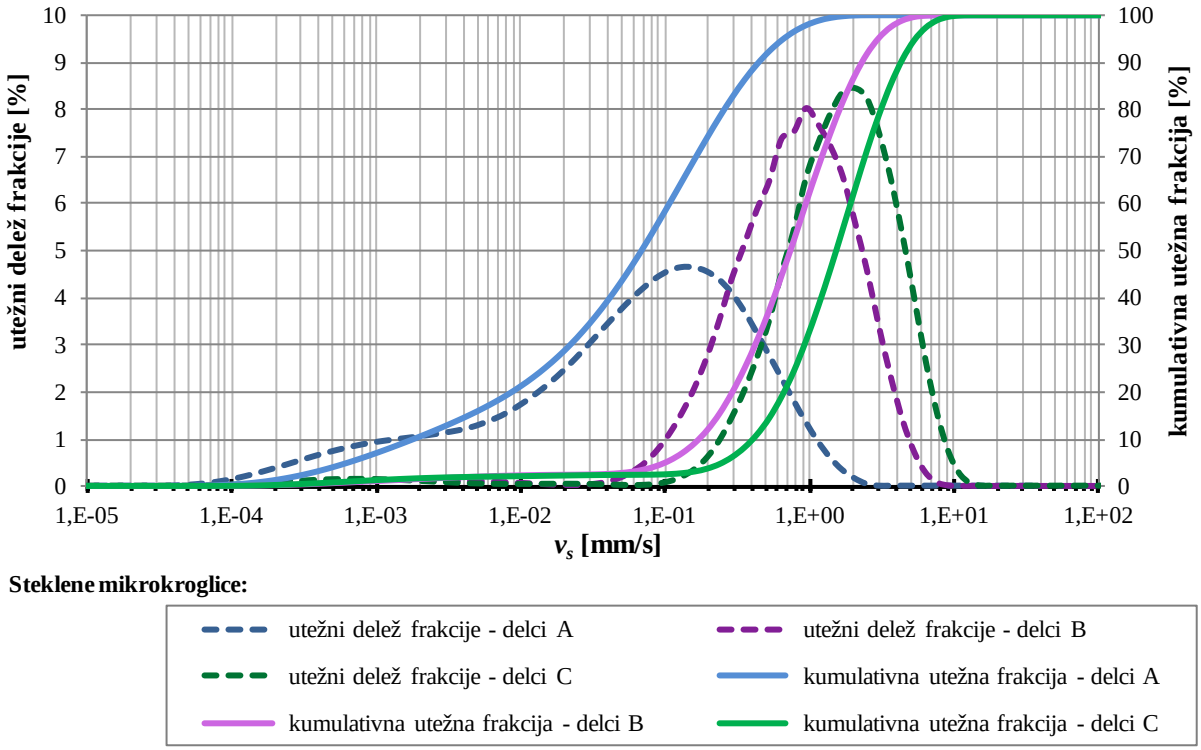
PRILOGA C: RAČUNSKE HITROSTI USEDANJA MODELNIH DELCEV

APPENDIX C: CALCULATED VALUES OF THE MODEL PARTICLES' SETTLING VELOCITIES



Grafikon C.1: Porazdelitev računskih hitrosti diskretnega usedanja delcev mlete lešnikove lupine

Graph C.1: Distribution of calculated values of discrete settling velocities of ground hazelnut shell particles

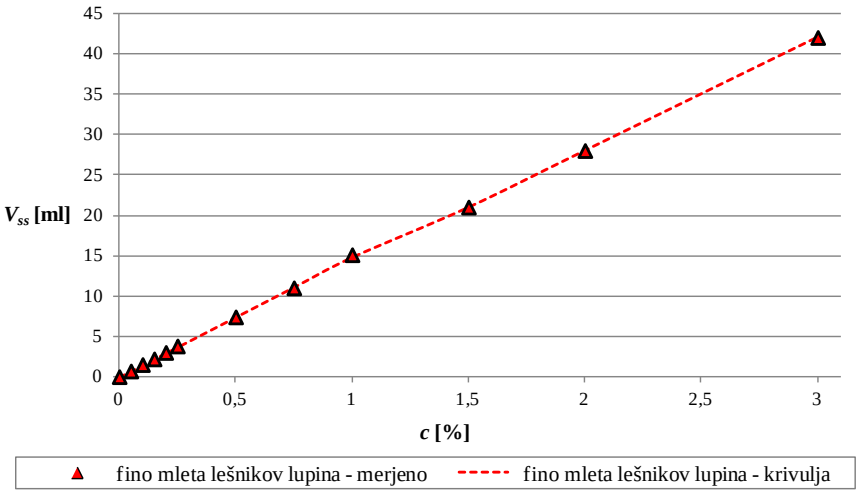


Grafikon C.2: Porazdelitev računskih hitrosti diskretnega usedanja steklenih delcev

Graph C.2: Distribution of calculated values of discrete settling velocities of glass particles

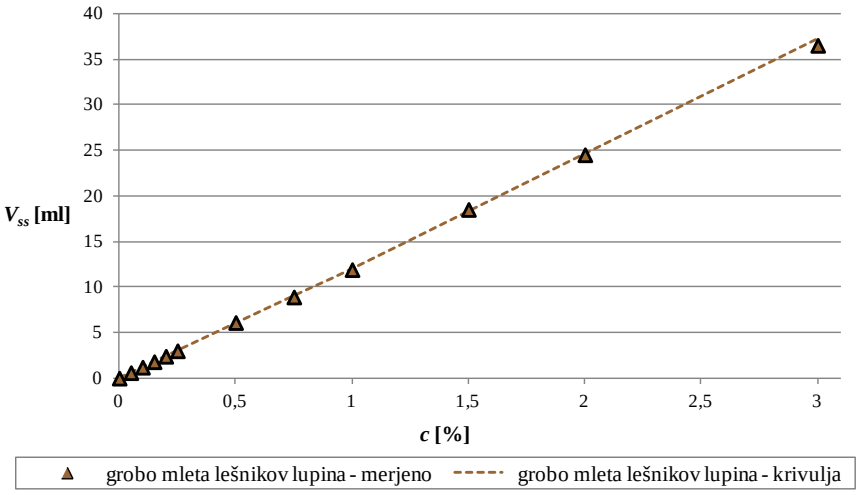
PRILOGA D: KALIBRACIJSKE KRIVULJE ZA ANALIZE VSEBNOSTI USEDLJIVIH DELCEV

APPENDIX D: CALIBRATION CURVES FOR SETTLEABLE SOLIDS ANALYSIS



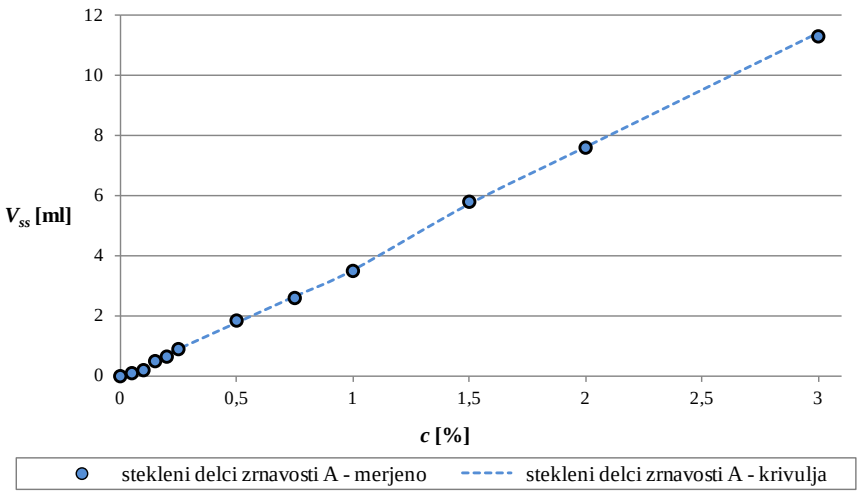
Grafikon D.1: Kalibracijska krivulja fino mlete lešnikove lupine

Graph D.1: Calibration curve of fine ground hazelnut shell



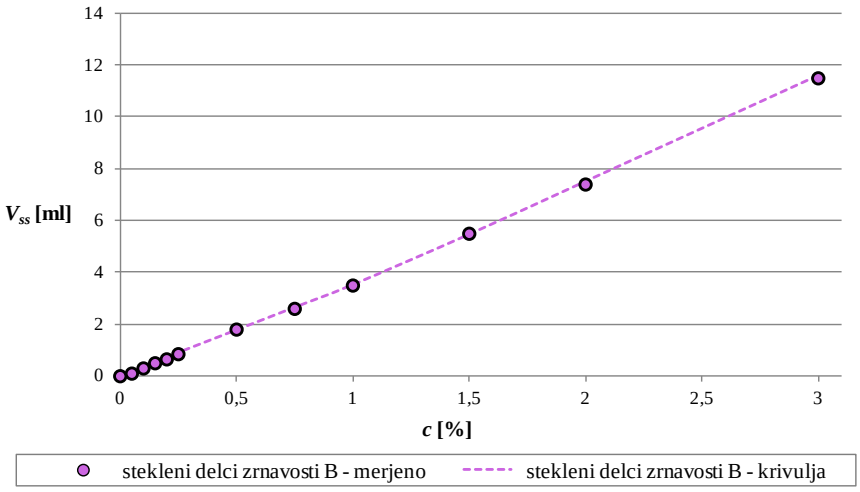
Grafikon D.2: Kalibracijska krivulja grobo mlete lešnikove lupine

Graph D.2: Calibration curve of coarse ground hazelnut shell



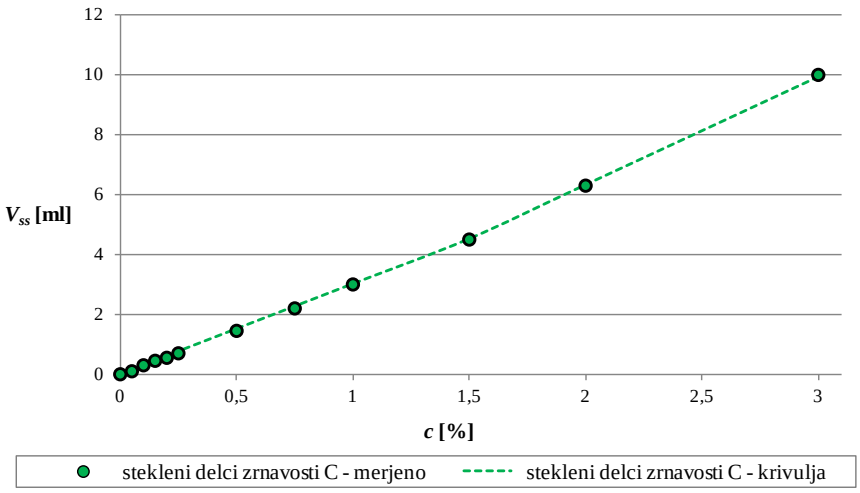
Grafikon D.3: Kalibracijska krivulja steklenih delcev zrnavosti A

Graph D.3: Calibration curve of A granulation glass particles



Grafikon D.4: Kalibracijska krivulja steklenih delcev zrnavosti B

Graph D.4: Calibration curve of B granulation glass particles



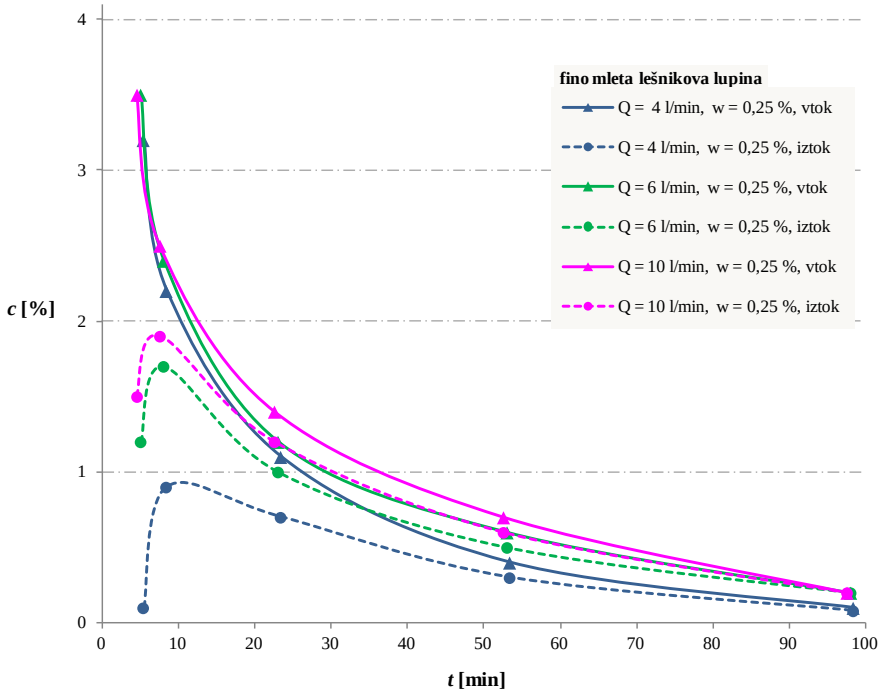
Grafikon D.5: Kalibracijska krivulja steklenih delcev zrnavosti C

Graph D.5: Calibration curve of C granulation glass particles

PRILOGA E: GRAFIČNI PRIKAZ REZULTATOV VZORČENJA

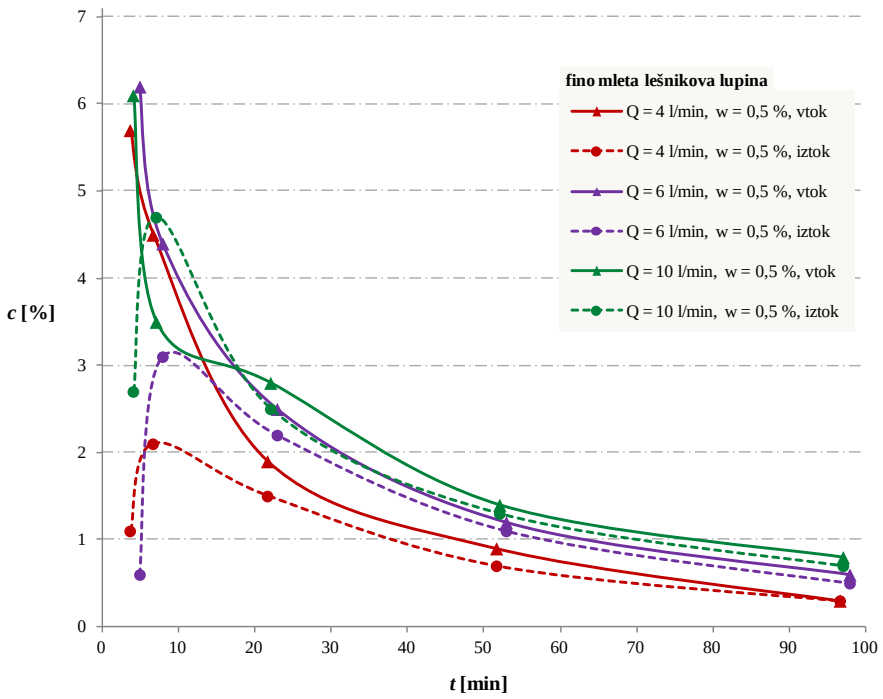
APPENDIX E: GRAPHICAL DEMONSTRATION OF SAMPLING RESULTS

Fino mleta lešnikova lupina



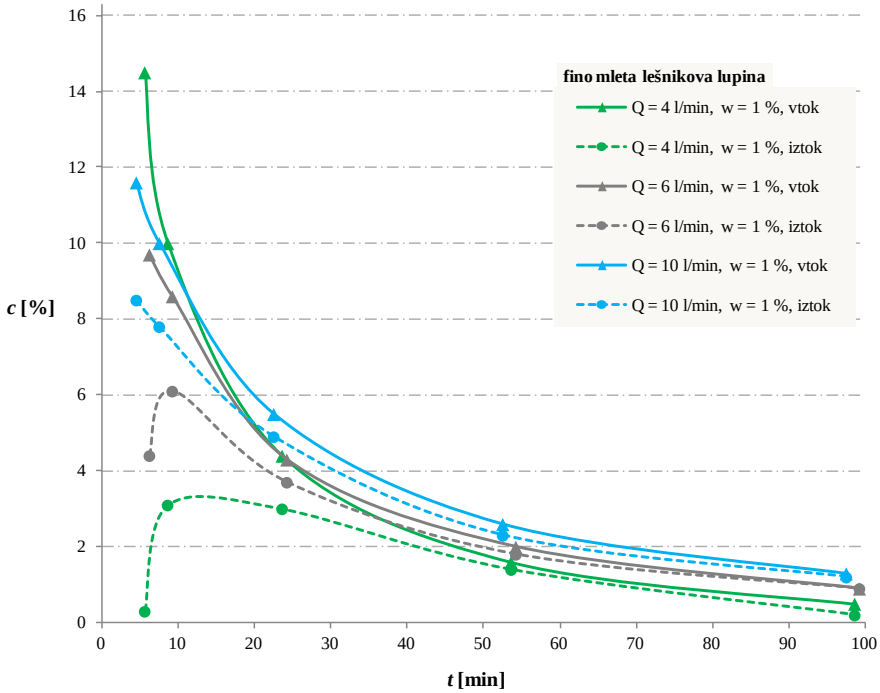
Grafikon E.1: Koncentracije pri poskusih s fino mleto lešnikovo lupino z 0,25 % nazivno koncentracijo

Graph E.1: Concentrations at experiments with fine ground hazelnut shell of 0.25 % nominal concentration



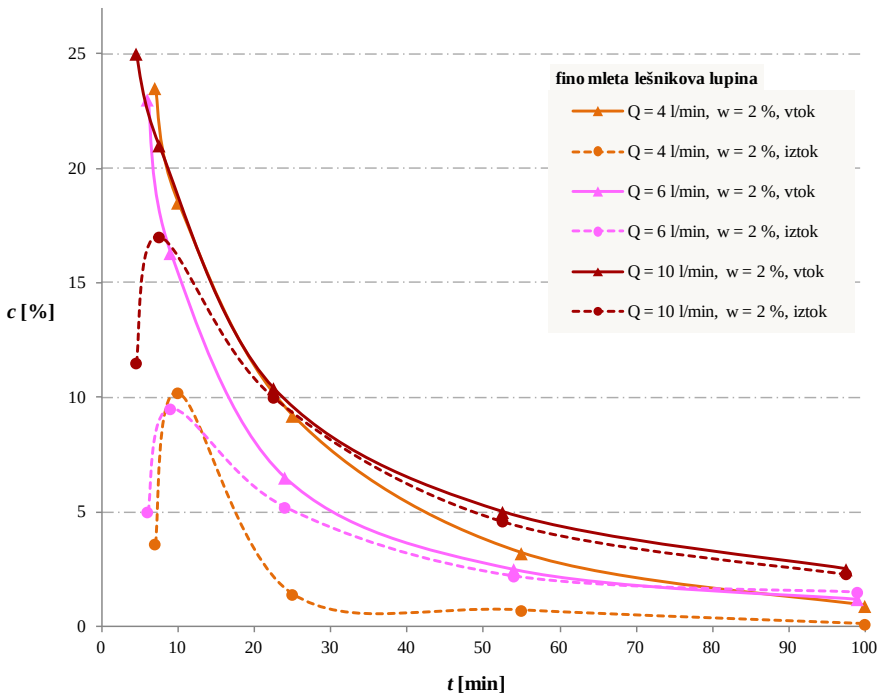
Grafikon E.2: Koncentracije pri poskusih s fino mleto lešnikovo lupino z 0,5 % nazivno koncentracijo

Graph E.2: Concentrations at experiments with fine ground hazelnut shell of 0.5 % nominal concentration



Grafikon E.3: Koncentracije pri poskusih s fino mleto lešnikovo lupino z 1,0 % nazivno koncentracijo

