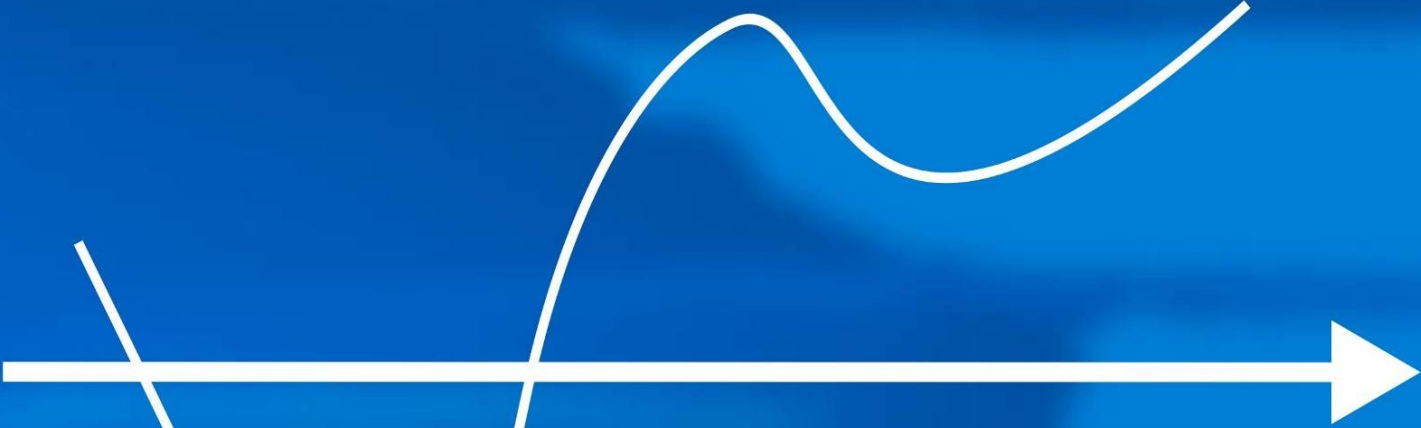




Võru linnas üleujutusohu riskide maandamine

Lõpparuanne

Tellijä: Võru Linnavalitsus

Projekti nr 4.01.19-0008

Hankelepingu nr 658

Riia, jaanuar 2022

Procesu analīzes un izpētes centrs



SISUKORD

1	SISSEJUHATUS.....	3
2	SEIRE.....	4
2.1	Seirepunktid.....	4
2.2	Seire ulatus.....	7
2.3	Elektrooniliselt esitatud andmed.....	18
3	VÄLITÖÖD.....	19
3.1	Sügis 2020.....	19
3.2	Suvi 2021.....	25
3.2.1	Sissejuhatus.....	25
3.2.2	Külastatud vaatluskohad.....	25
3.2.3	Välitööde kokkuvõte.....	41
3.3	Sügis 2021.....	42
3.3.1	Sissejuhatus.....	42
3.3.2	Külastatud vaatluskohad.....	42
3.3.3	Välitööde järelused.....	62
4	HÜDROLOOGILINE MUDEL.....	63
4.1	Mudel ja sisendandmed.....	63
4.2	Mudeli kalibreerimine.....	65
4.3	Mudeli valideerimine.....	67
4.4	Hüdroloogilise mudeli kasutamine.....	69
4.5	Üleujutuste esinemistõenäosuse arvutus.....	70
5	HÜDRODÜNAAMILINE MUDEL.....	73
5.1	Hüdrodünaamilise mudeli seadistamine.....	73
5.2	Taimestiku ja Paidra paisu mõju hindamine.....	77
5.2.1	Paidra pais.....	77
5.2.2	Taimkatte mõju.....	80
5.3	Hüdrodünaamilise mudeli kalibreerimine.....	83
6	MODELLEERIMINE.....	87
6.1	Baasstsenaarium (algsituatsioon).....	87
6.2	Üleujutusi leevendavate meetmete modelleerimine.....	92
6.2.1	Paidra paisu eemaldamine.....	92
6.2.2	Taimestiku eemaldamine.....	92
6.2.3	Süvendamine.....	94
6.2.4	Vagula ja Tamula järvede ühendamine.....	96
6.2.5	Muutused üleujutusohuga aladel.....	99
7	LEEVENDAVATE MEETMETE SOOVITUSED.....	100
7.1	Üleujutuste põhjused.....	100
7.2	Üleujutuste leevendamise üldpõhimõtted.....	100
7.3	Alternatiivsete lahenduste maksumused.....	105
7.4	Eelistatud lahenduse eelprojekt.....	106
8	ÜLEUJUTUSTE LEEVENDAMISE KAVA.....	107
8.1	Veetaseme reguleerimine.....	107
8.1.1	Üleujutus esinemistõenäosusega üks kord 10 aasta jooksul.....	107
8.1.2	Aasta 2010.....	109
8.1.3	Üleujutus augustis, esinemistõenäosusega üks kord 10 aasta jooksul.....	112
8.1.4	Veetaseme reguleerimise stsenaariumite kokkuvõte.....	112
8.2	Üleujutuste leevendamise organisatoorne korraldus.....	114

1 SISSEJUHATUS

Käesolev lõpparuanne on koostatud 1. oktoobril 2020 Võru Linnavalitsuse (Tellija) ja SIA „Procesu analīzes un izpētes centrs” (Konsultant) (koostöös Estonian, Latvian & Lithuanian Environment OÜ-ga) vahel sõlmitud hankelepingu nr 658 “Võru linnas üleujutusohu riskide maandamine” (projekti nr 4.01.19-008) raames.

Lepingu eesmärk on pakkuda nõustamisteenust Võru linna üleujutusrisiki maandamiseks.

Leping ja teostatud töö sisaldab järgnevat:

1. Veetasemete ja vooluhulkade mõõtmised 12 kuu jooksul.
 - a. Mõõtmiste tulemusi on kokkuvõtvalt kirjeldatud peatükis 2. Kõik mõõtmiste tulemused on lisas 1 (esitatud elektrooniliselt).
 - b. Välitööde kokkuvõte on peatükis 3.
2. Hüdroloogiliste ja hüdrodünaamiliste mudelite koostamine ja nende kasutamine üleujutuste leevendamise võimalike alternatiivsete lahenduste analüüsimiseks; parima alternatiivi valik.
 - a. Hüdroloogilise mudeli koostamine ja kalibreerimine on kirjeldatud peatükis 4.
 - b. Hüdrodünaamilise mudeli koostamine ja kalibreerimine on kirjeldatud peatükis 5.
 - c. Peatükis 6 on esitatud modelleeritud baasstsenaarium ja üleujutuse leevendusmeetmete stsenaariumid. Teostatud on üleujutusohu kaardistamine kõigi stsenaariumite kohta. Üleujutuste kaardid (kaardikihid) on esitatud eraldi elektrooniliselt.
3. Eelistatud alternatiivile eelprojekti koostamine.
 - a. Eelistatud üleujutuste leevendamise lahendus on kirjeldatud alapeatükis 7.1.
 - b. Üleujutuste leevendamise eelistatud lahenduse eelprojekt ja hinnakalkulatsioon on esitatud aruande lisana.
4. Üleujutusohu leevendamise analüüs ja kava on esitatud peatükis 8.

Käesolev aruanne täiendab vahearuannet PAIC (2021), mis kajastas 2021. aasta augusti seisuga teostatud töid. Vahearuandes oli seire kirjeldus peatükis 2, hüdroloogilise mudeli väljatöötamine ja kalibreerimine peatükis 3 ning hüdrodünaamilise mudeli väljatöötamine ja kalibreerimine peatükis 4.

2 SEIRE

2.1 Seirepunktid

Seire alguses leppisid Konsultant ja Tellija kokku mõõtmispunktide ruumilises jaotuses.

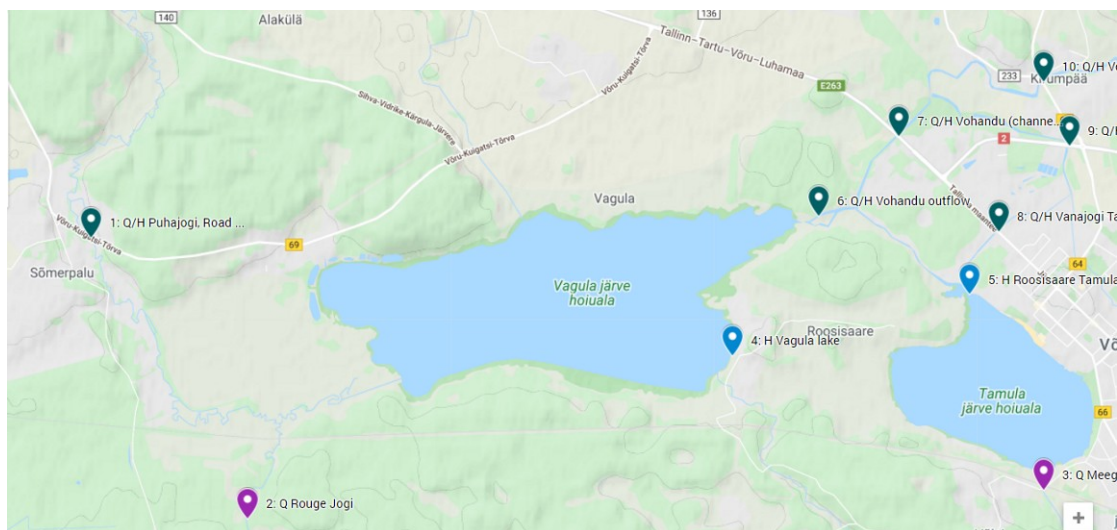
Pärast esmast asukohakülastust ja Võru veetrasside analüüsi, tegi “SIA Procesi analizes un izpētes centrs” ettepaneku algses lähteülesandes esitatud seirepunktide asukohtade muutmiseks. Ettepanekud muudetud seirepunktideks on kirjeldatud alljärgnevalt ning ülevaatlilikult esitatud alloleval joonisel (joonis 2.1.1) ja tabelis 2.1.1.