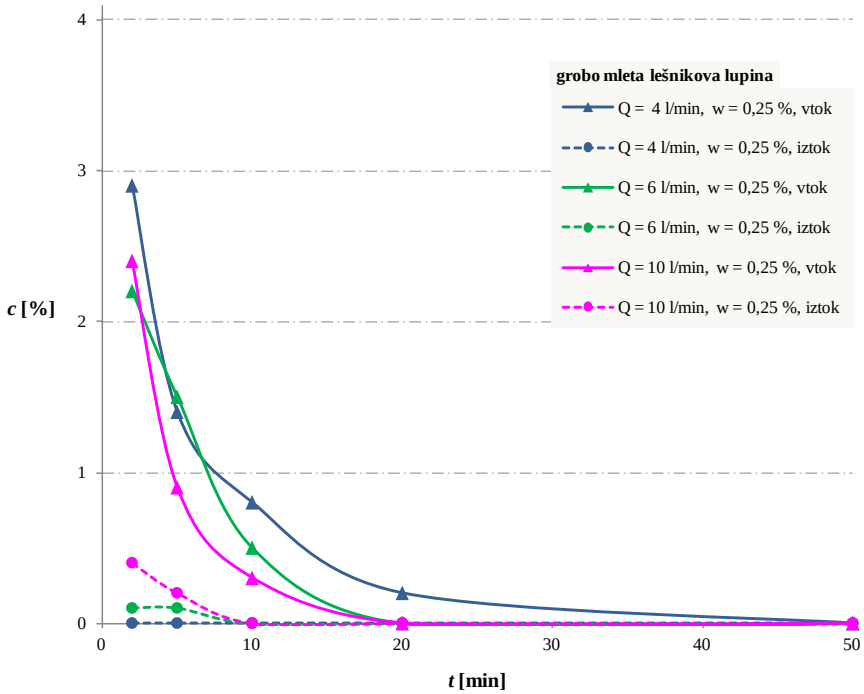
Graph E.3: Concentrations at experiments with fine ground hazelnut shell of 1.0 % nominal concentration



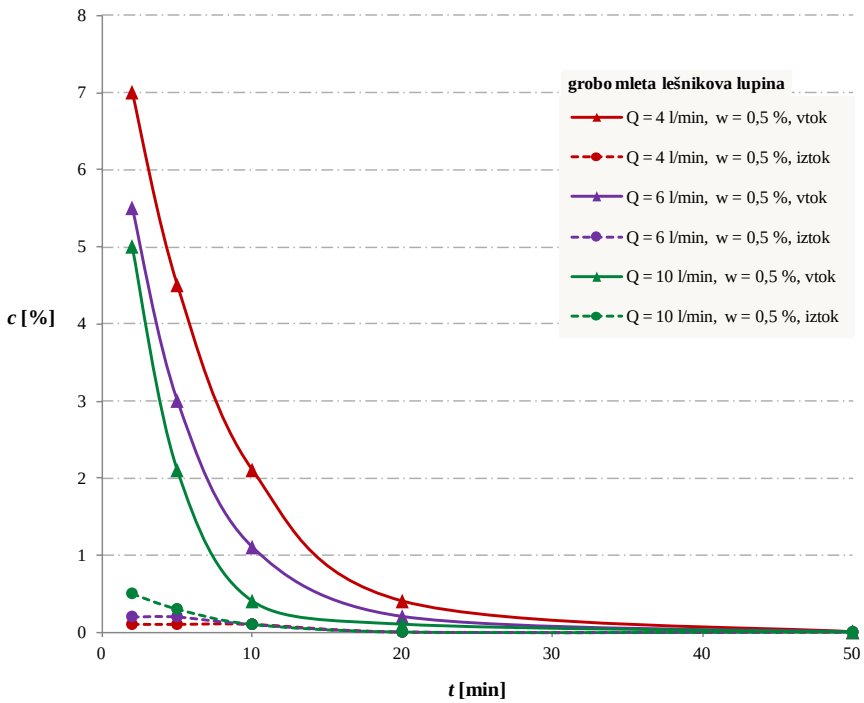
Grafikon E.4: Koncentracije pri poskusih s fino mleto lešnikovo lupino z 2,0 % nazivno koncentracijo

Graph E.4: Concentrations at experiments with fine ground hazelnut shell of 2.0 % nominal concentration

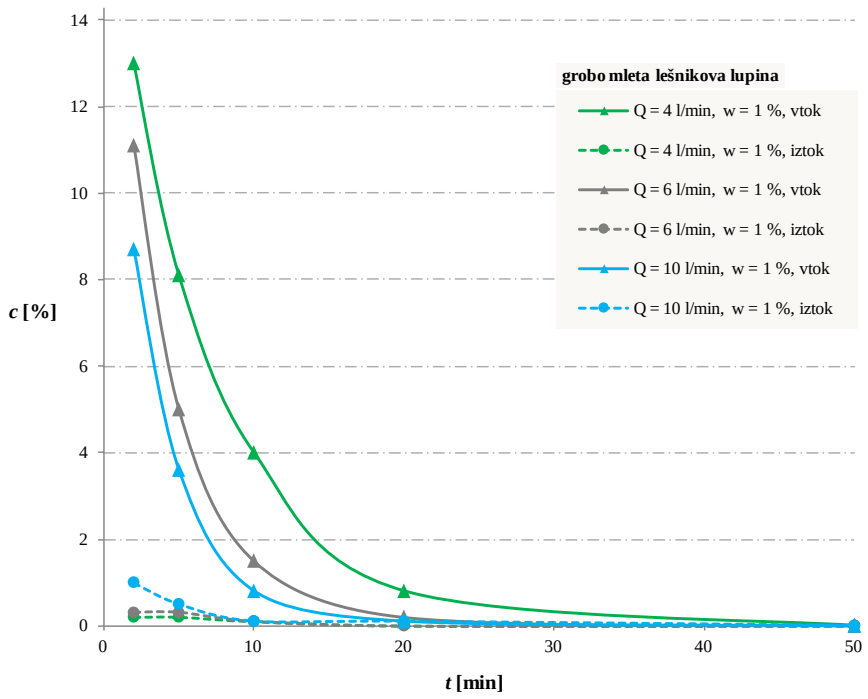
Grobo mleta lešnikova lupina



Grafikon E.5: Koncentracije pri poskusih z grobo mleto lešnikovo lupino z 0,25 % nazivno koncentracijo
Graph E.5: Concentrations at experiments with coarse ground hazelnut shell of 0.25 % nominal concentration

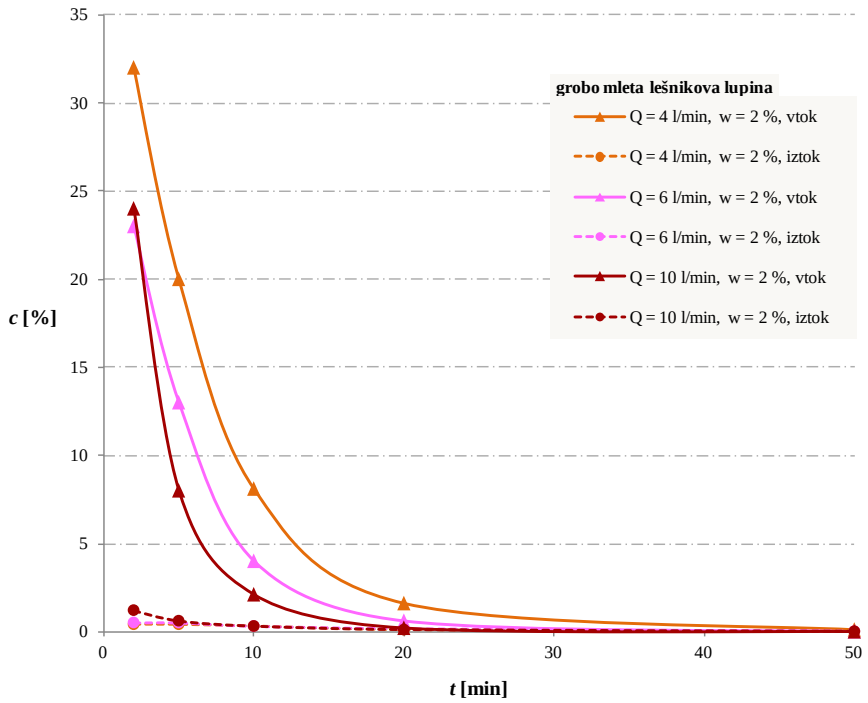


Grafikon E.6: Koncentracije pri poskusih z grobo mleto lešnikovo lupino z 0,5 % nazivno koncentracijo
Graph E.6: Concentrations at experiments with coarse ground hazelnut shell of 0.5 % nominal concentration



Grafikon E.7: Koncentracije pri poskusih z grobo mleto lešnikovo lupino z 1,0 % nazivno koncentracijo

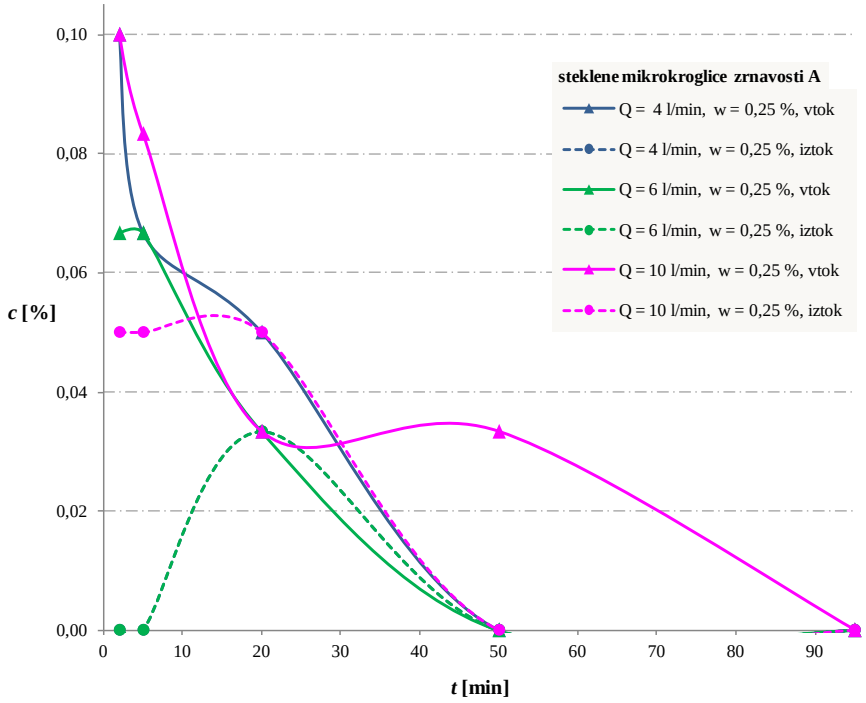
Graph E.7: Concentrations at experiments with coarse ground hazelnut shell of 1.0 % nominal concentration



Grafikon E.8: Koncentracije pri poskusih z grobo mleto lešnikovo lupino z 2,0 % nazivno koncentracijo

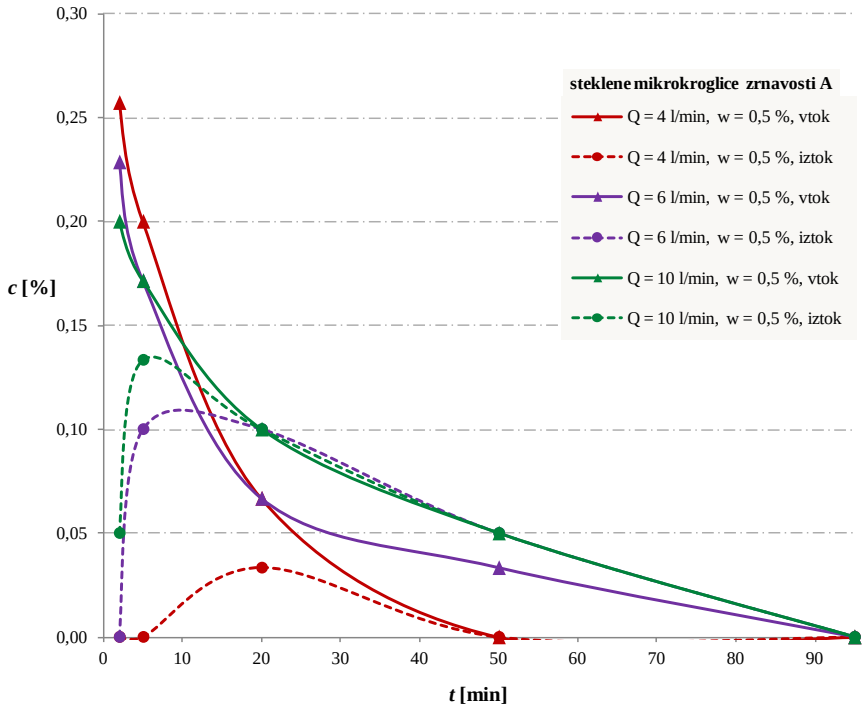
Graph E.8: Concentrations at experiments with coarse ground hazelnut shell of 2.0 % nominal concentration

Steklene mikrokroglice – zrnavost A



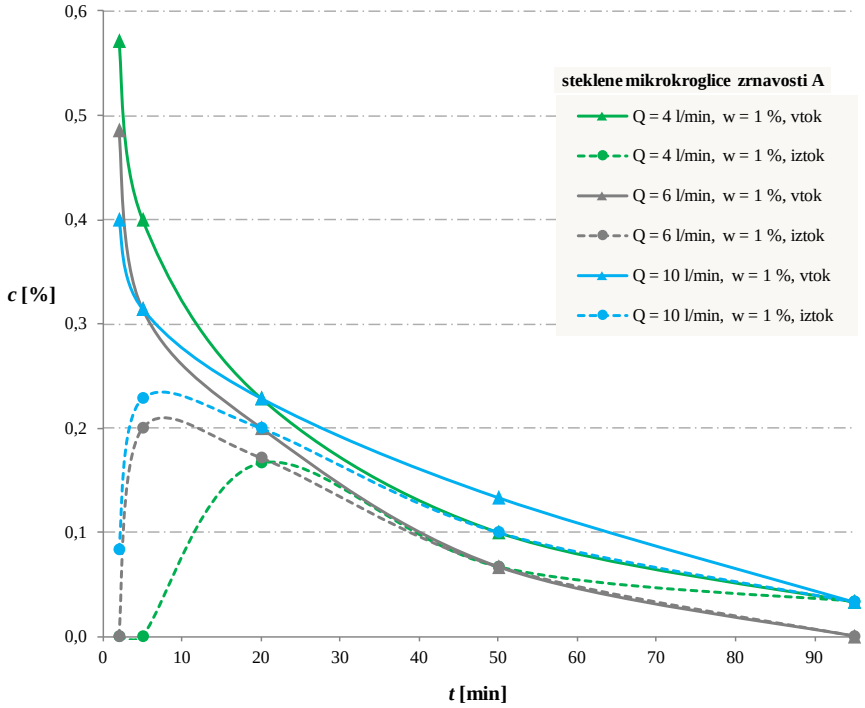
Grafikon E.9: Koncentracije pri poskusih s steklenimi zrnci granulacije A z 0,25 % nazivno koncentracijo

Graph E.9: Concentrations at experiments with A granulation glass microbeads of 0.25 % nominal concentration



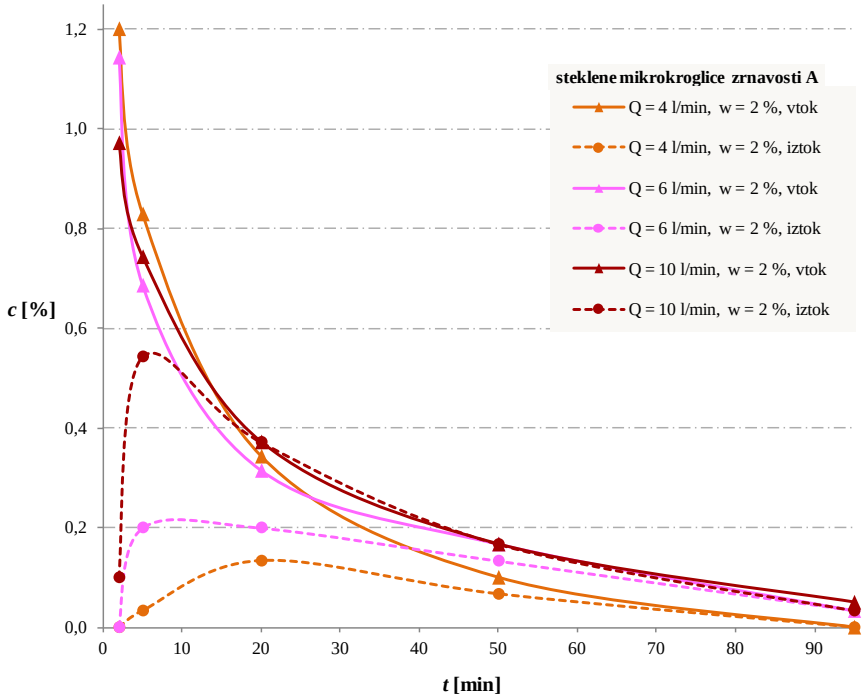
Grafikon E.10: Koncentracije pri poskusih s steklenimi zrnci granulacije A z 0,5 % nazivno koncentracijo

Graph E.10: Concentrations at experiments with A granulation glass microbeads of 0.5 % nominal concentration



Grafikon E.11: Koncentracije pri poskusih s steklenimi zrnci granulacije A z 1,0 % nazivno koncentracijo

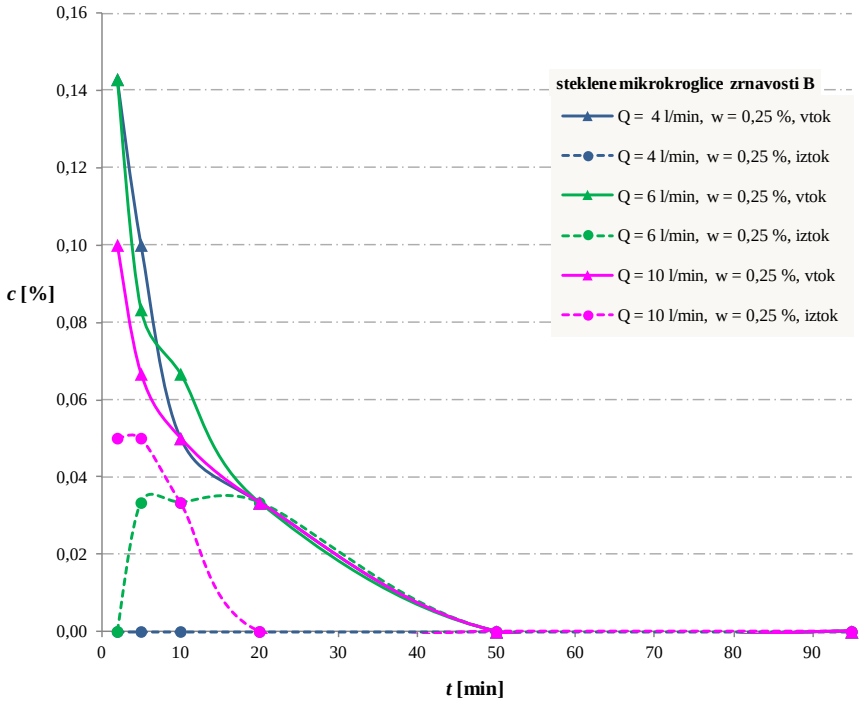
Graph E.11: Concentrations at experiments with A granulation glass microbeads of 1.0 % nominal concentration



Grafikon E.12: Koncentracije pri poskusih s steklenimi zrnci granulacije A z 2,0 % nazivno koncentracijo

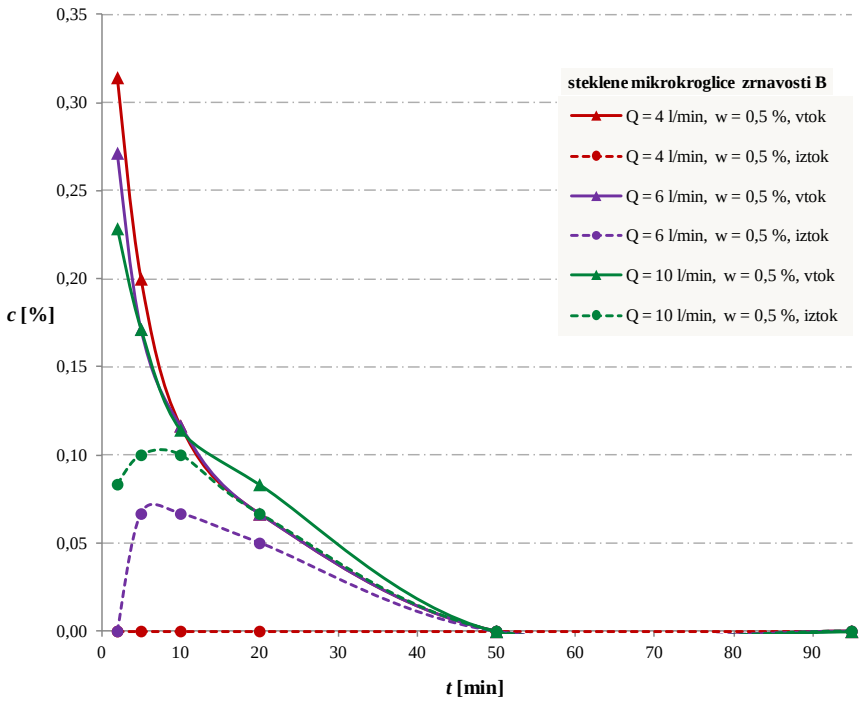
Graph E.12: Concentrations at experiments with A granulation glass microbeads of 2.0 % nominal concentration

Steklene mikrokroglice – zrnavost B



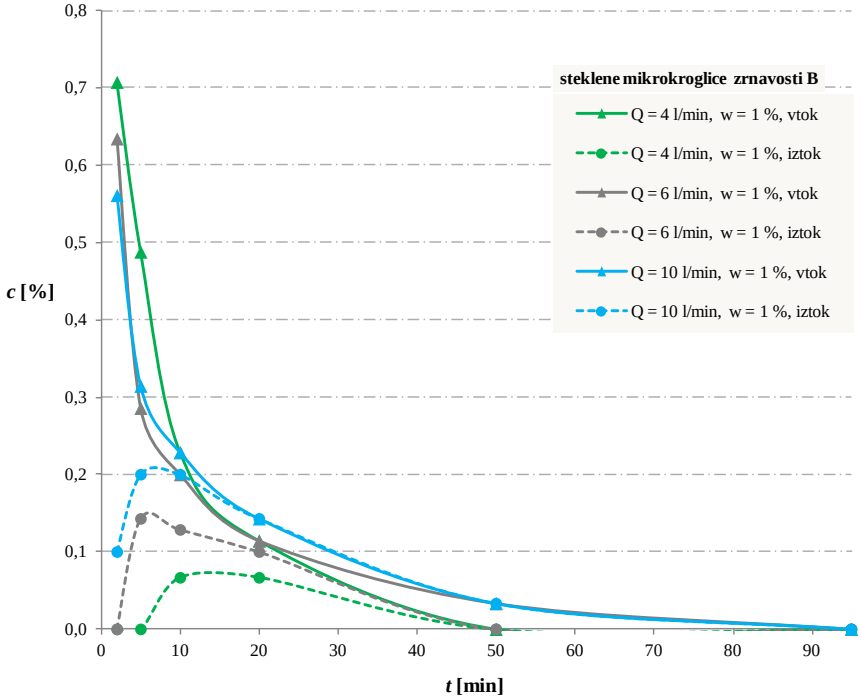
Grafikon E.13: Koncentracije pri poskusih s steklenimi zrnci granulacije B z 0,25 % nazivno koncentracijo

Graph E.13: Concentrations at experiments with B granulation glass microbeads of 0.25 % nominal concentration



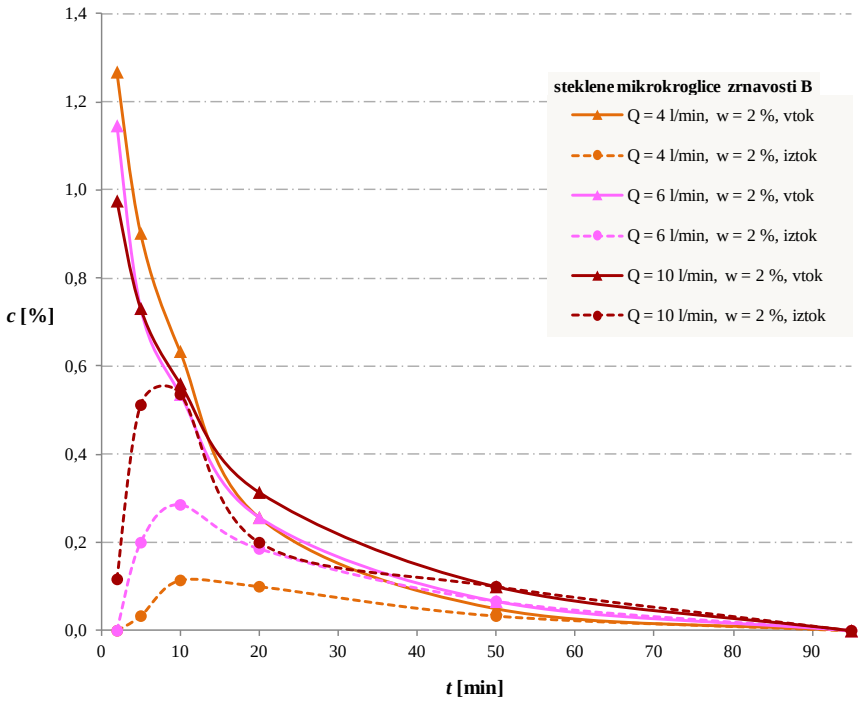
Grafikon E.14: Koncentracije pri poskusih s steklenimi zrnci granulacije B z 0,5 % nazivno koncentracijo

Graph E.14: Concentrations at experiments with B granulation glass microbeads of 0.5 % nominal concentration



Grafikon E.15: Koncentracije pri poskusih s steklenimi zrnci granulacije B z 1,0 % nazivno koncentracijo

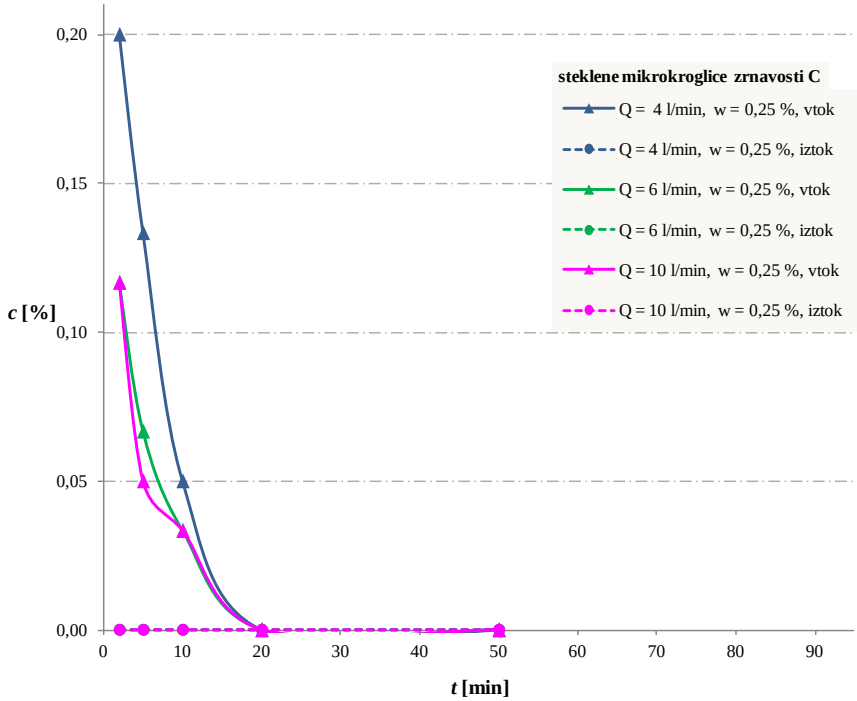
Graph E.15: Concentrations at experiments with B granulation glass microbeads of 1.0 % nominal concentration



Grafikon E.16: Koncentracije pri poskusih s steklenimi zrnci granulacije B z 2,0 % nazivno koncentracijo

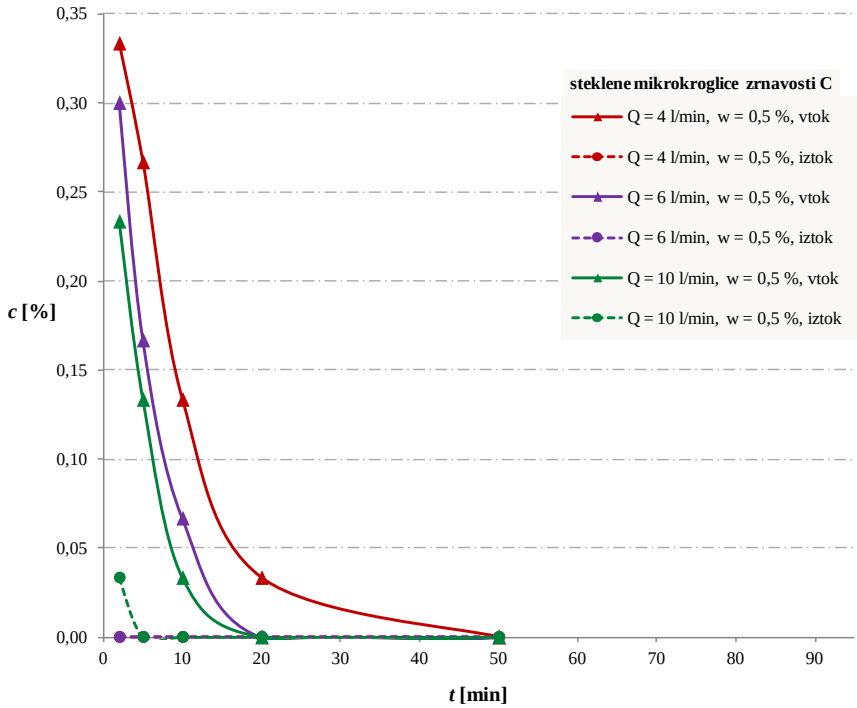
Graph E.16: Concentrations at experiments with B granulation glass microbeads of 2.0 % nominal concentration

Steklene mikrokroglice – zrnavost C



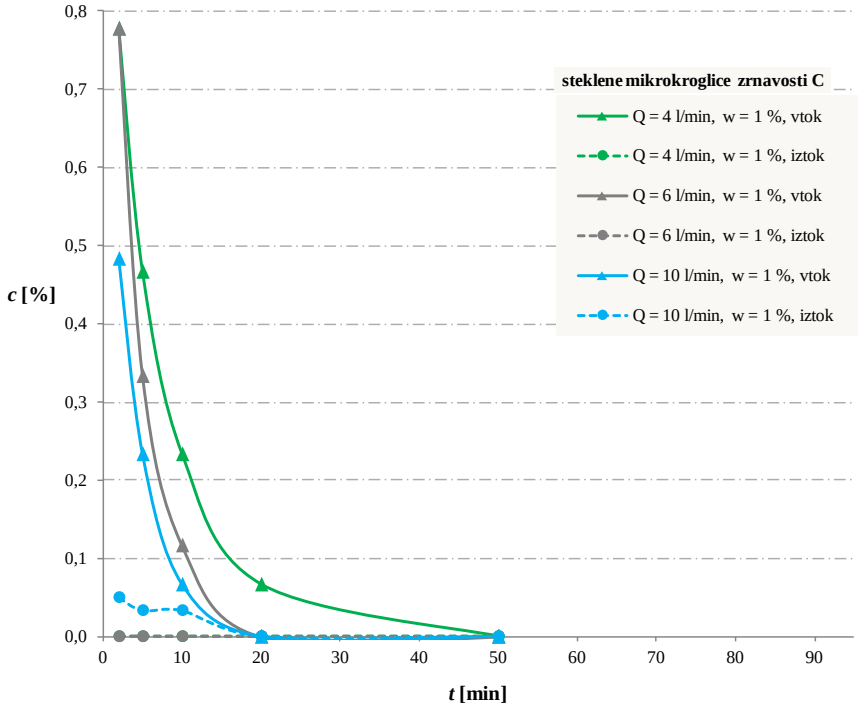
Grafikon E.17: Koncentracije pri poskusih s steklenimi zrnci granulacije C z 0,25 % nazivno koncentracijo

Graph E.17: Concentrations at experiments with C granulation glass microbeads of 0.25 % nominal concentration



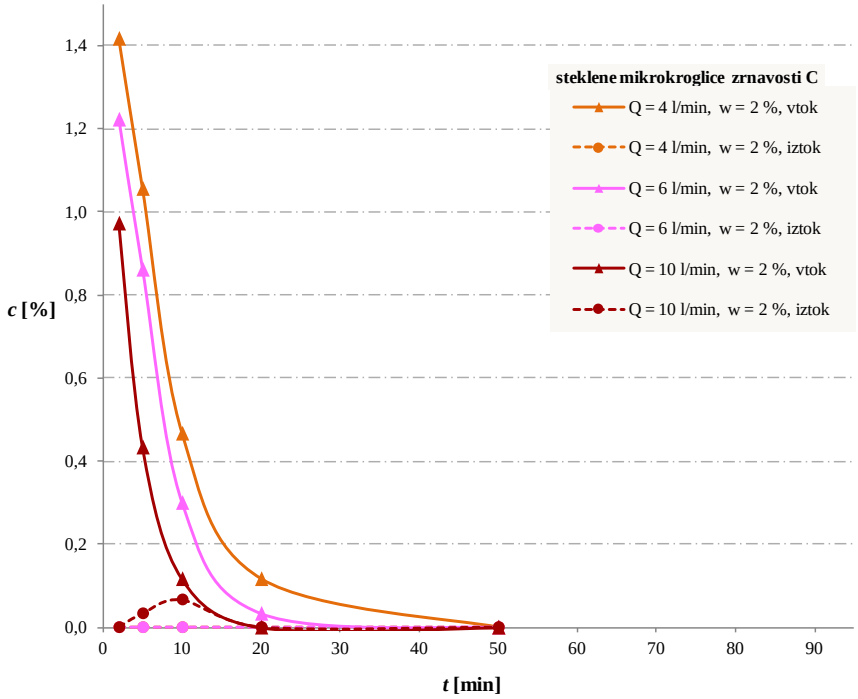
Grafikon E.18: Koncentracije pri poskusih s steklenimi zrnci granulacije C z 0,5 % nazivno koncentracijo

Graph E.18: Concentrations at experiments with C granulation glass microbeads of 0.5 % nominal concentration



Grafikon E.19: Koncentracije pri poskusih s steklenimi zrnci granulacije C z 1,0 % nazivno koncentracijo

Graph E.19: Concentrations at experiments with C granulation glass microbeads of 1.0 % nominal concentration



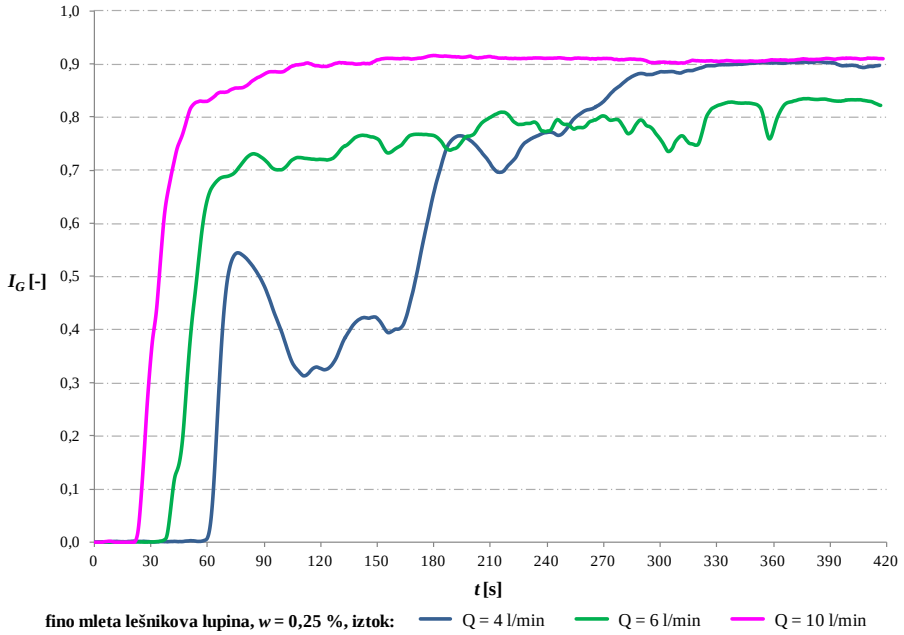
Grafikon E.20: Koncentracije pri poskusih s steklenimi zrnci granulacije C z 2,0 % nazivno koncentracijo

Graph E.20: Concentrations at experiments with C granulation glass microbeads of 2.0 % nominal concentration

PRILOGA F: FOTOGRAMETRIČNO DOLOČEN INDIKATOR KONCENTRACIJE IZTOKA

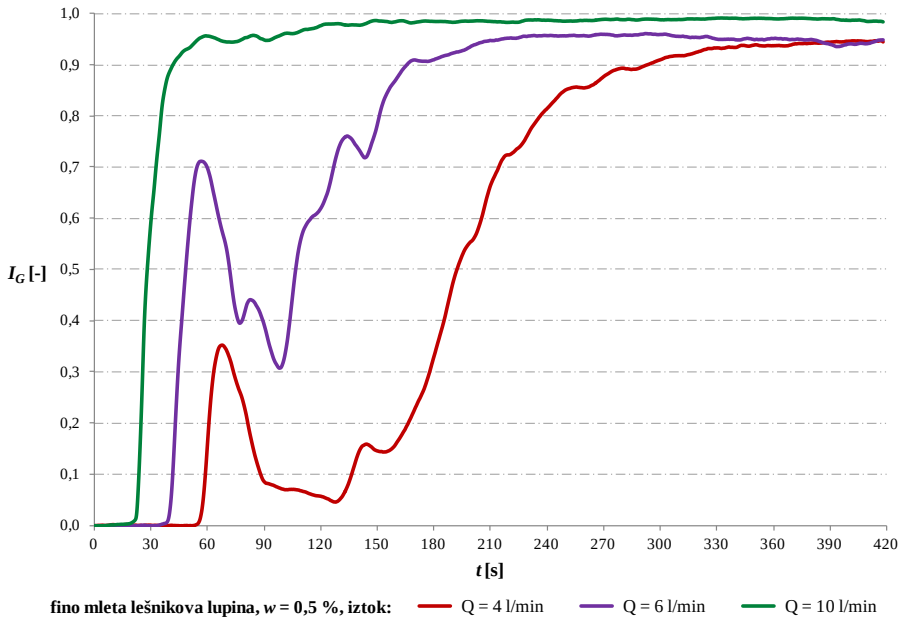
APPENDIX F: PHOTOGRAMETICALLY DEFINED INDICATOR OF CONCENTRATION OF THE EFFLUENT