1. Lähteülesande seirepunkt 1.

Seirepunkt on vajalik Vagula järve sissevoolu seiramiseks. Konsultandi ettepanek oli antud punkt jaotada kaheks seirepunktiks – üks punkt Pühajõel (joonisel punkt 1, tee nr 69 asuva silla läheduses) ja üks punkt Rõuge jõel (punkt 2, allavoolu tee nr 67 sillast). Antud jaotuse eesmärk on arvestada eraldi vooluhulkasid kahel erineval modelleerimiseks vajalikul valgalal.

2. Lähteülesande seirepunkt 2.

Seirepunkt on vajalik, et seirata Vagula järve väljavoolu. Punkti asukoht ei muutunud (punkt 6).



Joonis 2.1.1. Ettepanekud mõõtmispunktide 1-10 asukohtadele

3. Lähteülesande seirepunkt 3.

Seirepunkt on vajalik, et seirata Tamula järve sissevoolu Meegomäe oja kaudu. Punkti asukoht ei muutunud (punkt 3).

4. Lähteülesande seirepunkt 4.

Seirepunkt on vajalik, et seirata Vahejõe vooluhulka. Konsultandi ettepanek oli see punkt jätta uuringust välja, kuna: (1) kuigi seirepunkti 4 juurde viib tee, pole antud tee talvel eeldatavalt läbitav; (2) Vahejõe kaldad on mudased ja madalad, jõesäng pole selge vormiga ning on eeldatavalt suurvee ajal üle ujutatud. Konsultandi ettepanek oli arvutada eeldatav vooluhulk punktide 3, 6, 7, 8 vooluhulkade mõõtmiste ja punkti 5 veetaseme põhjal.

5. Lähteülesande seirepunkt 5.

Seirepunkt on vajalik et seirata Vanajõe vooluhulka. Ettepanek oli muuta punkti asukohta (punkt 8, sild Vanajõel, Tallinna maanteel). Asukoha muutus võimaldab paremat aastaringset ligipääsu Vanajõe vooluhulga mõõtmiseks.

6. Lähteülesande seirepunkt 6.

Seirepunkt on vajalik, et seirata Koreli oja vooluhulka. Konsultandi ettepanek oli muuta selle asukohta (Punkt 9, Koreli oja sild Teel nr 2). Asukoha muutus võimaldab paremat ligipääsu. Koreli oja vooluhulka on võimalik arvutada punktide 8 ja 9 seiretulemuste põhjal.

7. Lähteülesande seirepunkt 7.

Punkt on vajalik, et seirata Võhandu jõe vooluhulka. Asukoht ei muutunud (punkt 10).

8. Lähteülesande seirepunkt 8.

Punkt on vajalik, et seirata Võhandu jõe vooluhulka. Asukoht ei muutunud (punkt 11).

Tabel 2.1.1. Kokkuvõtte algsete ja muudetud seirepunktide kohta

Muudetud seirepunkt	Lähteülesande seirepunkt	Seirekoha nimi	Seiratavad näitajad, Q - vooluhulk, H - veetase
1	1 – jaotatud	Pühajõgi Q	QH
2	1 – jaotatud	Rougejogi Q	Q
3	3	Meegomae Oja Q	Q
4	UUS	Vagula H	H
5	UUS	Tamula H	H
6	2	Vagula väljavool Q	QH
7	(4) – asendatud	Võhandu kanal Q	QH
8	5 – asendatud	Vanajõgi Q	QH
9	6 – asendatud	Koreli Oja Q	QH
10	7	Võhandu Kirumpää Q	QH
11	8	Võhandu Kääpa H	QH

9. Lisaseirepunktid

Konsultandi ettepanek oli võtta kasutusele ka lisaseirepunkte, mis on vajalikud matemaatilise mudeli kalibreerimiseks ja mida polnud lähteülesandes kajastatud.

Seirepunkt 4 on vajalik Vagula veetaseme seiramiseks. Asub järve rannas. See lisapunkt polnud konsultandi jaoks kohustuslik, kuna vajalikud andmed võib saada ka punktist 6.

Seirepunkt 5 on vajalik Tamula veetaseme seiramiseks. Asub Roosisaare sillal. See lisapunkt on vajalik.

Seirepunkt 7 on vajalik, et seirata Võhandu jõe vooluhulka. Asub Võhandu jõel oleva silla läheduses. See lisapunkt on vajalik ning ettepanek oli sellega asendada lähteülesande seirepunkti 4. Ühe antud seirepunkti (lähteülesande seirepunkt 4 või konsultandi ettepaneku lisapunkt 7) andmeid on vaja. Konsultandi ettepanek oli lisada juurde punkt 7, kuna asukoha külastus andis alust eeldada, et sealt saadavad andmed on suurema täpsusega. Lisaks on antud seirepunktile parem ligipääs.