Fino mleta lešnikova lupina



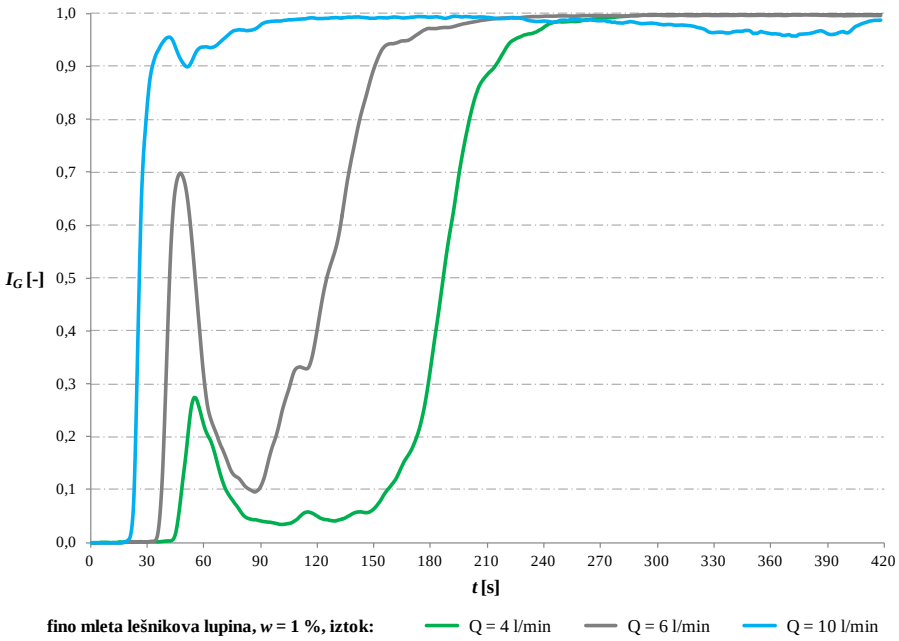
Grafikon F.1: Časovni potek indikatorja koncentracije iztoka; poskusi s fino mleto lešnikovo lupino z 0,25 % nazivno koncentracijo

Graph F.1: Time series of the indicator of concentration of the effluent; experiments with fine ground hazelnut shell of 0.25 % nominal concentration



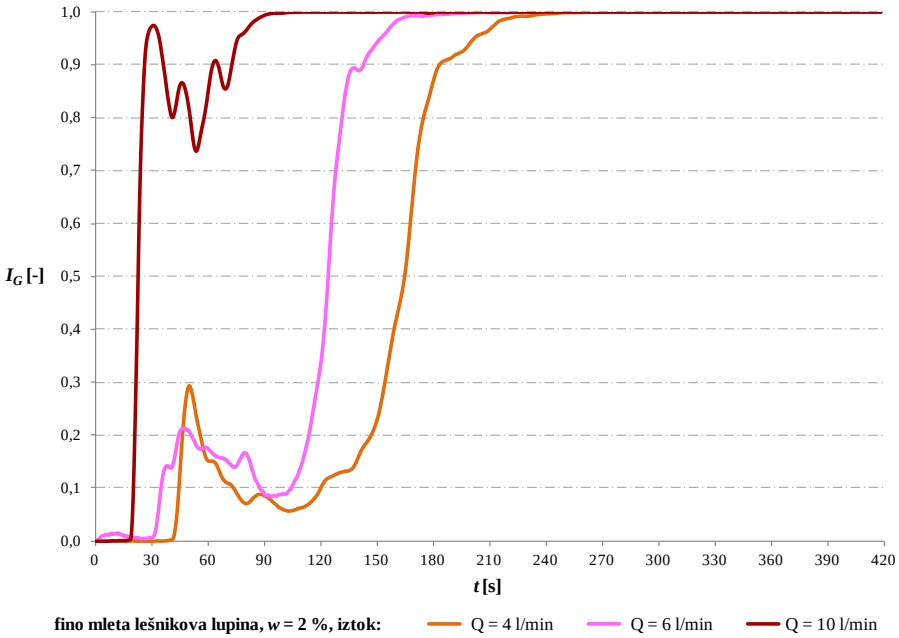
Grafikon F.2: Časovni potek indikatorja koncentracije iztoka; poskusi s fino mleto lešnikovo lupino z 0,5 % nazivno koncentracijo

Graph F.2: Time series of the indicator of concentration of the effluent; experiments with fine ground hazelnut shell of 0.5 % nominal concentration



Grafikon F.3: Časovni potek indikatorja koncentracije iztoka; poskusi s fino mleto lešnikovo lupino z 1,0 % nazivno koncentracijo

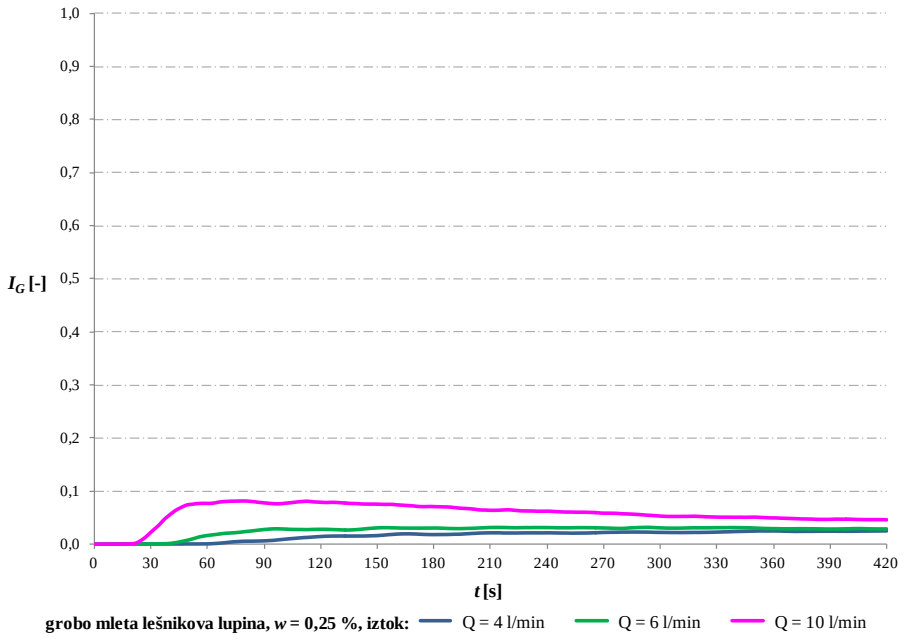
Graph F.3: Time series of the indicator of concentration of the effluent; experiments with fine ground hazelnut shell of 1.0 % nominal concentration



Grafikon F.4: Časovni potek indikatorja koncentracije iztoka; poskusi s fino mleto lešnikovo lupino z 2,0 % nazivno koncentracijo

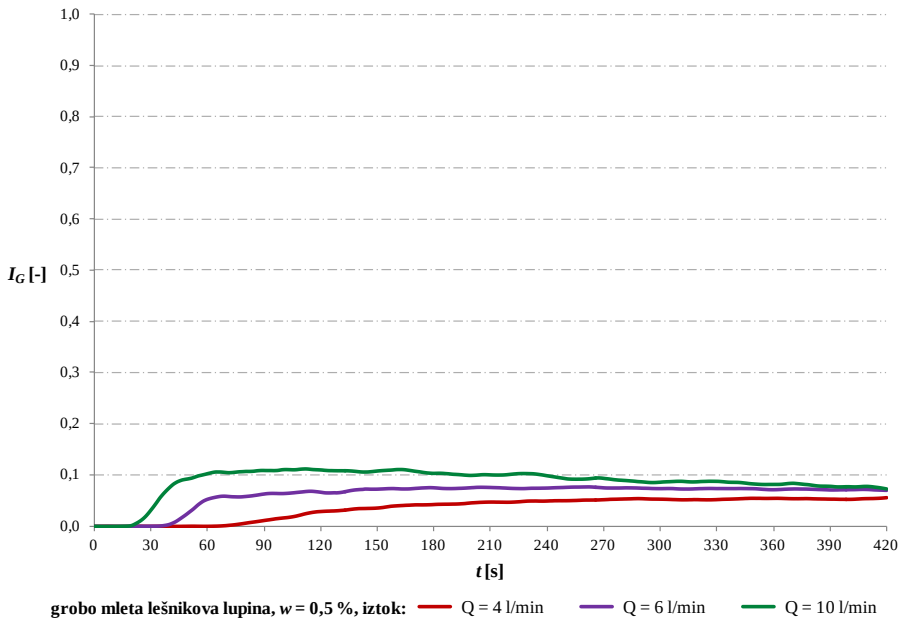
Graph F.4: Time series of the indicator of concentration of the effluent; experiments with fine ground hazelnut shell of 2.0 % nominal concentration

Grobo mleta lešnikova lupina



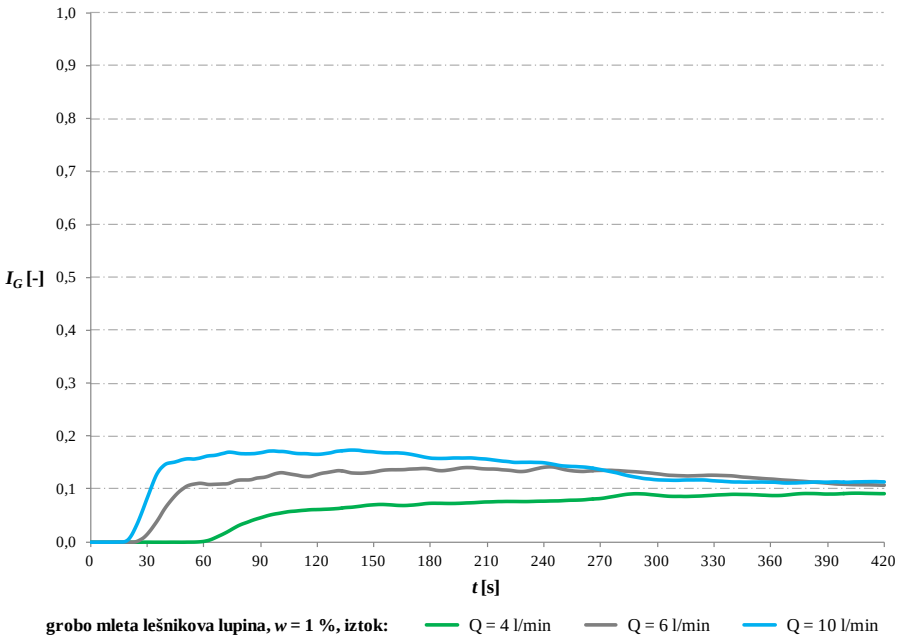
Grafikon F.5: Časovni potek indikatorja koncentracije iztoka; poskusi z grobo mleto lešnikovo lupino z 0,25 % nazivno koncentracijo

Graph F.5: Time series of the indicator of concentration of the effluent; experiments with coarse ground hazelnut shell of 0.25 % nominal concentration



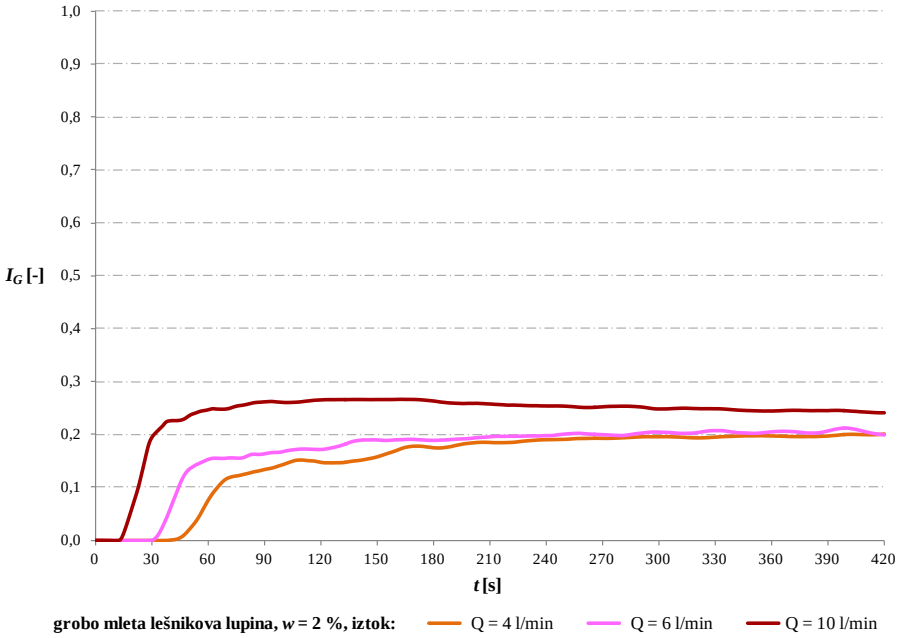
Grafikon F.6: Časovni potek indikatorja koncentracije iztoka; poskusi z grobo mleto lešnikovo lupino z 0,5 % nazivno koncentracijo

Graph F.6: Time series of the indicator of concentration of the effluent; experiments with coarse ground hazelnut shell of 0.5 % nominal concentration



Grafikon F.7: Časovni potek indikatorja koncentracije iztoka; poskusi z grobo mleto lešnikovo lupino z 1,0 % nazivno koncentracijo

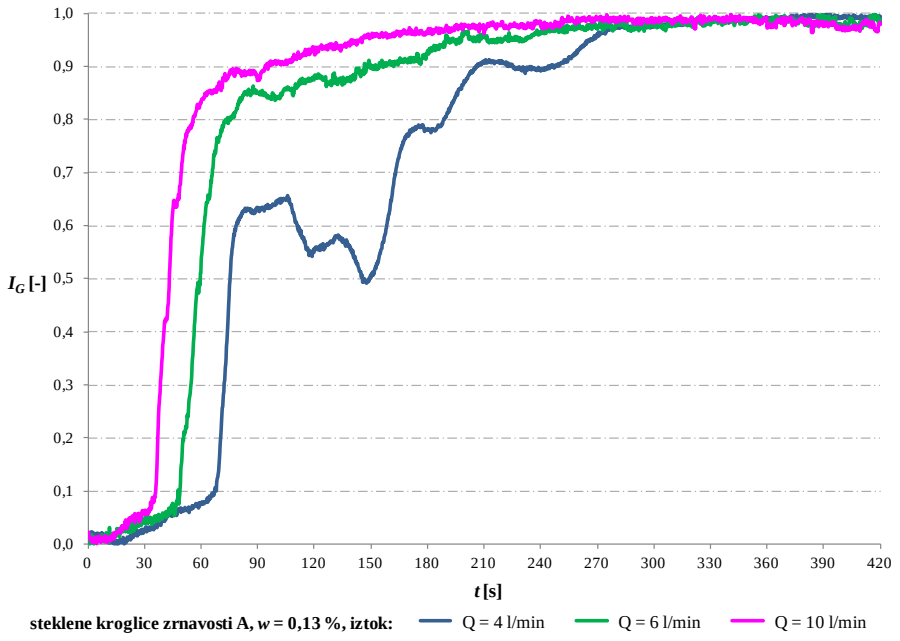
Graph F.7: Time series of the indicator of concentration of the effluent; experiments with coarse ground hazelnut shell of 1.0 % nominal concentration



Grafikon F.8: Časovni potek indikatorja koncentracije iztoka; poskusi z grobo mleto lešnikovo lupino z 2,0 % nazivno koncentracijo

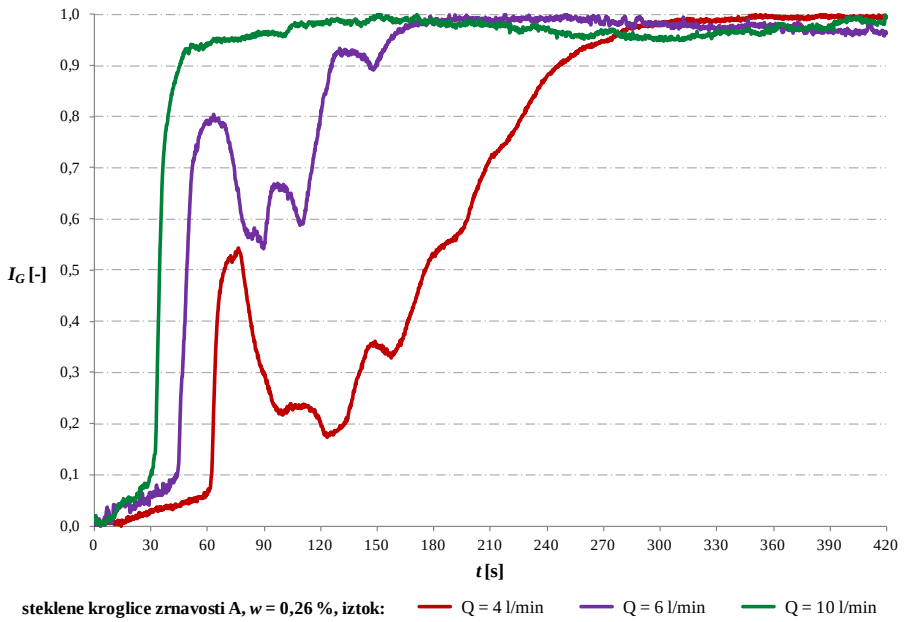
Graph F.8: Time series of the indicator of concentration of the effluent; experiments with coarse ground hazelnut shell of 2.0 % nominal concentration

Steklene mikrokroglice – zrnavost A



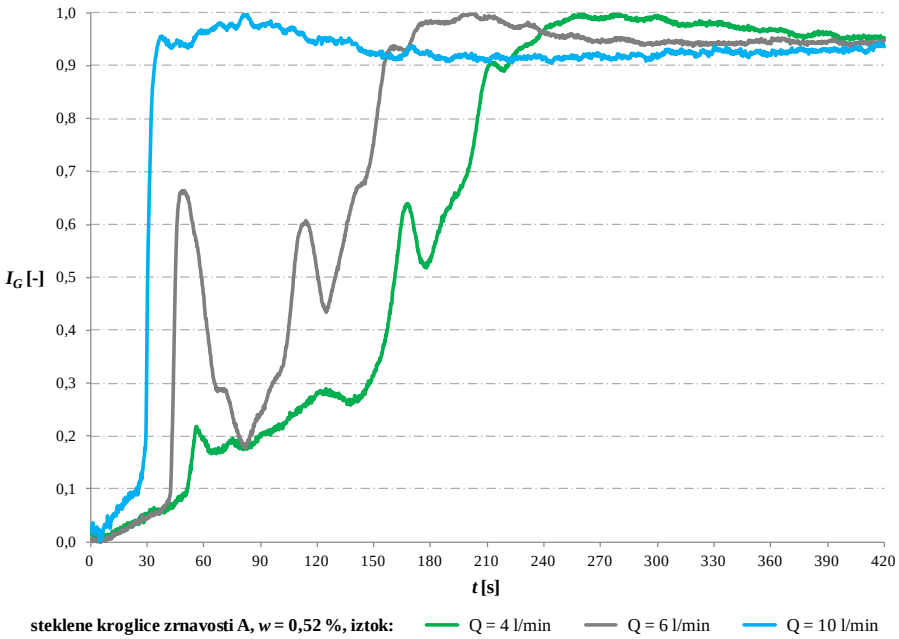
Grafikon F.9: Časovni potek indikatorja koncentracije iztoka; poskusi s steklenimi delci zrnavosti A z 0,13 % nazivno koncentracijo

Graph F.9: Time series of the indicator of concentration of the effluent; experiments with A granulation glass particles of 0.13 % nominal concentration



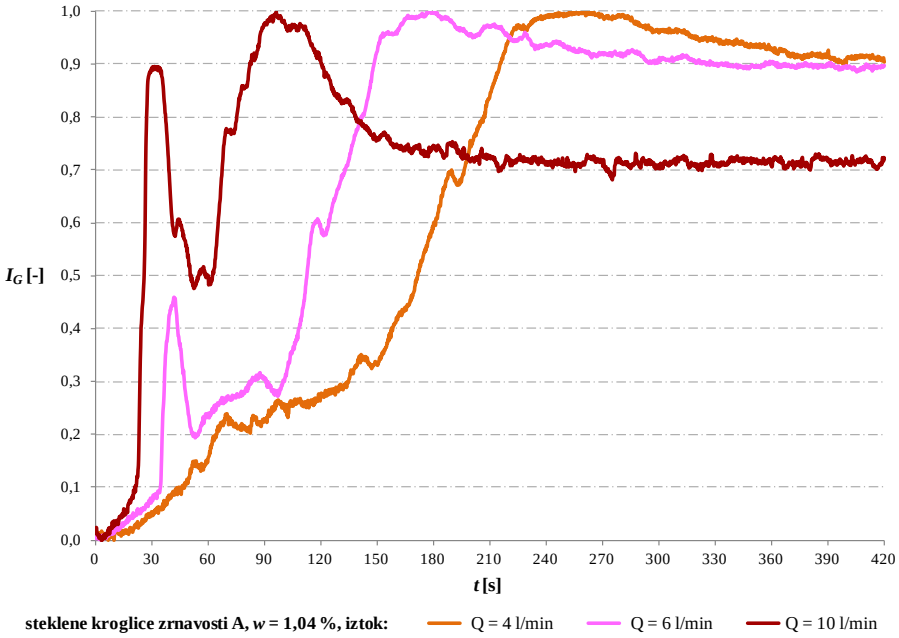
Grafikon F.10: Časovni potek indikatorja koncentracije iztoka; poskusi s steklenimi delci zrnavosti A z 0,26 % nazivno koncentracijo