KOKKUVÕTE:

Konsultandi ettepanek oli moodustada 11 mõõtmispunkti lähteülesandes toodud 8 asemel, millest:

- 2 punkti muutub lähteülesande punkti 1 jagamisel kaheks;
- 2 punkti on uued punktid järvede veetaseme seiramiseks;
- 1 punkt liigutatakse jõe ühelt harult teisele (Võhandu jõgi, Vahejõe asemel);
- 2 punkti liigutatakse parema ligipääsu tõttu;
- 4 punkti vastavad lähteülesandes määratud punktidele.

2.2 Seire ulatus

Alates 2020. novembrist teostatud seire on kokkuvõtvalt esitatud Tabelis 2.2.1.

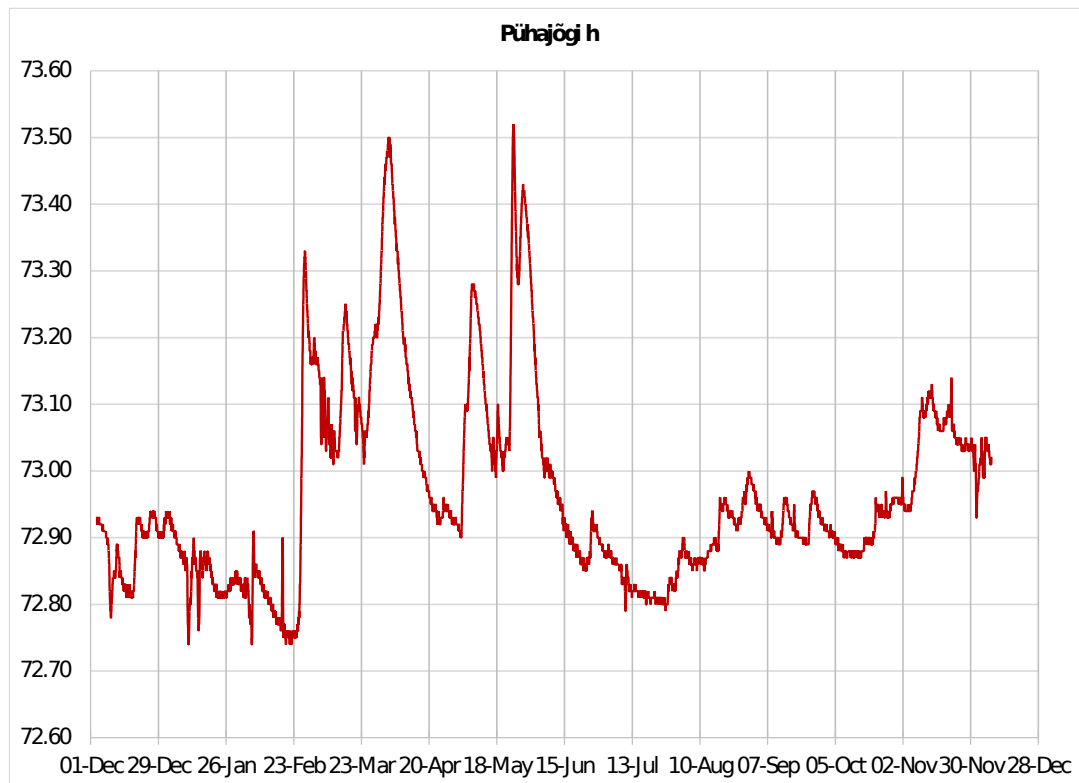
Mõõtmiste tulemused on lisatud elektrooniliselt.

Tabel 2.2.1. Seire ulatus

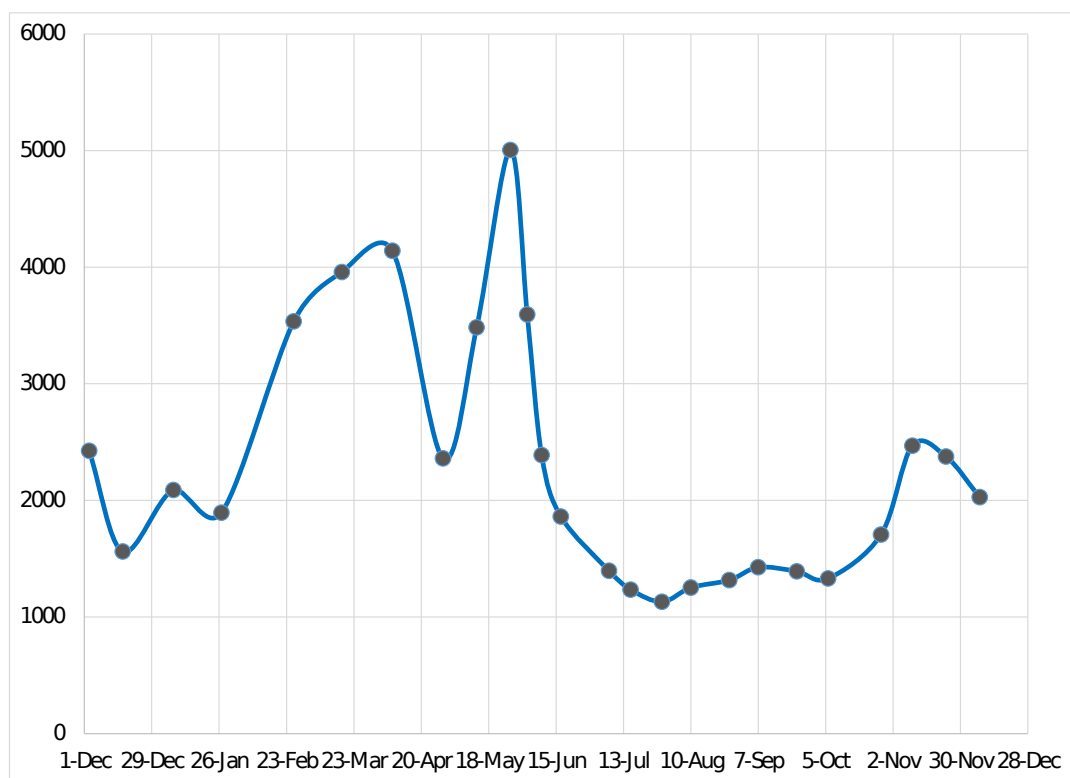
Punkt/Nimi	Para-meeter ¹	Algus-kuupäev	Lõpp-kuupäev	Kommentaar
1 Pühajõgi	H	3. dets 2020	8. dets 2021	Tunni kaupa andmed
1 Pühajõgi	Q	3. dets 2020	8. dets 2021	25 seirekampaaniat
2 Rõuge jõgi	Q	8. dets 2020	24. nov 2021	23 seirekampaaniat (veebruari ja detsembri 2021 andmed puuduvad jää tõttu)
3 Meegomäe oja	Q	8. dets 2020	8. dets 2021	25 seirekampaaniat
5 Roosisaare	H	1.nov 2020	30. nov 2021	Tunni kaupa andmed
6 Vagula väljavool	H	7. dets 2020	8. dets 2021	Tunni kaupa andmed
6 Vagula väljavool	Q	3. dets 2020	8. dets 2021	25 seirekampaaniat
7 Võhandu kanal	H	9. dets 2020	8. dets 2021	Tunni kaupa andmed, puudub ajavahemik 28. aprill - 13. mai (sensor varastatud)
7 Võhandu kanal	Q	8. dets 2020	8. dets 2021	25 seirekampaaniat
8 Vanajõgi	H	7. dets 2020	8. dets 2021	Tunni kaupa andmed
8 Vanajõgi	Q	8. dets 2020	24. nov 2021	24 seirekampaaniat (detsembri 2021 andmed puuduvad jää tõttu)
9 Koreli oja	H	9. dets 2020	8. dets 2021	Tunni kaupa andmed
9 Koreli oja	Q	7. dets 2020	24. nov 2021	24 seirekampaaniat (detsembri 2021 andmed puuduvad jää tõttu)
10 Võhandu Kirumpää	H	1. nov 2020	30. nov 2021	Tunni kaupa andmed
10 Võhandu Kirumpää	Q	1. nov 2020	30. nov 2021	Tunni kaupa andmed
11 Võhandu Kääpa	H	9. dets 2020	8. dets 2021	Tunni kaupa andmed
11 Võhandu Kääpa	Q	8. dets 2020	24. nov 2021	24 seirekampaaniat (detsembri 2021 andmed puuduvad jää tõttu)

¹ Q -vooluhulk, H - veetase

Punktides 5 ja 10 viis seiret läbi Keskkonnaagentuur, ülejäänud punktides Eesti Keskkonnauuringute Keskus (EKUK).



Joonis 2.2.1. Mõõdetud veetasemed (m) punktis 1, Pühajõgi.



Joonis 2.2.2. Mõõdetud vooluhulgad (l/s) punktis 1, Pühajõgi.

Mõõdetud veetasemed ja vooluhulgad punktis 1 (Pühajõgi) on esitatud joonistel 2.2.1-2.2.2. Hüdrograaf näitab kevadisi lumesula tulvaveesid, vihmasadusid mai lõpus ja juuni alguses ja suurenenud sademete hulka sügisel. Üldiselt on hüdrograaf tüüpiline väikeste jõgede kohta samal laiuskraadil, kus vihmahood on veetaseme muutumise graafikul selgelt eristatavad.

Rõuge jõe vooluhulkade mõõtmiste tulemused on joonisel 2.2.3. See hüdrograaf on väiksemate vooluhulkadega, kuid sarnane joonisega 2.2.2.