Graph F.10: Time series of the indicator of concentration of the effluent; experiments with A granulation glass particles of 0.26 % nominal concentration



Grafikon F.11: Časovni potek indikatorja koncentracije iztoka; poskusi s steklenimi delci zrnavosti A z 0,52 % nazivno koncentracijo

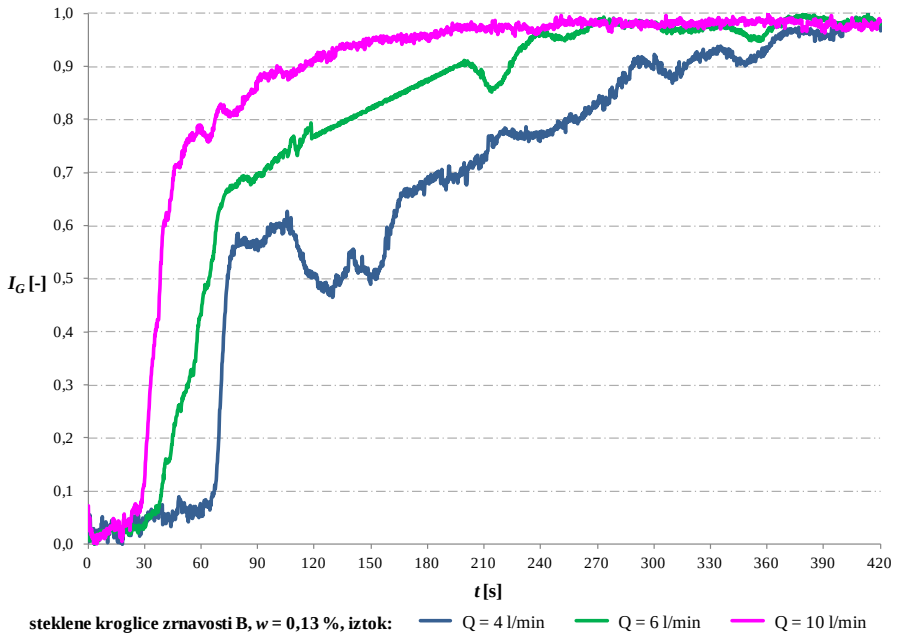
Graph F.11: Time series of the indicator of concentration of the effluent; experiments with A granulation glass particles of 0.52 % nominal concentration



Grafikon F.12: Časovni potek indikatorja koncentracije iztoka; poskusi s steklenimi delci zrnavosti A z 1,04 % nazivno koncentracijo

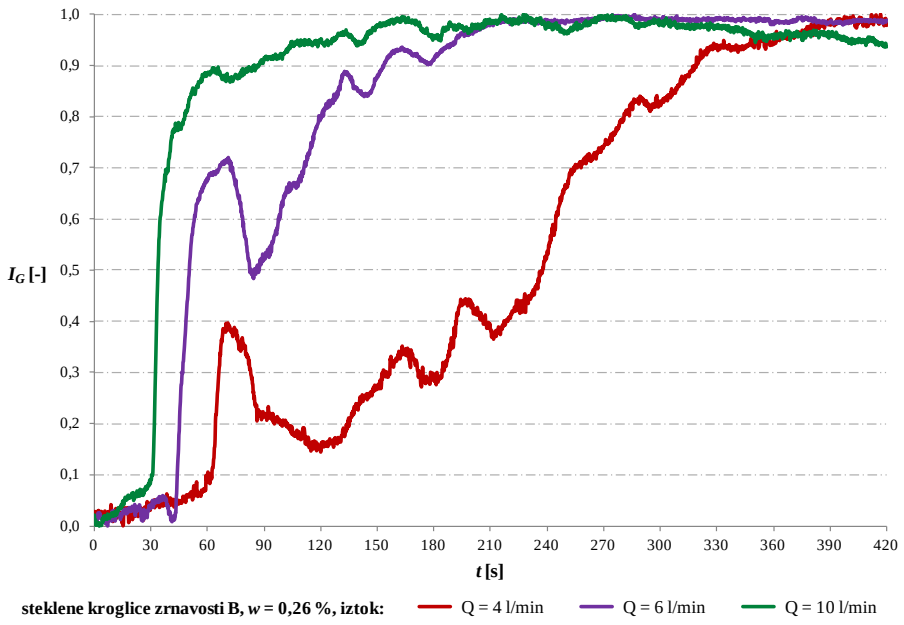
Graph F.12: Time series of the indicator of concentration of the effluent; experiments with A granulation glass particles of 1.04 % nominal concentration

Steklene mikrokroglice – zrnavost B



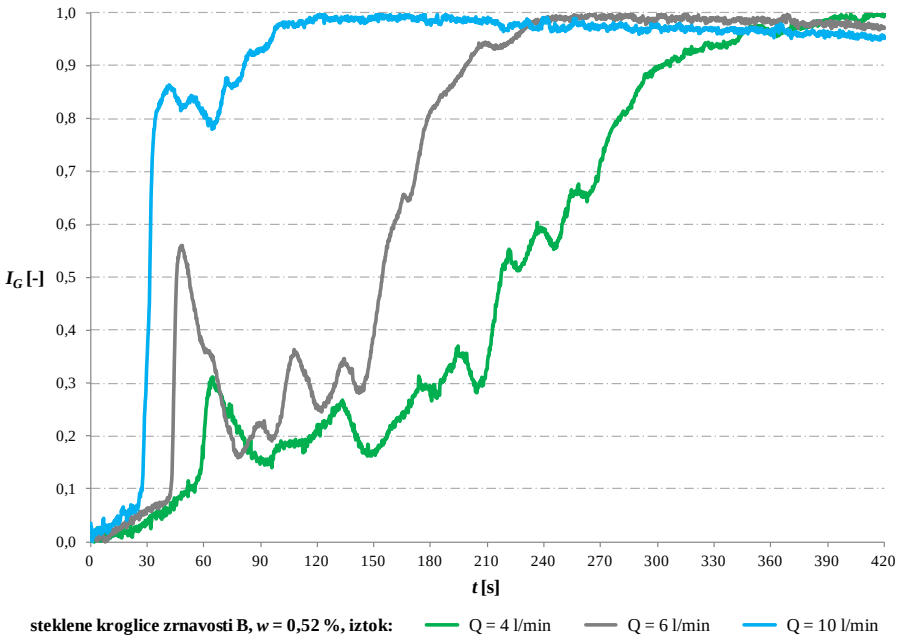
Grafikon F.13: Časovni potek indikatorja koncentracije iztoka; poskusi s steklenimi delci zrnavosti B z 0,13 % nazivno koncentracijo

Graph F.13: Time series of the indicator of concentration of the effluent; experiments with B granulation glass particles of 0.13 % nominal concentration



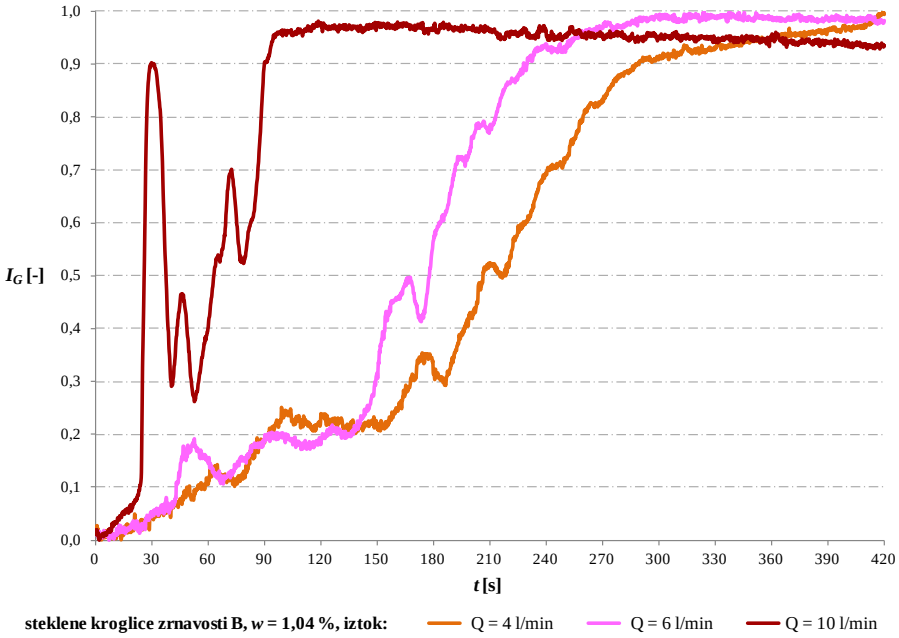
Grafikon F.14: Časovni potek indikatorja koncentracije iztoka; poskusi s steklenimi delci zrnavosti B z 0,26 % nazivno koncentracijo

Graph F.14: Time series of the indicator of concentration of the effluent; experiments with B granulation glass particles of 0.26 % nominal concentration



Grafikon F.15: Časovni potek indikatorja koncentracije iztoka; poskusi s steklenimi delci zrnavosti B z 0,52 % nazivno koncentracijo

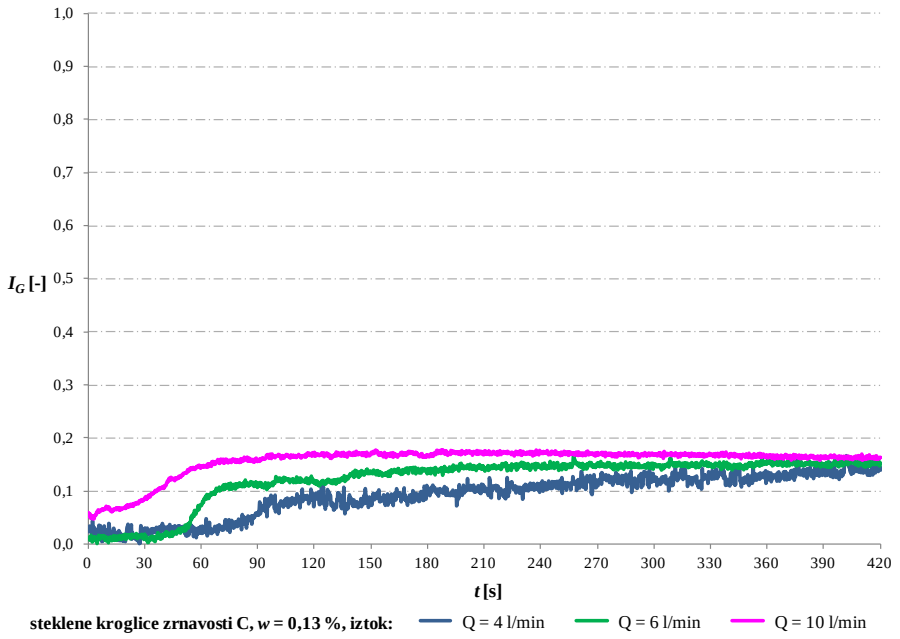
Graph F.15: Time series of the indicator of concentration of the effluent; experiments with B granulation glass particles of 0.52 % nominal concentration



Grafikon F.16: Časovni potek indikatorja koncentracije iztoka; poskusi s steklenimi delci zrnavosti B z 1,04 % nazivno koncentracijo

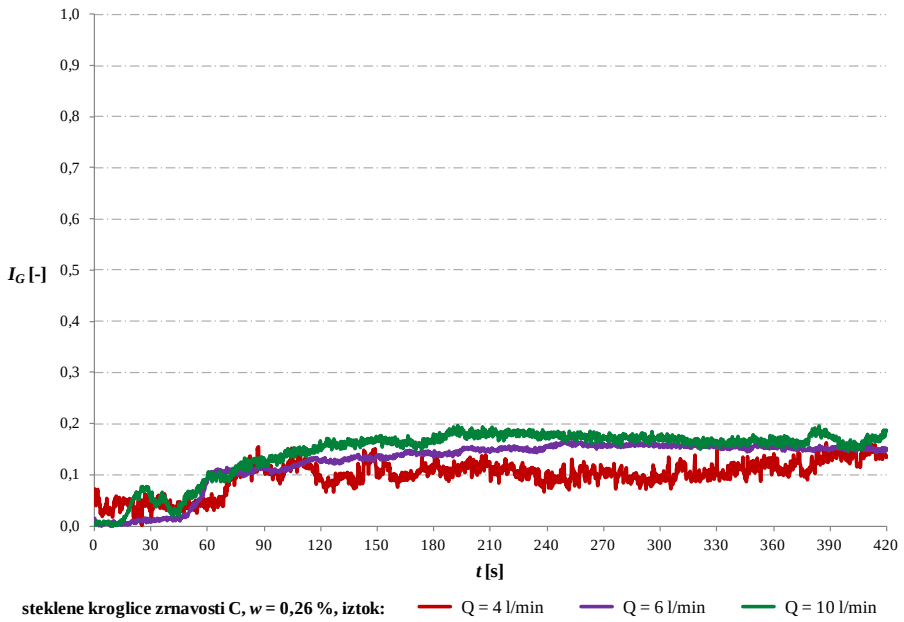
Graph F.16: Time series of the indicator of concentration of the effluent; experiments with B granulation glass particles of 1.04 % nominal concentration

Steklene mikrokroglice – zrnavost C



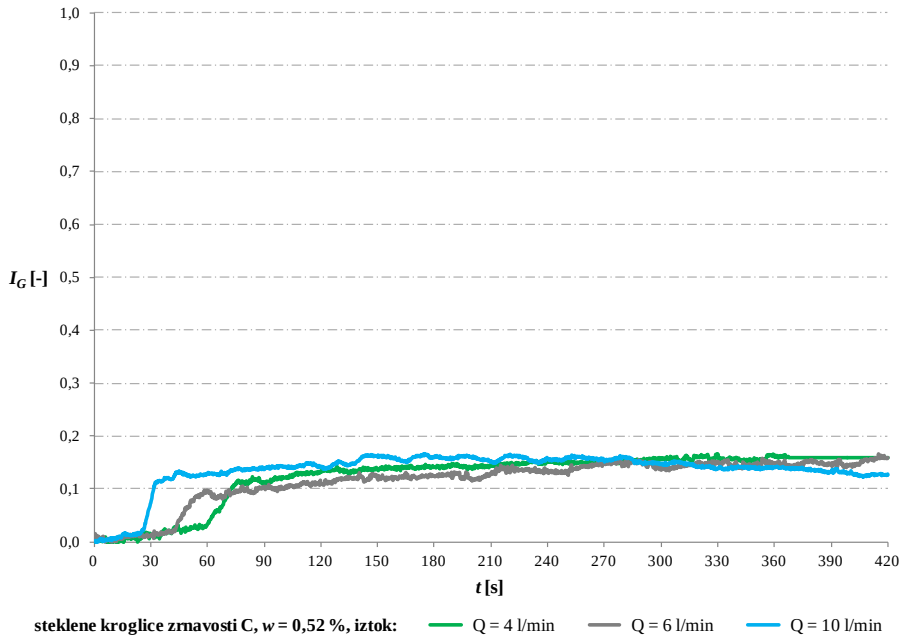
Grafikon F.17: Časovni potek indikatorja koncentracije iztoka; poskusi s steklenimi delci zrnavosti C z 0,13 % nazivno koncentracijo

Graph F.17: Time series of the indicator of concentration of the effluent; experiments with C granulation glass particles of 0.13 % nominal concentration



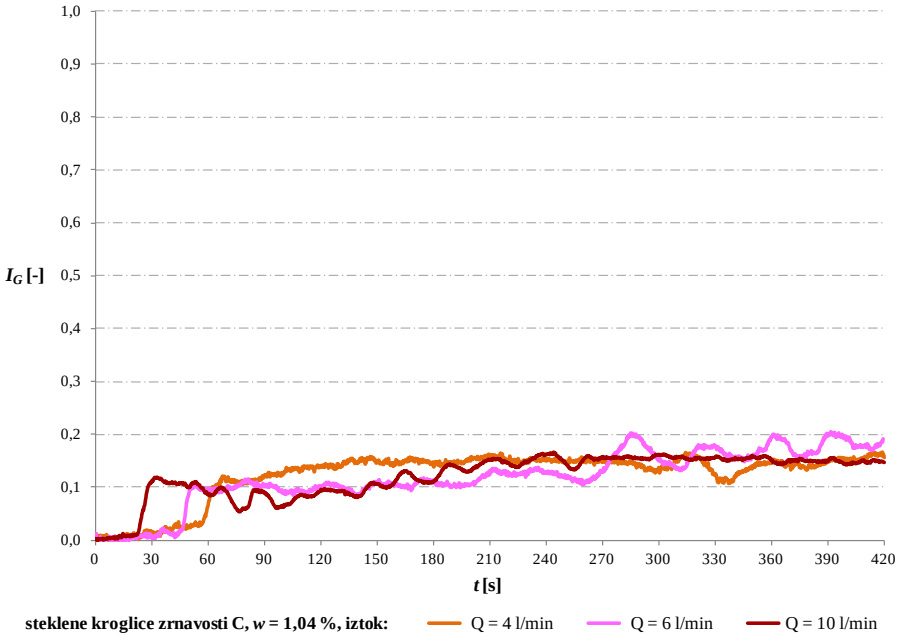
Grafikon F.18: Časovni potek indikatorja koncentracije iztoka; poskusi s steklenimi delci zrnavosti C z 0,26 % nazivno koncentracijo

Graph F.18: Time series of the indicator of concentration of the effluent; experiments with C granulation glass particles of 0.26 % nominal concentration



Grafikon F.19: Časovni potek indikatorja koncentracije iztoka; poskusi s steklenimi delci zrnavosti C z 0,52 % nazivno koncentracijo

Graph F.19: Time series of the indicator of concentration of the effluent; experiments with C granulation glass particles of 0.52 % nominal concentration

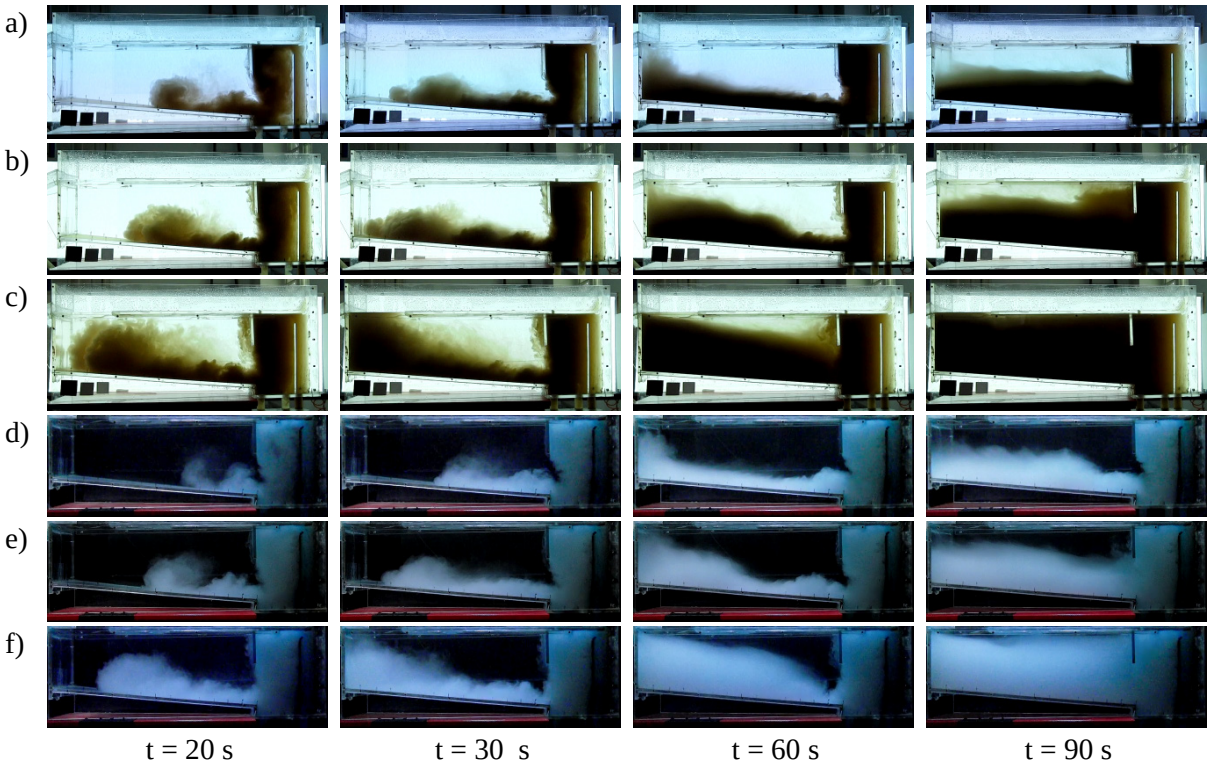


Grafikon F.20: Časovni potek indikatorja koncentracije iztoka; poskusi s steklenimi delci zrnavosti C z 1,04 % nazivno koncentracijo