Mõõdetud vooluhulgad Meegomäe oja truubi juures on joonisel 2.2.4. See hüdrograaf on väiksemate vooluhulkadega, kuid sarnane joonistega 2.2.2 ja 2.2.3.

Veetaseme muutumine Roosisaare silla juures on joonisel 2.2.5. Siin on kevadised lumesulamise tulvaveed vähem märgatavad. Veetase tõuseb mais ja jääb kõrgeks läbi suve kuni septembri lõpuni.

Veetaseme muutumine Vagula järve väljavoolus on joonisel 2.2.6. Veetaseme kõikumised on laial ja madalal lõigul väikesed – vaid 40 cm. Kõige kõrgemad veetasemed tulenevad kevadistest suurvetest ning vihmasadudest mai lõpus ja sügisel, aga ka suvel. Suvine veetaseme tõus algab alles juuli lõpus ja kestab septembri lõpuni. Vooluhulk Vagula järvest (joonis 2.2.7) on kõrgeim kevadel ja mai lõpus ning madalaim suvel juuni lõpust oktoobri lõpuni.

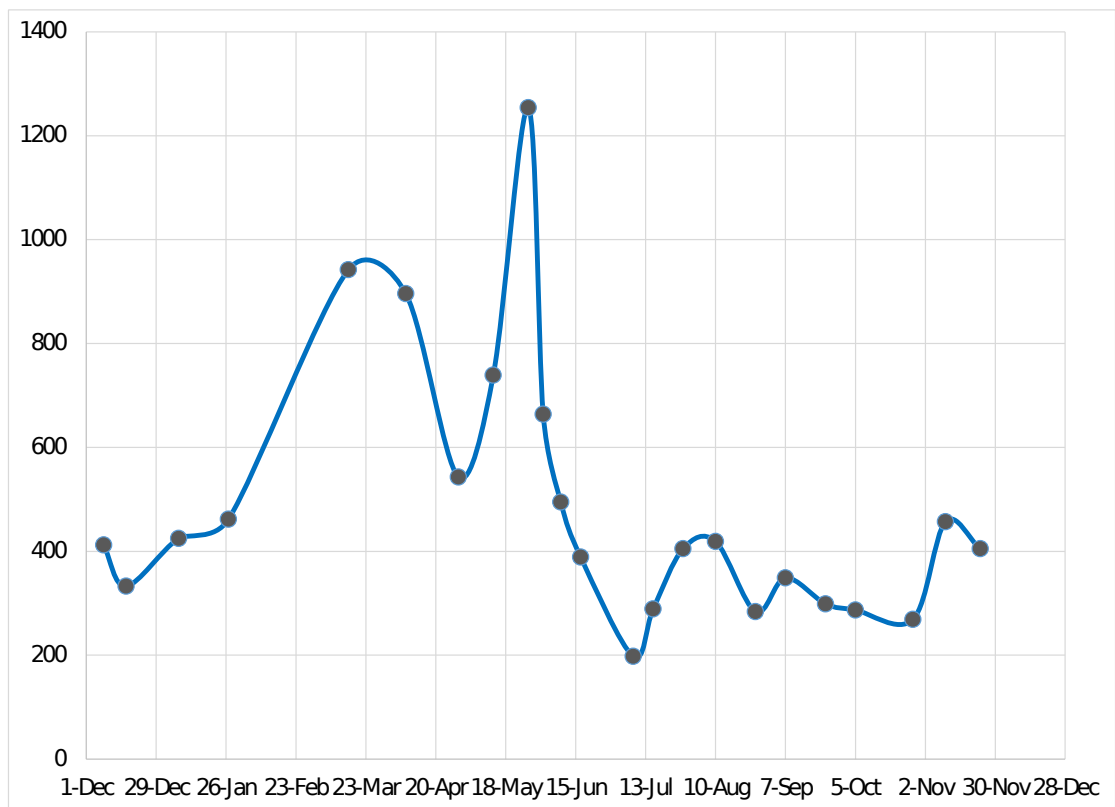
Veetaseme muutumine Liitva kanalis (Võhandu kanalis) on joonisel 2.2.8. See sarnaneb veetaseme muutumise graafikule Roosisaarel, kaasa arvatud veetaseme muutumise amplituudi poolest (80-90 cm). Veetase kanalis on umbes 10 cm madalam veetasemest Roosisaarel. Vooluhulk Liitva kanalis on joonisel 2.2.9. Vooluhulk järgib Vagula järve väljavoolu, millest 75-85% läheb läbi Liitva kanali, seega Vahejõe vooluhulk on sellest 15-25%.

Veetaseme muutumine Vanajões on esitatud joonisel 2.2.10 ja see järgib veetaseme muutumise mustrit Roosisaarel. Vooluhulga aegrida näitab selgelt suvist kuivaperioodi. Vooluhulk on kõrge lume sulamisest kuni juuni alguseni, mis viitab Tamula järve väljavoolu mõjule.