Graph F.20: Time series of the indicator of concentration of the effluent; experiments with C granulation glass particles of 1.04 % nominal concentration

PRILOGA G: SEKVENCE ZAPOREDNIH SLIČIC POSNETKOV POSKUSOV

APPENDIX G: SEQUENCE OF CONSEQUENT IMAGES OF THE VIDEO CLIPS OF EXPERIMENTS



Slika G.1: Sekvence zaporednih sličic toka suspenzije za poskuse s fino mleto lešnikovo lupino z nazivno koncentracijo w = 1,0 % (nizi a), b) in c)) ter za poskuse s steklenimi delci zrnavosti B z nazivno koncentracijo w = 0,52 % (nizi d), e) in f)); a) pretok Q = 4 l/min; b) pretok Q = 6 l/min; c) pretok Q = 10 l/min; d) pretok Q = 4 l/min; e) pretok Q = 6 l/min; f) pretok Q = 10 l/min

Figure G.1: Sequence of consequent images of suspension flow for the experiments with fine ground hazelnut shell with nominal concentration of w = 1.0 % (sets a), b) and c)) and for the experiments with B granulation glass beads with nominal concentration of w = 0.52 % (sets d), e) and f)); a) volume flow rate of Q = 4 l/min; b) volume flow rate of Q = 6 l/min; c) volume flow rate of Q = 10 l/min; d) volume flow rate of Q = 4 l/min; e) volume flow rate of Q = 6 l/min; f) volume flow rate of Q = 10 l/min

PRILOGA H: VZORČENJE NA VTOKU IN IZTOKU: REZULTATI IN OBDELAVA VELIČIN

APPENDIX H: SAMPLING OF THE INFLUENT AND THE EFFLUENT: RESULTS AND PROCESSING DATA

Preglednica H.1: Vzorčenje pri poskusih s fino mleto lešnikovo lupino

Table H.1: Sampling – experiments with fine ground hazelnut shell

Prostornina usedline za vzorce, odvzete na vtoku in iztoku

	delci - koncentracija 0,13%						delci - koncentracija 0,26%						delci - koncentracija 0,52%						delci - koncentracija 1,04%					
	Q4, w.13		Q6, w.13		Q10, w.13		Q4, w.26		Q6, w.26		Q10, w.26		Q4, w.52		Q6, w.52		Q10, w.52		Q4, w1.04		Q6, w1.04		Q10, w1.04	
t	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$
[min]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]
0		0		0		0		0		0		0		0		0		0		0		0		0
2	3,2	< 0.1	3,5	1,2	3,5	1,50	5,7	1,1	6,2	0,6	6,1	2,70	14,5	< 0.1	9,7	4,4	11,6	8,50	23,5	3,6	23,0	5,0	25,0	11,5
5	2,2	0,9	2,4	1,7	2,5	1,90	4,5	2,1	4,4	3,1	3,5	4,7	10,0	3,1	8,6	6,1	10,0	7,8	18,5	10,2	16,3	9,5	21,0	17,0
20	1,10	0,7	1,2	1,0	1,4	1,20	1,9	1,5	2,5	2,2	2,8	2,5	4,4	3,0	4,3	3,7	5,5	4,9	9,2	1,4	6,5	5,2	10,4	10,0
50	< 0.1	< 0.1	1	1	0,7	1	1	1	1,2	1,10	1,40	1,30	1,6	1,4	2,0	1,8	2,6	2,3	3,2	0,7	2,5	2,2	5,0	4,6
95	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	1	1	1	1	0,5	0,2	1	1	1,3	1,2	1	< 0.1	1,2	1,5	2,50	2,3

Koncentracija na vtoku in iztoku

	delci - koncentracija 0,13%						delci - koncentracija 0,26%						delci - koncentracija 0,52%						delci - koncentracija 1,04%					
	Q4, w.13		Q6, w.13		Q10, w.13		Q4, w.26		Q6, w.26		Q10, w.26		Q4, w.52		Q6, w.52		Q10, w.52		Q4, w1.04		Q6, w1.04		Q10, w1.04	
t	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}
[min]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
0	0,45	0	0,45	0	0,45	0	0,91	0	0,91	0	0,91	0	1,81	0	1,81	0	1,81	0	3,62	0	3,62	0	3,62	0
2	0,22	< 0,007	0,24	0,08	0,24	0,10	0,39	0,07	0,42	0,04	0,41	0,18	0,98	< 0,007	0,66	0,30	0,78	0,57	1,68	0,24	1,64	0,34	1,79	0,78
5	0,15	0,06	0,16	0,11	0,17	0,13	0,30	0,14	0,30	0,21	0,24	0,32	0,68	0,21	0,58	0,41	0,68	0,53	1,32	0,69	1,10	0,64	1,50	1,15
20	0,07	0,05	0,08	0,07	0,09	0,08	0,13	0,10	0,17	0,15	0,19	0,17	0,30	0,20	0,29	0,25	0,37	0,33	0,62	0,09	0,44	0,35	0,70	0,68
50	< 0,007	< 0,007	0,04	0,03	0,05	0,04	0,06	0,05	0,08	0,07	0,09	0,09	0,11	0,09	0,14	0,12	0,18	0,16	0,22	0,05	0,17	0,15	0,34	0,31
95	< 0,007	< 0,007	< 0,007	< 0,007	< 0,007	< 0,007	< 0,007	< 0,007	0,04	0,03	0,05	0,05	0,03	0,01	0,06	0,06	0,09	0,08	0,06	< 0,007	0,08	0,10	0,17	0,16

Masa delcev v rezervoarju in v usedalniku

	delci - koncentracija 0,13%						delci - koncentracija 0,26%						delci - koncentracija 0,52%						delci - koncentracija 1,04%					
	Q4, w.13		Q6, w.13		Q10, w.13		Q4, w.26		Q6, w.26		Q10, w.26		Q4, w.52		Q6, w.52		Q10, w.52		Q4, w1.04		Q6, w1.04		Q10, w1.04	
t	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$
[min]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
0	150,1	0,0	150,1	0,0	150,1	0,0	300,5	0,0	300,5	0,0	300,5	0,0	601,9	0,0	601,9	0,0	601,9	0,0	1207,5	0,0	1207,5	0,0	1207,5	0,0
2	71,4	78,7	78,1	72,0	78,1	72,0	127,2	173,3	138,4	162,1	136,2	164,3	324,3	277,6	216,7	385,2	259,3	342,6	556,8	650,7	544,9	662,6	592,6	614,9
5	49,1	101,0	53,5	96,6	55,8	94,3	100,4	200,1	98,2	202,3	78,1	222,4	223,4	378,5	192,1	409,8	223,4	378,5	437,9	769,6	364,7	842,8	497,3	710,2
20	24,5	125,6	26,8	123,3	31,2	118,9	42,4	258,1	55,8	244,7	62,5	238,0	98,2	503,7	96,0	505,9	122,8	479,1	205,5	1002,0	145,1	1062,4	232,4	975,1
50	< 2,3	> 147,8	13,4	136,7	15,6	134,5	20,1	280,4	26,8	273,7	31,2	269,3	35,7	566,2	44,6	557,3	58,0	543,9	71,4	1136,1	55,8	1151,7	111,6	1095,9
95	< 2,3	> 147,8	< 2,3	> 147,8	< 2,3	> 147,8	< 2,3	> 298,2	13,4	287,1	17,8	282,7	11,1	590,8	20,1	581,8	29,0	572,9	20,1	1187,4	26,8	1180,7	55,8	1151,7

Gostota suspenzije na vtoku in v usedalniku

	delci - koncentracija 0,13%						delci - koncentracija 0,26%						delci - koncentracija 0,52%						delci - koncentracija 1,04%					
	Q4, w.13		Q6, w.13		Q10, w.13		Q4, w.26		Q6, w.26		Q10, w.26		Q4, w.52		Q6, w.52		Q10, w.52		Q4, w1.04		Q6, w1.04		Q10, w1.04	
t	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}
[min]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]
0	1001,4	1000,7	1001,4	1000,7	1001,4	1000,7	1002,8	1001,4	1002,8	1001,4	1002,8	1001,4	1005,7	1002,8	1005,7	1002,8	1005,7	1002,8	1011,4	1005,6	1011,4	1005,6	1011,4	1005,6
2	1000,7	nedol.	1000,7	1000,5	1000,7	1000,5	1001,2	1000,7	1001,3	1000,7	1001,3	1000,9	1003,0	nedol.	1002,0	1001,5	1002,4	1002,1	1005,2	1003,0	1005,1	1003,1	1005,6	1004,0
5	1000,5	1000,3	1000,5	1000,4	1000,5	1000,5	1000,9	1000,7	1000,9	1000,8	1000,7	1000,9	1002,1	1001,4	1001,8	1001,5	1002,1	1001,9	1004,1	1003,1	1003,4	1002,7	1004,7	1004,1
20	1000,2	1000,2	1000,3	1000,2	1000,3	1000,3	1000,4	1000,4	1000,5	1000,5	1000,6	1000,6	1000,9	1000,8	1000,9	1000,8	1001,2	1001,1	1001,9	1001,1	1001,4	1001,2	1002,2	1002,1
50	< 1000	nedol.	1000,1	1000,1	1000,1	1000,1	1000,2	1000,2	1000,3	1000,2	1000,3	1000,3	1000,3	1000,3	1000,4	1000,4	1000,5	1000,5	1000,7	1000,4	1000,5	1000,5	1001,0	1001,0
95	< 1000	nedol.	< 1000	nedol.	< 1000	nedol.	< 1000	nedol.	1000,1	1000,1	1000,2	1000,2	1000,1	1000,1	1000,2	1000,2	1000,3	1000,3	1000,2	nedol.	1000,3	1000,3	1000,5	1000,5

Povprečna koncentracija v usedalniku, učinkovitost glede na razmerje med koncentracijo na iztoku in povprečno koncentracijo suspenzije v usedalniku

	delci - koncentracija 0,13%						delci - koncentracija 0,26%						delci - koncentracija 0,52%						delci - koncentracija 1,04%					
	Q4, w.13		Q6, w.13		Q10, w.13		Q4, w.26		Q6, w.26		Q10, w.26		Q4, w.52		Q6, w.52		Q10, w.52		Q4, w1.04		Q6, w1.04		Q10, w1.04	
t	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}
[min]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
0	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00	
2	0,29	> 97,6	0,27	69,57	0,27	61,96	0,64	88,39	0,60	93,23	0,61	69,97	1,02	> 99,32	1,42	79,07	1,26	54,56	2,39	89,83	2,44	86,13	2,26	65,64
5	0,37	83,73	0,36	67,85	0,35	63,21	0,74	80,81	0,75	71,98	0,82	61,35	1,40	84,99	1,51	72,72	1,40	62,24	2,83	75,61	3,09	79,24	2,61	55,97
20	0,46	89,82	0,46	85,19	0,44	81,56	0,95	89,37	0,90	83,55	0,88	80,79	1,85	89,07	1,86	86,58	1,76	81,24	3,67	97,42	3,89	90,96	3,57	81,08
50	> 0,55	nedol.	0,51	93,32	0,50	91,85	1,04	95,43	1,01	92,65	0,99	91,17	2,08	95,46	2,05	94,07	2,00	92,24	4,15	98,86	4,21	96,47	4,01	92,25
95	> 0,55	nedol.	> 0,55	nedol.	> 0,55	nedol.	> 1,1	nedol.	1,06	96,81	1,04	95,47	2,17	99,38	2,14	97,16	2,11	96,15	4,34	> 99,84	4,31	97,65	4,21	96,31

Učinkovitost glede na koncentracijo delcev na vtoku in iztoku

	delci - koncentracija 0,13%						delci - koncentracija 0,26%						delci - koncentracija 0,52%						delci - koncentracija 1,04%					
	Q4, w.13		Q6, w.13		Q10, w.13		Q4, w.26		Q6, w.26		Q10, w.26		Q4, w.52		Q6, w.52		Q10, w.52		Q4, w1.04		Q6, w1.04		Q10, w1.04	
t	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$
[min]	[%]	[ ]	[%]	[ ]	[%]	[ ]	[%]	[ ]	[%]	[ ]	[%]	[ ]	[%]	[ ]	[%]	[ ]	[%]	[ ]	[%]	[ ]	[%]	[ ]	[%]	[ ]
0	100	0,060	100	0,090	100	0,150	100	0,042	100	0,064	100	0,106	100	0,030	100	0,045	100	0,075	100	0,021	100	0,032	100	0,053
2	> 97	nedol.	66	0,154	57	0,276	81	0,073	90	0,099	56	0,211	> 99	nedol.	55	0,102	27	0,221	86	0,034	79	0,053	56	0,101
5	59	0,137	29	0,280	24	0,503	53	0,101	30	0,205	-34	nedol.	69	0,059	29	0,148	22	0,263	48	0,051	42	0,090	23	0,171
20	36	0,247	17	0,523	14	0,872	21	0,247	12	0,427	11	0,712	32	0,132	14	0,302	11	0,503	85	0,056	20	0,205	4	0,616
50	nedol.	nedol.	17	0,740	14	1,233	22	0,349	8	0,740	7	1,233	13	0,349	10	0,523	12	0,712	78	0,099	12	0,427	8	0,616
95	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	17	0,740	13	1,233	60	0,285	0	nedol.	8	1,233	> 88	nedol.	-25	nedol.	8	0,872

Preglednica H.2: Vzorčenje pri poskusih z grobo mleto lešnikovo lupino

Table H.2: Sampling – experiments with coarse ground hazelnut shell

Prostornina usedline za vzorce, odvzete na vtoku in iztoku

	delci - koncentracija 0,13%						delci - koncentracija 0,26%						delci - koncentracija 0,52%						delci - koncentracija 1,04%					
	Q4, w.13		Q6, w.13		Q10, w.13		Q4, w.26		Q6, w.26		Q10, w.26		Q4, w.52		Q6, w.52		Q10, w.52		Q4, w1.04		Q6, w1.04		Q10, w1.04	
t	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$
[min]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]
0		0		0		0		0		0		0		0		0		0		0		0		0
2	2,9	< 0.1	2,2	0,1	2,4	0,40	7,0	0,1	5,5	0,2	5,0	0,50	13,0	0,2	11,1	0,3	8,7	1,0	32,0	0,4	23,0	0,5	24,0	1,2
5	1,4	< 0.1	1,5	0,1	0,9	0,20	4,5	0,1	3,0	0,2	2,1	0,3	8,1	0,2	5,0	0,3	3,6	0,5	20,0	0,4	13,0	0,5	8,0	0,6
10	0,80	< 0.1	0,5	< 0.1	0,3	< 0.1	2,1	0,1	1,1	0,1	0,4	0,1	4,0	0,1	1,5	0,1	0,8	0,1	8,1	0,3	4,0	0,3	2,1	0,3
20	0,2	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0,4	< 0.1	0,2	< 0.1	0,1	< 0.1	0,8	< 0.1	0,2	< 0.1	0,1	0,1	1,6	0,1	0,6	0,15	0,2	0,1
50	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0,1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1

Koncentracija na vtoku in iztoku

	delci - koncentracija 0,13%						delci - koncentracija 0,26%						delci - koncentracija 0,52%						delci - koncentracija 1,04%					
	Q4, w.13		Q6, w.13		Q10, w.13		Q4, w.26		Q6, w.26		Q10, w.26		Q4, w.52		Q6, w.52		Q10, w.52		Q4, w1.04		Q6, w1.04		Q10, w1.04	
t	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}
[min]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
0	0,45	0	0,45	0	0,45	0	0,91	0	0,91	0	0,91	0	1,81	0	1,81	0	1,81	0	3,62	0	3,62	0	3,62	0
2	0,24	< 0,008	0,18	0,01	0,20	0,03	0,58	0,01	0,46	0,02	0,42	0,04	1,04	0,02	0,89	0,03	0,73	0,08	2,56	0,03	1,84	0,04	1,92	0,10
5	0,12	< 0,008	0,13	0,01	0,08	0,02	0,38	0,01	0,25	0,02	0,18	0,03	0,68	0,02	0,42	0,03	0,30	0,04	1,60	0,03	1,04	0,04	0,67	0,05
10	0,07	< 0,008	0,04	< 0,008	0,03	< 0,008	0,18	0,01	0,09	0,01	0,03	0,01	0,33	0,01	0,13	0,01	0,07	0,01	0,68	0,03	0,33	0,03	0,18	0,03
20	0,02	< 0,008	< 0,008	< 0,008	< 0,008	< 0,008	0,03	< 0,008	0,02	< 0,008	0,01	< 0,008	0,07	< 0,008	0,02	< 0,008	0,01	0,01	0,13	0,01	0,05	0,01	0,02	0,01
50	< 0,008	< 0,008	< 0,008	< 0,008	< 0,008	< 0,008	< 0,008	< 0,008	< 0,008	< 0,008	< 0,008	< 0,008	< 0,008	< 0,008	< 0,008	< 0,008	< 0,008	< 0,008	0,01	< 0,008	< 0,008	< 0,008	< 0,008	< 0,008

Masa delcev v rezervoarju in v usedalniku

	delci - koncentracija 0,13%						delci - koncentracija 0,26%						delci - koncentracija 0,52%						delci - koncentracija 1,04%					
	Q4, w.13		Q6, w.13		Q10, w.13		Q4, w.26		Q6, w.26		Q10, w.26		Q4, w.52		Q6, w.52		Q10, w.52		Q4, w1.04		Q6, w1.04		Q10, w1.04	
t	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$
[min]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
0	150,1	0,0	150,1	0,0	150,1	0,0	300,5	0,0	300,5	0,0	300,5	0,0	601,9	0,0	601,9	0,0	601,9	0,0	1207,5	0,0	1207,5	0,0	1207,5	0,0
2	79,8	70,3	60,5	89,6	66,0	84,1	192,8	107,7	151,5	149,0	137,7	162,8	344,3	257,6	293,8	308,1	239,8	362,1	851,6	355,9	610,7	596,8	637,4	570,1
5	38,5	111,6	41,3	108,8	24,8	125,3	123,9	176,6	82,6	217,9	57,8	242,7	223,2	378,7	137,7	464,2	99,1	502,8	530,6	676,9	344,3	863,2	220,5	987,0
10	22,0	128,1	13,8	136,3	8,3	141,8	57,8	242,7	30,3	270,2	11,0	289,5	110,1	491,8	41,3	560,6	22,0	579,9	223,2	984,3	110,1	1097,4	57,8	1149,7
20	5,5	144,6	< 2,6	> 147,5	< 2,6	> 147,5	11,0	289,5	5,5	295,0	2,8	297,7	22,0	579,9	5,5	596,4	2,8	599,1	44,0	1163,5	16,5	1191,0	5,5	1202,0
50	< 2,6	> 147,5	< 2,6	> 147,5	< 2,6	> 147,5	< 2,6	> 297,9	< 2,6	> 297,9	< 2,6	> 297,9	< 2,6	> 599,3	< 2,6	> 599,3	< 2,6	> 599,3	2,8	1204,7	< 2,6	> 1204,9	< 2,6	> 1204,9

Gostota suspenzije na vtoku in v usedalniku

	delci - koncentracija 0,13%						delci - koncentracija 0,26%						delci - koncentracija 0,52%						delci - koncentracija 1,04%					
	Q4, w.13		Q6, w.13		Q10, w.13		Q4, w.26		Q6, w.26		Q10, w.26		Q4, w.52		Q6, w.52		Q10, w.52		Q4, w1.04		Q6, w1.04		Q10, w1.04	
t	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}
[min]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]
0	1001,4	1000,7	1001,4	1000,7	1001,4	1000,7	1002,8	1001,4	1002,8	1001,4	1002,8	1001,4	1005,7	1002,8	1005,7	1002,8	1005,7	1002,8	1011,4	1005,6	1011,4	1005,6	1011,4	1005,6
2	1000,8	nedol.	1000,6	1000,3	1000,6	1000,4	1001,8	1000,9	1001,4	1000,7	1001,3	1000,7	1003,2	1001,6	1002,8	1001,4	1002,3	1001,3	1008,0	1004,0	1005,7	1002,9	1006,0	1003,1
5	1000,4	nedol.	1000,4	1000,2	1000,2	1000,1	1001,2	1000,6	1000,8	1000,4	1000,5	1000,3	1002,1	1001,1	1001,3	1000,7	1000,9	1000,5	1005,0	1002,5	1003,2	1001,7	1002,1	1001,1
10	1000,2	nedol.	1000,1	nedol.	1000,1	nedol.	1000,5	1000,3	1000,3	1000,2	1000,1	1000,1	1001,0	1000,5	1000,4	1000,2	1000,2	1000,1	1002,1	1001,1	1001,0	1000,6	1000,5	1000,3
20	1000,1	nedol.	< 1000	nedol.	< 1000	nedol.	1000,1	nedol.	1000,1	nedol.	1000,0	nedol.	1000,2	nedol.	1000,1	nedol.	1000,0	1000,0	1000,4	1000,2	1000,2	1000,1	1000,1	1000,0
50	< 1000	nedol.	< 1000	nedol.	< 1000	nedol.	< 1000	nedol.	< 1000	nedol.	< 1000	nedol.	< 1000	nedol.	< 1000	nedol.	< 1000	nedol.	1000,0	nedol.	< 1000	nedol.	< 1000	nedol.