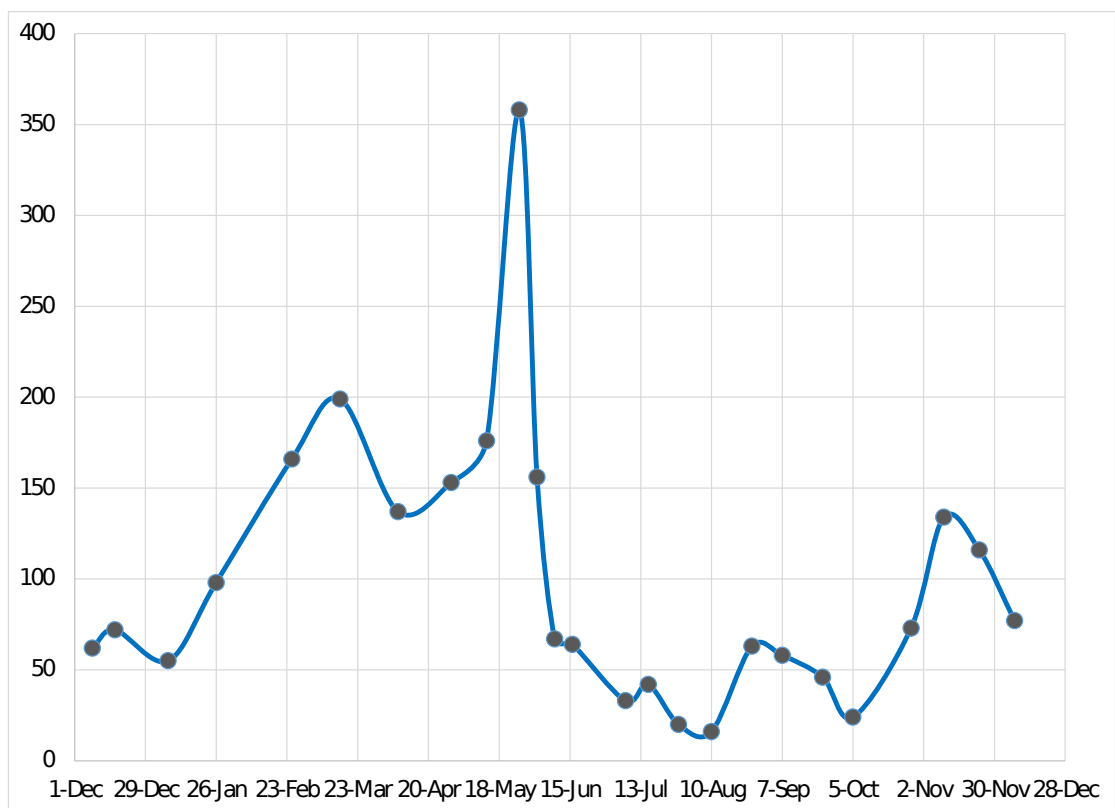
Veetase Koreli ojas (joonis 2.2.12) järgib sama mustrit, mis Roosisaarel, Vanajões ja Liitva kanalis, kuid erinev on kõrgem veetase juulis. See võib viidata rohkemale taimkattele jõepõhjas. Vooluhulkade muutumine (joonis 2.2.13) on sarnane teistele mõõtepunktidele, mis asuvad järvedest allavoolu.

Kirumpää veetasemed on esitatud joonisel 2.2.14. Joonis jälgib sama seaduspära, mis Roosisaarel, kuid rohkem eristatavate tõusudega talvel, mis on põhjendatav jääoludega. Veetase on suhteliselt kõrge juulis ja augustis, mida võib põhjustada rohke taimkate. Kirumpää vooluhulk (joonis 2.2.15) on Liitva kanali ja Koreli oja vooluhulkade summa.