Povprečna koncentracija v usedalniku, konc. na iztoku VS povp. konc. v usedalniku

	delci - koncentracija 0,13%						delci - koncentracija 0,26%						delci - koncentracija 0,52%						delci - koncentracija 1,04%					
	Q4, w.13		Q6, w.13		Q10, w.13		Q4, w.26		Q6, w.26		Q10, w.26		Q4, w.52		Q6, w.52		Q10, w.52		Q4, w1.04		Q6, w1.04		Q10, w1.04	
t	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}
[min]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
0	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00	
2	0,26	> 96,92	0,33	97,49	0,31	89,28	0,40	97,91	0,55	96,98	0,60	93,08	0,95	98,25	1,14	97,80	1,34	93,76	1,31	97,46	2,20	98,10	2,10	95,23
5	0,41	> 98,06	0,40	97,93	0,46	96,40	0,65	98,72	0,81	97,93	0,90	97,21	1,40	98,81	1,71	98,54	1,85	97,75	2,49	98,66	3,17	98,68	3,61	98,62
10	0,47	> 98,31	0,50	> 98,41	0,52	> 98,47	0,90	99,07	1,00	99,16	1,07	99,22	1,81	99,54	2,06	99,60	2,13	99,61	3,60	99,31	4,01	99,38	4,20	99,41
20	0,53	> 98,5	> 0,55	nedol.	> 0,55	nedol.	1,07	> 99,25	1,09	> 99,27	1,10	> 99,27	2,13	> 99,63	2,19	> 99,64	2,20	99,62	4,25	99,80	4,35	99,71	4,39	99,81
50	> 0,55	nedol.	> 0,55	nedol.	> 0,55	nedol.	> 1,1	nedol.	> 1,1	nedol.	> 1,1	nedol.	> 2,2	nedol.	> 2,2	nedol.	> 2,2	nedol.	4,40	> 99,82	> 4,4	nedol.	> 4,4	nedol.

Učinkovitost glede na koncentracijo delcev na vtoku in iztoku

	delci - koncentracija 0,13%						delci - koncentracija 0,26%						delci - koncentracija 0,52%						delci - koncentracija 1,04%					
	Q4, w.13		Q6, w.13		Q10, w.13		Q4, w.26		Q6, w.26		Q10, w.26		Q4, w.52		Q6, w.52		Q10, w.52		Q4, w1.04		Q6, w1.04		Q10, w1.04	
t	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$
[min]	[%]	[ ]	[%]	[ ]	[%]	[ ]	[%]	[ ]	[%]	[ ]	[%]	[ ]	[%]	[ ]	[%]	[ ]	[%]	[ ]	[%]	[ ]	[%]	[ ]	[%]	[ ]
0	100	0,060	100	0,090	100	0,150	100	0,042	100	0,064	100	0,106	100	0,030	100	0,045	100	0,075	100	0,021	100	0,032	100	0,053
2	> 97	nedol.	95	0,145	83	0,248	99	0,053	96	0,091	90	0,165	98	0,040	97	0,065	89	0,126	99	0,025	98	0,045	95	0,075
5	> 93	nedol.	93	0,178	78	0,420	98	0,067	93	0,126	86	0,262	98	0,050	94	0,097	86	0,199	98	0,032	96	0,061	93	0,129
10	> 88	nedol.	> 81	nedol.	> 68	nedol.	95	0,099	91	0,211	75	0,641	98	0,071	93	0,178	88	0,420	96	0,050	93	0,109	86	0,262
20	> 52	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	> 76	nedol.	> 52	nedol.	> 4	nedol.	> 88	nedol.	> 52	nedol.	0	nedol.	94	0,115	75	0,314	50	1,111
50	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	> 4	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.

Preglednica H.3: Vzorčenje pri poskusih s steklenimi kroglicami – zrnavost A

Table H.3: Sampling – experiments with glass microbeads – granulation A

Prostornina usedline za vzorce, odvzete na vtoku in iztoku

	delci - koncentracija 0,13%						delci - koncentracija 0,26%						delci - koncentracija 0,52%						delci - koncentracija 1,04%					
	Q4, w.13		Q6, w.13		Q10, w.13		Q4, w.26		Q6, w.26		Q10, w.26		Q4, w.52		Q6, w.52		Q10, w.52		Q4, w1.04		Q6, w1.04		Q10, w1.04	
t	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$
[min]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]
0		0		0		0		0		0		0		0		0		0		0		0		0
2	0,3	< 0.1	0,2	< 0.1	0,3	0,15	0,9	< 0.1	0,8	< 0.1	0,7	0,15	2,0	< 0.1	1,7	< 0.1	1,4	0,25	4,2	< 0.1	4,0	< 0.1	3,4	0,3
5	0,2	< 0.1	0,2	< 0.1	0,3	0,15	0,7	< 0.1	0,6	0,3	0,6	0,4	1,4	< 0.1	1,1	0,7	1,1	0,8	2,9	0,1	2,4	0,7	2,6	1,9
20	0,15	0,1	0,1	0,1	0,1	0,15	0,2	0,1	0,2	0,3	0,3	0,3	0,8	0,5	0,7	0,6	0,8	0,7	1,2	0,4	1,1	0,7	1,3	1,3
50	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0,1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0,1	0,15	0,15	0,15	0,3	0,2	0,2	0,2	0,4	0,3	0,3	0,2	0,5	0,4	0,5	0,5
95	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0,1	0,1	< 0.1	< 0.1	0,1	0,1	< 0.1	< 0.1	0,1	0,1	0,15	0,1

Koncentracija na vtoku in iztoku

	delci - koncentracija 0,13%						delci - koncentracija 0,26%						delci - koncentracija 0,52%						delci - koncentracija 1,04%					
	Q4, w.13		Q6, w.13		Q10, w.13		Q4, w.26		Q6, w.26		Q10, w.26		Q4, w.52		Q6, w.52		Q10, w.52		Q4, w1.04		Q6, w1.04		Q10, w1.04	
t	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}
[min]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
0	0,24	0	0,24	0	0,24	0	0,47	0	0,47	0	0,47	0	0,94	0	0,94	0	0,94	0	1,88	0	1,88	0	1,88	0
2	0,10	< 0,03	0,07	< 0,03	0,10	0,05	0,26	< 0,03	0,23	< 0,03	0,20	0,05	0,57	< 0,03	0,49	< 0,03	0,40	0,08	1,20	< 0,03	1,14	< 0,03	0,97	0,10
5	0,07	< 0,03	0,07	< 0,03	0,08	0,05	0,20	< 0,03	0,17	0,10	0,17	0,13	0,40	< 0,03	0,31	0,20	0,31	0,23	0,83	0,03	0,69	0,20	0,74	0,54
20	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,07	0,03	0,07	0,10	0,10	0,10	0,23	0,17	0,20	0,17	0,23	0,20	0,34	0,13	0,31	0,20	0,37	0,37
50	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	0,03	0,05	0,05	0,05	0,10	0,07	0,07	0,07	0,13	0,10	0,10	0,07	0,17	0,13	0,17	0,17
95	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	0,03	0,03	< 0,03	< 0,03	0,03	0,03	< 0,03	< 0,03	0,03	0,03	0,05	0,03

Masa delcev v rezervoarju in v usedalniku

	delci - koncentracija 0,13%						delci - koncentracija 0,26%						delci - koncentracija 0,52%						delci - koncentracija 1,04%					
	Q4, w.13		Q6, w.13		Q10, w.13		Q4, w.26		Q6, w.26		Q10, w.26		Q4, w.52		Q6, w.52		Q10, w.52		Q4, w1.04		Q6, w1.04		Q10, w1.04	
t	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$
[min]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
0	78,1	0,0	78,1	0,0	78,1	0,0	156,2	0,0	156,2	0,0	156,2	0,0	313,0	0,0	313,0	0,0	313,0	0,0	627,9	0,0	627,9	0,0	627,9	0,0
2	33,0	45,1	22,0	56,1	33,0	45,1	85,0	71,2	75,5	80,7	66,1	90,1	189,2	123,8	160,8	152,2	132,3	180,7	398,9	229,0	379,7	248,2	322,5	305,4
5	22,0	56,1	22,0	56,1	27,5	50,6	66,1	90,1	56,6	99,6	56,6	99,6	132,3	180,7	103,9	209,1	103,9	209,1	274,8	353,1	227,2	400,7	246,2	381,7
20	16,5	61,6	11,0	67,1	11,0	67,1	22,0	134,2	22,0	134,2	33,0	123,2	75,5	237,5	66,1	246,9	75,5	237,5	113,4	514,5	103,9	524,0	122,8	505,1
50	< 9,9	> 68,2	< 9,9	> 68,2	11,0	67,1	< 9,9	> 146,3	11,0	145,2	16,5	139,7	33,0	280,0	22,0	291,0	44,0	269,0	33,0	594,9	55,1	572,8	55,1	572,8
95	< 9,9	> 68,2	< 9,9	> 68,2	< 9,9	> 68,2	< 9,9	> 146,3	< 9,9	> 146,3	< 9,9	> 146,3	11,0	302,0	< 9,9	> 303,1	11,0	302,0	< 9,9	> 618	11,0	616,9	16,5	611,4

Gostota suspenzije na vtoku in v usedalniku

	delci - koncentracija 0,13%						delci - koncentracija 0,26%						delci - koncentracija 0,52%						delci - koncentracija 1,04%					
	Q4, w.13		Q6, w.13		Q10, w.13		Q4, w.26		Q6, w.26		Q10, w.26		Q4, w.52		Q6, w.52		Q10, w.52		Q4, w1.04		Q6, w1.04		Q10, w1.04	
t	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}
[min]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]
0	1001,4	1000,7	1001,4	1000,7	1001,4	1000,7	1002,8	1001,4	1002,8	1001,4	1002,8	1001,4	1005,7	1002,8	1005,7	1002,8	1005,7	1002,8	1011,4	1005,7	1011,4	1005,7	1011,4	1005,7
2	1000,6	nedol.	1000,4	nedol.	1000,6	1000,5	1001,5	nedol.	1001,4	nedol.	1001,2	1000,8	1003,4	nedol.	1002,9	nedol.	1002,4	1001,5	1007,3	nedol.	1006,9	nedol.	1005,9	1003,2
5	1000,4	nedol.	1000,4	nedol.	1000,5	1000,4	1001,2	nedol.	1001,0	1000,8	1001,0	1000,9	1002,4	nedol.	1001,9	1001,5	1001,9	1001,6	1005,0	1002,6	1004,1	1002,7	1004,5	1003,9
20	1000,3	1000,3	1000,2	1000,2	1000,2	1000,3	1000,4	1000,3	1000,4	1000,5	1000,6	1000,6	1001,4	1001,2	1001,2	1001,1	1001,4	1001,3	1002,1	1001,4	1001,9	1001,5	1002,2	1002,2
50	< 1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.	1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.	1000,2	1000,3	1000,3	1000,3	1000,6	1000,5	1000,4	1000,4	1000,8	1000,7	1000,6	1000,5	1001,0	1000,9	1001,0	1001,0
95	< 1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.	1000,2	1000,2	< 1000,2	nedol.	1000,2	1000,2	< 1000,2	nedol.	1000,2	1000,2	1000,3	1000,3

Povprečna koncentracija v usedalniku, učinkovitost glede na razmerje med koncentracijo na iztoku in povprečno koncentracijo suspenzije v usedalniku

	delci - koncentracija 0,13%						delci - koncentracija 0,26%						delci - koncentracija 0,52%						delci - koncentracija 1,04%					
	Q4, w.13		Q6, w.13		Q10, w.13		Q4, w.26		Q6, w.26		Q10, w.26		Q4, w.52		Q6, w.52		Q10, w.52		Q4, w1.04		Q6, w1.04		Q10, w1.04	
t	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}
[min]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
0	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00	
2	0,17	> 82,01	0,21	> 85,54	0,17	70,02	0,26	> 88,61	0,30	> 89,94	0,33	84,99	0,46	> 93,44	0,56	> 94,66	0,67	87,50	0,84	> 96,45	0,91	> 96,72	1,12	91,10
5	0,21	> 85,54	0,21	> 85,54	0,19	73,28	0,33	> 90,99	0,37	72,82	0,37	63,76	0,67	> 95,5	0,77	74,05	0,77	70,35	1,30	97,43	1,47	86,40	1,40	61,27
20	0,23	85,37	0,25	86,57	0,25	79,85	0,50	93,27	0,50	79,82	0,45	78,02	0,87	80,95	0,91	81,15	0,87	77,14	1,88	92,92	1,92	89,57	1,85	79,92
50	> 0,25	nedol.	> 0,25	nedol.	0,25	> 87,91	> 0,54	nedol.	0,54	90,67	0,52	90,31	1,03	93,53	1,07	93,77	0,99	89,90	2,17	96,93	2,09	93,64	2,09	92,04
95	> 0,25	nedol.	> 0,25	nedol.	> 0,25	nedol.	> 0,54	nedol.	> 0,54	nedol.	> 0,54	nedol.	1,11	97,00	> 1,12	nedol.	1,11	97,00	> 2,26	nedol.	2,25	98,52	2,23	98,51

Učinkovitost glede na koncentracijo delcev na vtoku in iztoku

	delci - koncentracija 0,13%						delci - koncentracija 0,26%						delci - koncentracija 0,52%						delci - koncentracija 1,04%					
	Q4, w.13		Q6, w.13		Q10, w.13		Q4, w.26		Q6, w.26		Q10, w.26		Q4, w.52		Q6, w.52		Q10, w.52		Q4, w1.04		Q6, w1.04		Q10, w1.04	
t	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$
[min]	[%]	[ ]	[%]	[ ]	[%]	[ ]	[%]	[ ]	[%]	[ ]	[%]	[ ]	[%]	[ ]	[%]	[ ]	[%]	[ ]	[%]	[ ]	[%]	[ ]	[%]	[ ]
0	100	0,060	100	0,090	100	0,150	100	0,042	100	0,064	100	0,106	100	0,030	100	0,045	100	0,075	100	0,021	100	0,032	100	0,053
2	> 70	nedol.	> 55	nedol.	50	0,326	> 88	nedol.	> 87	nedol.	75	0,188	> 95	nedol.	> 94	nedol.	79	0,129	> 98	nedol.	> 97	nedol.	90	0,078
5	> 55	nedol.	> 55	nedol.	40	0,399	> 85	nedol.	42	0,164	22	0,373	> 93	nedol.	36	0,129	27	0,249	96	0,033	71	0,063	27	0,163
20	33	0,226	0	nedol.	-50	nedol.	50	0,160	-50	nedol.	0	nedol.	27	0,117	14	0,259	13	0,431	61	0,064	36	0,129	0	nedol.
50	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	> 10	nedol.	nedol.	nedol.	-50	nedol.	0	nedol.	33	0,160	0	nedol.	25	0,399	33	0,160	20	0,239	0	nedol.
95	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	0	nedol.	nedol.	nedol.	0	nedol.	nedol.	nedol.	0	nedol.	33	0,565

Preglednica H.4: Vzorčenje pri poskusih s steklenimi kroglicami – zrnavost B

Table H.4: Sampling – experiments with glass microbeads – granulation B

Prostornina usedline za vzorce, odvzete na vtoku in iztoku

	delci - koncentracija 0,13%						delci - koncentracija 0,26%						delci - koncentracija 0,52%						delci - koncentracija 1,04%					
	Q4, w.13		Q6, w.13		Q10, w.13		Q4, w.26		Q6, w.26		Q10, w.26		Q4, w.52		Q6, w.52		Q10, w.52		Q4, w1.04		Q6, w1.04		Q10, w1.04	
t	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$
[min]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]
0,00		0		0		0		0		0		0		0		0		0		0		0		0
2,00	0,5	< 0.1	0,5	< 0.1	0,3	0,15	1,1	< 0.1	0,95	< 0.1	0,8	0,25	2,2	< 0.1	1,9	< 0.1	1,6	0,3	4,5	< 0.1	4,0	< 0.1	3,3	0,4
5,00	0,3	< 0.1	0,25	0,1	0,2	0,15	0,7	< 0.1	0,6	0,2	0,6	0,3	1,3	< 0.1	1,0	0,5	1,1	0,7	3,0	0,1	2,3	0,7	2,3	1,4
10,00	0,15	< 0.1	0,2	0,1	0,15	0,1	0,35	< 0.1	0,35	0,2	0,4	0,3	0,8	0,2	0,7	0,45	0,8	0,7	1,9	0,4	1,5	1,0	1,6	1,5
20,00	0,1	< 0.1	0,1	0,1	0,1	< 0.1	0,2	< 0.1	0,2	0,15	0,25	0,2	0,4	0,2	0,4	0,3	0,5	0,5	0,9	0,3	0,9	0,65	1,1	0,7
50,00	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0,1	< 0.1	0,1	0,1	0,15	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3
95,00	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1

Koncentracija na vtoku in iztoku

	delci - koncentracija 0,13%						delci - koncentracija 0,26%						delci - koncentracija 0,52%						delci - koncentracija 1,04%					
	Q4, w.13		Q6, w.13		Q10, w.13		Q4, w.26		Q6, w.26		Q10, w.26		Q4, w.52		Q6, w.52		Q10, w.52		Q4, w1.04		Q6, w1.04		Q10, w1.04	
t	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}
[min]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
0	0,24	0	0,24	0	0,24	0	0,47	0	0,47	0	0,47	0	0,94	0	0,94	0	0,94	0	1,88	0	1,88	0	1,88	0
2	0,14	< 0,03	0,14	< 0,03	0,10	0,05	0,31	< 0,03	0,27	< 0,03	0,23	0,08	0,71	< 0,03	0,63	< 0,03	0,56	0,10	1,27	< 0,03	1,15	< 0,03	0,98	0,12
5	0,10	< 0,03	0,08	0,03	0,07	0,05	0,20	< 0,03	0,17	0,07	0,17	0,10	0,49	< 0,03	0,29	0,14	0,31	0,20	0,90	0,03	0,73	0,20	0,73	0,51
10	0,05	< 0,03	0,07	0,03	0,05	0,03	0,12	< 0,03	0,12	0,07	0,11	0,10	0,23	0,07	0,20	0,13	0,23	0,20	0,63	0,11	0,54	0,29	0,56	0,54
20	0,03	< 0,03	0,03	0,03	0,03	< 0,03	0,07	< 0,03	0,07	0,05	0,08	0,07	0,11	0,07	0,11	0,10	0,14	0,14	0,26	0,10	0,26	0,19	0,31	0,20
50	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	0,03	< 0,03	0,03	0,03	0,05	0,03	0,07	0,07	0,10	0,10
95	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03

Masa delcev v rezervoarju in v usedalniku

	delci - koncentracija 0,13%						delci - koncentracija 0,26%						delci - koncentracija 0,52%						delci - koncentracija 1,04%					
	Q4, w.13		Q6, w.13		Q10, w.13		Q4, w.26		Q6, w.26		Q10, w.26		Q4, w.52		Q6, w.52		Q10, w.52		Q4, w1.04		Q6, w1.04		Q10, w1.04	
t	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$
[min]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
0	78,1	0,0	78,1	0,0	78,1	0,0	156,2	0,0	156,2	0,0	156,2	0,0	313,0	0,0	313,0	0,0	313,0	0,0	627,9	0,0	627,9	0,0	627,9	0,0
2	47,2	30,9	47,2	30,9	33,0	45,1	103,9	52,3	89,7	66,5	75,5	80,7	234,4	78,6	210,1	102,9	185,7	127,3	421,7	206,2	380,9	247,0	323,8	304,1
5	33,0	45,1	27,5	50,6	22,0	56,1	66,1	90,1	56,6	99,6	56,6	99,6	161,4	151,6	94,4	218,6	103,9	209,1	299,4	328,5	242,5	385,4	242,5	385,4
10	16,5	61,6	22,0	56,1	16,5	61,6	38,5	117,7	38,5	117,7	37,7	118,5	75,5	237,5	66,1	246,9	75,5	237,5	210,1	417,8	177,6	450,3	185,7	442,2
20	11,0	67,1	11,0	67,1	11,0	67,1	22,0	134,2	22,0	134,2	27,5	128,7	37,7	275,3	37,7	275,3	47,2	265,8	85,0	542,9	85,0	542,9	103,9	524,0
50	< 9,9	> 68,2	< 9,9	> 68,2	< 9,9	> 68,2	< 9,9	> 146,3	< 9,9	> 146,3	< 9,9	> 146,3	< 9,9	> 303,1	11,0	302,0	11,0	302,0	16,5	611,4	22,0	605,9	33,0	594,9
95	< 9,9	> 68,2	< 9,9	> 68,2	< 9,9	> 68,2	< 9,9	> 146,3	< 9,9	> 146,3	< 9,9	> 146,3	< 9,9	> 303,1	< 9,9	> 303,1	< 9,9	> 303,1	< 9,9	> 618	< 9,9	> 618	< 9,9	> 618

Gostota suspenzije na vtoku in v usedalniku

	delci - koncentracija 0,13%						delci - koncentracija 0,26%						delci - koncentracija 0,52%						delci - koncentracija 1,04%					
	Q4, w.13		Q6, w.13		Q10, w.13		Q4, w.26		Q6, w.26		Q10, w.26		Q4, w.52		Q6, w.52		Q10, w.52		Q4, w1.04		Q6, w1.04		Q10, w1.04	
t	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}
[min]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]
0	1001,4	1000,7	1001,4	1000,7	1001,4	1000,7	1002,8	1001,4	1002,8	1001,4	1002,8	1001,4	1005,7	1002,8	1005,7	1002,8	1005,7	1002,8	1011,4	1005,7	1011,4	1005,7	1011,4	1005,7
2	1000,9	nedol.	1000,9	nedol.	1000,6	1000,5	1001,9	nedol.	1001,6	nedol.	1001,4	1000,9	1004,3	nedol.	1003,8	nedol.	1003,4	1002,0	1007,7	nedol.	1006,9	nedol.	1005,9	1003,3
5	1000,6	nedol.	1000,5	1000,4	1000,4	1000,4	1001,2	nedol.	1001,0	1000,7	1001,0	1000,8	1002,9	nedol.	1001,7	1001,3	1001,9	1001,5	1005,4	1002,8	1004,4	1002,8	1004,4	1003,7
10	1000,3	nedol.	1000,4	1000,3	1000,3	1000,3	1000,7	nedol.	1000,7	1000,6	1000,7	1000,6	1001,4	1000,9	1001,2	1001,0	1001,4	1001,3	1003,8	1002,3	1003,2	1002,5	1003,4	1003,3
20	1000,2	nedol.	1000,2	1000,2	1000,2	nedol.	1000,4	nedol.	1000,4	1000,4	1000,5	1000,5	1000,7	1000,5	1000,7	1000,6	1000,9	1000,9	1001,5	1001,1	1001,5	1001,3	1001,9	1001,5
50	< 1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.	1000,2	nedol.	1000,2	1000,2	1000,3	1000,3	1000,4	1000,4	1000,6	1000,6
95	< 1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.

Povprečna koncentracija v usedalniku, učinkovitost glede na razmerje med koncentracijo na iztoku in povprečno koncentracijo suspenzije v usedalniku

	delci - koncentracija 0,13%						delci - koncentracija 0,26%						delci - koncentracija 0,52%						delci - koncentracija 1,04%					
	Q4, w.13		Q6, w.13		Q10, w.13		Q4, w.26		Q6, w.26		Q10, w.26		Q4, w.52		Q6, w.52		Q10, w.52		Q4, w1.04		Q6, w1.04		Q10, w1.04	
t	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}
[min]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
0	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00	
2	0,11	> 73,78	0,11	70,87	0,17	70,02	0,19	> 84,49	0,25	72,89	0,30	66,47	0,29	> 89,68	0,38	62,44	0,47	57,44	0,76	95,61	0,91	78,02	1,12	54,21
5	0,17	> 82,01	0,19	82,19	0,21	83,93	0,33	> 90,99	0,37	81,88	0,37	72,82	0,56	88,08	0,81	84,04	0,77	74,05	1,21	90,54	1,42	79,81	1,42	62,08
10	0,23	> 86,83	0,21	83,93	0,23	> 86,83	0,43	> 93,1	0,43	88,50	0,44	84,76	0,87	92,38	0,91	89,01	0,87	83,67	1,53	93,48	1,65	88,75	1,62	87,67
20	0,25	> 87,91	0,25	> 87,91	0,25	> 87,91	0,50	> 93,95	0,50	> 93,95	0,48	> 93,69	1,01	> 97,04	1,01	> 97,04	0,98	96,59	1,99	98,32	1,99	96,64	1,92	94,79
50	> 0,25	nedol.	> 0,25	nedol.	> 0,25	nedol.	> 0,54	nedol.	> 0,54	nedol.	> 0,54	nedol.	> 1,12	nedol.	1,11	> 97,3	1,11	> 97,3	2,23	> 98,66	2,21	> 98,65	2,17	> 98,62
95	> 0,25	nedol.	> 0,25	nedol.	> 0,25	nedol.	> 0,54	nedol.	> 0,54	nedol.	> 0,54	nedol.	> 1,12	nedol.	> 1,12	nedol.	> 1,12	nedol.	> 2,26	nedol.	> 2,26	nedol.	> 2,26	nedol.

Učinkovitost glede na koncentracijo delcev na vtoku in iztoku

	delci - koncentracija 0,13%						delci - koncentracija 0,26%						delci - koncentracija 0,52%						delci - koncentracija 1,04%					
	Q4, w.13		Q6, w.13		Q10, w.13		Q4, w.26		Q6, w.26		Q10, w.26		Q4, w.52		Q6, w.52		Q10, w.52		Q4, w1.04		Q6, w1.04		Q10, w1.04	
t	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$	η_{us}	$Fr_{d.m}$
[min]	[%]	[ ]	[%]	[ ]	[%]	[ ]	[%]	[ ]	[%]	[ ]	[%]	[ ]	[%]	[ ]	[%]	[ ]	[%]	[ ]	[%]	[ ]	[%]	[ ]	[%]	[ ]
0	100	0,060	100	0,090	100	0,150	100	0,042	100	0,064	100	0,106	100	0,030	100	0,045	100	0,075	100	0,021	100	0,032	100	0,053
2	> 79	nedol.	> 79	nedol.	50	0,326	> 90	nedol.	> 89	nedol.	64	0,191	> 96	nedol.	> 95	nedol.	82	0,107	> 98	nedol.	> 97	nedol.	88	0,078
5	> 70	nedol.	60	0,196	25	0,565	> 85	nedol.	61	0,135	42	0,273	> 94	nedol.	50	0,116	36	0,215	96	0,031	73	0,060	30	0,155
10	> 40	nedol.	50	0,240	33	0,565	> 74	nedol.	43	0,196	13	0,610	71	0,072	36	0,164	13	0,431	82	0,040	47	0,087	4	0,466
20	> 10	nedol.	0	nedol.	> 10	nedol.	> 55	nedol.	25	0,339	20	0,565	42	0,134	13	0,366	0	nedol.	61	0,074	28	0,164	36	0,215
50	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	> 10	nedol.	0	nedol.	33	0,226	0	nedol.	0	nedol.
95	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.	nedol.

Preglednica H.5: Vzorčenje pri poskusih s steklenimi kroglicami – zrnavost C

Table H.5: Sampling – experiments with glass microbeads – granulation C

Prostornina usedline za vzorce, odvzete na vtoku in iztoku

	delci - koncentracija 0,13%						delci - koncentracija 0,26%						delci - koncentracija 0,52%						delci - koncentracija 1,04%					
	Q4, w.13		Q6, w.13		Q10, w.13		Q4, w.26		Q6, w.26		Q10, w.26		Q4, w.52		Q6, w.52		Q10, w.52		Q4, w1.04		Q6, w1.04		Q10, w1.04	
t	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$	$V_{us,vtok}$	$V_{us,iztok}$
[min]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]
0		0		0		0		0		0		0		0		0		0		0		0		0
2	0,6	< 0.1	0,35	< 0.1	0,35	< 0.1	1,0	< 0.1	0,9	< 0.1	0,7	0,1	1,9	< 0.1	1,9	< 0.1	1,5	0,15	4,2	< 0.1	3,5	< 0.1	2,6	< 0.1
5	0,4	< 0.1	0,2	< 0.1	0,15	< 0.1	0,8	< 0.1	0,5	< 0.1	0,4	< 0.1	1,4	< 0.1	1,0	< 0.1	0,7	0,1	2,9	< 0.1	2,2	< 0.1	1,3	0,1
10	0,15	< 0.1	0,1	< 0.1	0,1	< 0.1	0,4	< 0.1	0,2	< 0.1	0,1	< 0.1	0,7	< 0.1	0,35	< 0.1	0,2	0,1	1,4	< 0.1	0,9	< 0.1	0,35	0,2
20	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0,1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0,2	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0,35	< 0.1	0,1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
50	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1

Koncentracija na vtoku in iztoku

	delci - koncentracija 0,13%						delci - koncentracija 0,26%						delci - koncentracija 0,52%						delci - koncentracija 1,04%					
	Q4, w.13		Q6, w.13		Q10, w.13		Q4, w.26		Q6, w.26		Q10, w.26		Q4, w.52		Q6, w.52		Q10, w.52		Q4, w1.04		Q6, w1.04		Q10, w1.04	
t	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}	c_{vtok}	c_{iztok}
[min]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
0	0,24	0	0,24	0	0,24	0	0,47	0	0,47	0	0,47	0	0,94	0	0,94	0	0,94	0	1,88	0	1,88	0	1,88	0
2	0,20	< 0,03	0,12	< 0,03	0,12	< 0,03	0,33	< 0,03	0,30	< 0,03	0,23	0,03	0,78	< 0,03	0,78	< 0,03	0,48	0,05	1,42	< 0,03	1,22	< 0,03	0,97	< 0,03
5	0,13	< 0,03	0,07	< 0,03	0,05	< 0,03	0,27	< 0,03	0,17	< 0,03	0,13	< 0,03	0,47	< 0,03	0,33	< 0,03	0,23	0,03	1,06	< 0,03	0,86	< 0,03	0,43	0,03
10	0,05	< 0,03	0,03	< 0,03	0,03	< 0,03	0,13	< 0,03	0,07	< 0,03	0,03	< 0,03	0,23	< 0,03	0,12	< 0,03	0,07	0,03	0,47	< 0,03	0,30	< 0,03	0,12	0,07
20	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	0,07	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	0,12	< 0,03	0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03
50	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03

Masa delcev v rezervoarju in v usedalniku

	delci - koncentracija 0,13%						delci - koncentracija 0,26%						delci - koncentracija 0,52%						delci - koncentracija 1,04%					
	Q4, w.13		Q6, w.13		Q10, w.13		Q4, w.26		Q6, w.26		Q10, w.26		Q4, w.52		Q6, w.52		Q10, w.52		Q4, w1.04		Q6, w1.04		Q10, w1.04	
t	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$	$m_{p,r}$	$m_{p,st}$
[min]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
0	78,1	0,0	78,1	0,0	78,1	0,0	156,2	0,0	156,2	0,0	156,2	0,0	313,0	0,0	313,0	0,0	313,0	0,0	627,9	0,0	627,9	0,0	627,9	0,0
2	66,1	12,0	38,5	39,6	38,5	39,6	110,2	46,0	99,2	57,0	77,1	79,1	257,9	55,1	257,9	55,1	160,0	153,0	471,5	156,4	406,3	221,6	322,7	305,2
5	44,0	34,1	22,0	56,1	16,5	61,6	88,1	68,1	55,1	101,1	44,0	112,2	154,4	158,6	110,2	202,8	77,1	235,9	350,6	277,3	285,6	342,3	143,4	484,5
10	16,5	61,6	11,0	67,1	11,0	67,1	44,0	112,2	22,0	134,2	11,0	145,2	77,1	235,9	38,5	274,5	22,0	291,0	154,4	473,5	99,2	528,7	38,5	589,4
20	< 9,9	> 68,2	< 9,9	> 68,2	< 9,9	> 68,2	11,0	145,2	< 9,9	> 146,3	< 9,9	> 146,3	22,0	291,0	< 9,9	> 303,1	< 9,9	> 303,1	38,5	589,4	11,0	616,9	< 9,9	> 618
50	< 9,9	> 68,2	< 9,9	> 68,2	< 9,9	> 68,2	< 9,9	> 146,3	< 9,9	> 146,3	< 9,9	> 146,3	< 9,9	> 303,1	< 9,9	> 303,1	< 9,9	> 303,1	< 9,9	> 618	< 9,9	> 618	< 9,9	> 618

Gostota suspenzije na vtoku in v usedalniku

	delci - koncentracija 0,13%						delci - koncentracija 0,26%						delci - koncentracija 0,52%						delci - koncentracija 1,04%					
	Q4, w.13		Q6, w.13		Q10, w.13		Q4, w.26		Q6, w.26		Q10, w.26		Q4, w.52		Q6, w.52		Q10, w.52		Q4, w1.04		Q6, w1.04		Q10, w1.04	
t	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}	ρ_{vtok}	ρ_{tank}
[min]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]
0	1001,4	1000,7	1001,4	1000,7	1001,4	1000,7	1002,8	1001,4	1002,8	1001,4	1002,8	1001,4	1005,7	1002,8	1005,7	1002,8	1005,7	1002,8	1011,4	1005,7	1011,4	1005,7	1011,4	1005,7
2	1001,2	nedol.	1000,7	nedol.	1000,7	nedol.	1002,0	nedol.	1001,8	nedol.	1001,4	1000,8	1004,7	nedol.	1004,7	nedol.	1002,9	1001,6	1008,6	nedol.	1007,4	nedol.	1005,9	nedol.
5	1000,8	nedol.	1000,4	nedol.	1000,3	nedol.	1001,6	nedol.	1001,0	nedol.	1000,8	nedol.	1002,8	nedol.	1002,0	nedol.	1001,4	1000,8	1006,4	nedol.	1005,2	nedol.	1002,6	1001,4
10	1000,3	nedol.	1000,2	nedol.	1000,2	nedol.	1000,8	nedol.	1000,4	nedol.	1000,2	nedol.	1001,4	nedol.	1000,7	nedol.	1000,4	1000,3	1002,8	nedol.	1001,8	nedol.	1000,7	1000,6
20	< 1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.	1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.	1000,4	nedol.	< 1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.	1000,7	nedol.	1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.
50	< 1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.	< 1000,2	nedol.

Povprečna koncentracija v usedalniku, učinkovitost glede na razmerje med koncentracijo na iztoku in povprečno koncentracijo suspenzije v usedalniku

	delci - koncentracija 0,13%						delci - koncentracija 0,26%						delci - koncentracija 0,52%						delci - koncentracija 1,04%					
	Q4, w.13		Q6, w.13		Q10, w.13		Q4, w.26		Q6, w.26		Q10, w.26		Q4, w.52		Q6, w.52		Q10, w.52		Q4, w1.04		Q6, w1.04		Q10, w1.04	
t	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}	$c_{povp,st}$	ξ_{st}
[min]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
0	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00	
2	0,04	> 32,6	0,15	> 79,51	0,15	> 79,51	0,17	> 82,37	0,21	> 85,78	0,29	88,60	0,20	> 85,29	0,20	> 85,29	0,56	91,15	0,58	> 94,8	0,82	> 96,33	1,12	> 97,33
5	0,13	> 76,2	0,21	> 85,54	0,23	> 86,83	0,25	> 88,08	0,37	> 91,97	0,41	> 92,76	0,59	> 94,87	0,75	> 95,99	0,87	96,16	1,02	> 97,06	1,26	> 97,62	1,78	98,12
10	0,23	> 86,83	0,25	> 87,91	0,25	> 87,91	0,41	> 92,76	0,50	> 93,95	0,54	> 94,4	0,87	> 96,55	1,01	> 97,03	1,07	96,89	1,74	> 98,27	1,94	> 98,45	2,15	96,91
20	> 0,25	nedol.	> 0,25	nedol.	> 0,25	nedol.	0,54	> 94,4	> 0,54	nedol.	> 0,54	nedol.	1,07	> 97,2	> 1,12	nedol.	> 1,12	nedol.	2,15	> 98,61	2,25	> 98,67	> 2,26	nedol.
50	> 0,25	nedol.	> 0,25	nedol.	> 0,25	nedol.	> 0,54	nedol.	> 0,54	nedol.	> 0,54	nedol.	> 1,12	nedol.	> 1,12	nedol.	> 1,12	nedol.	> 2,26	nedol.	> 2,26	nedol.	> 2,26	nedol.

PRILOGA I: FIZIKALNE LASTNOSTI VODE PRI RAZLIČNIH TEMPERATURAH

APPENDIX I: PHYSICAL PROPERTIES OF WATER AT DIFFERENT TEMPERATURES

Preglednica I.1: Fizikalne lastnosti vode (povzeto po Brater et al., 1996)

Table I.1: Physical properties of water (source: Brater et al., 1996)

Temperatura [°C]	Gostota [kg/m^3]	Dinamična viskoznost [N s/m^2]	Površinska napetost [N/m^2]
0	0,9999	0,00179	0,0756
4	1,0000	0,00157	0,0750
10	0,9997	0,00131	0,0743
15	0,9990	0,00113	0,0735
21	0,9980	0,00098	0,0727
27	0,9966	0,00086	0,0718
38	0,9931	0,00068	0,0700
93	0,9630	0,00030	0,0601