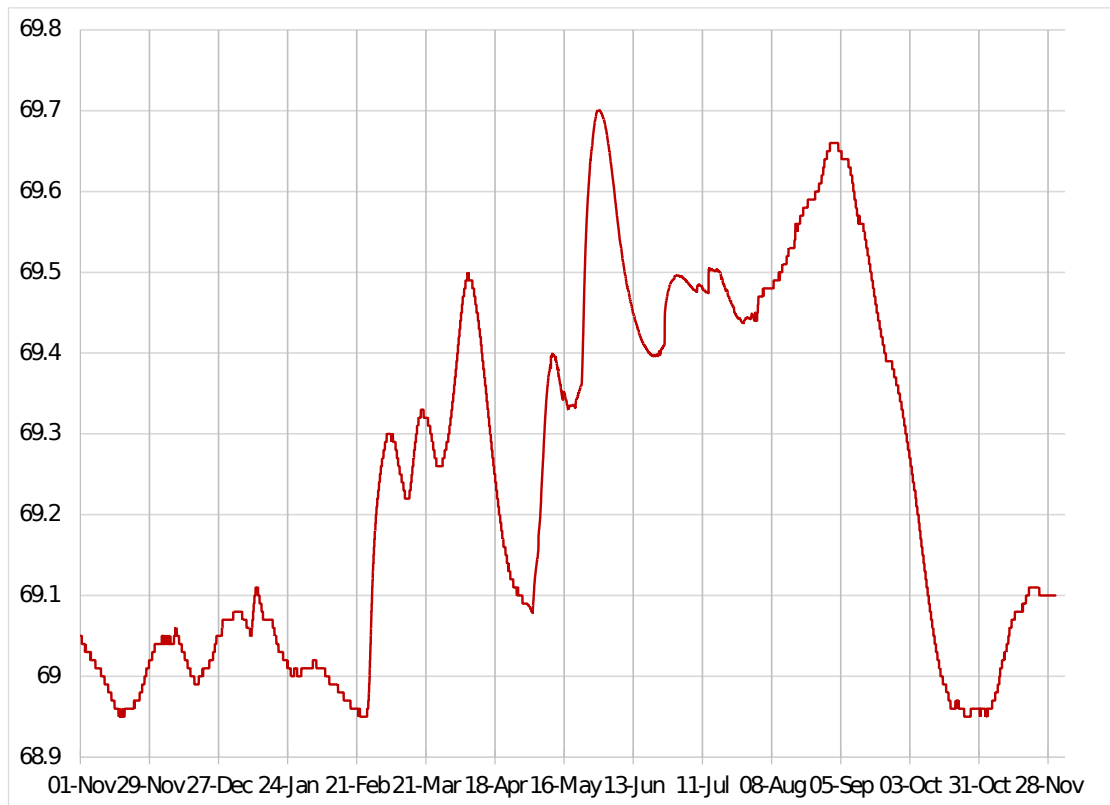
Mõõdetud veetasemed ja vooluhulgad Võhandu jõel Kääpa silla juures on joonistel 2.2.16-2.2.17.



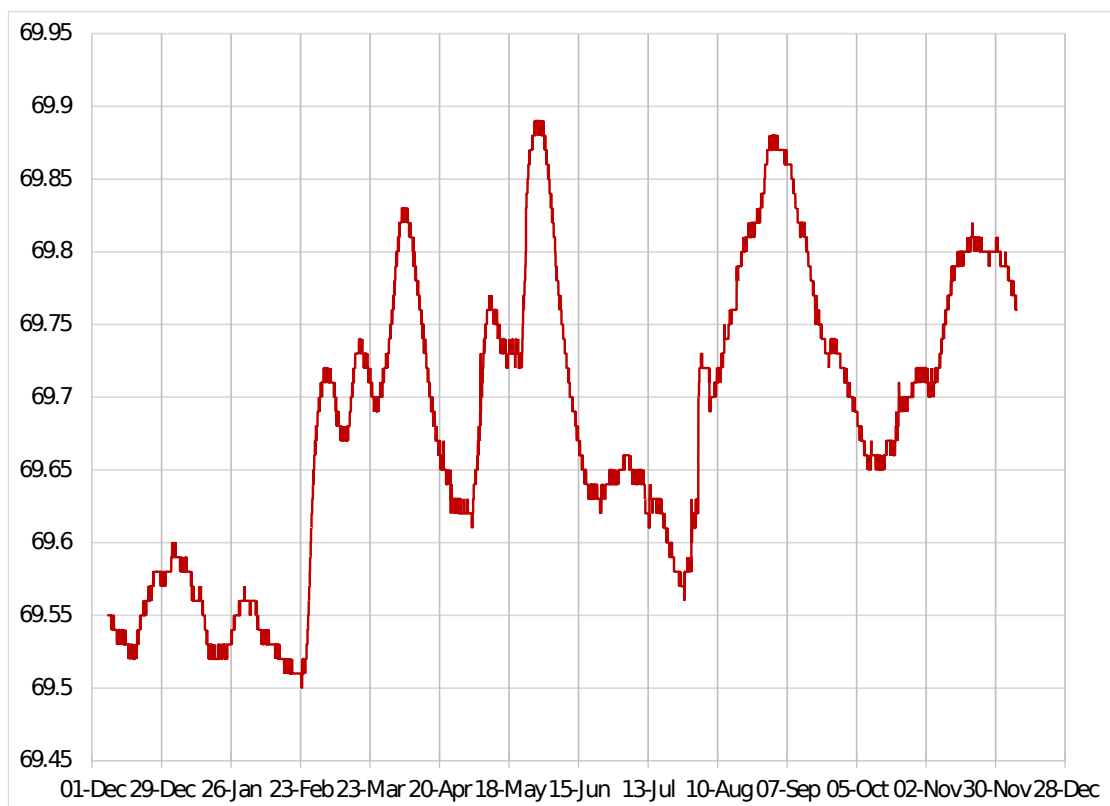
Joonis 2.2.3. Mõõdetud vooluhulgad (l/s) punktis 2, Rõuge jõgi.



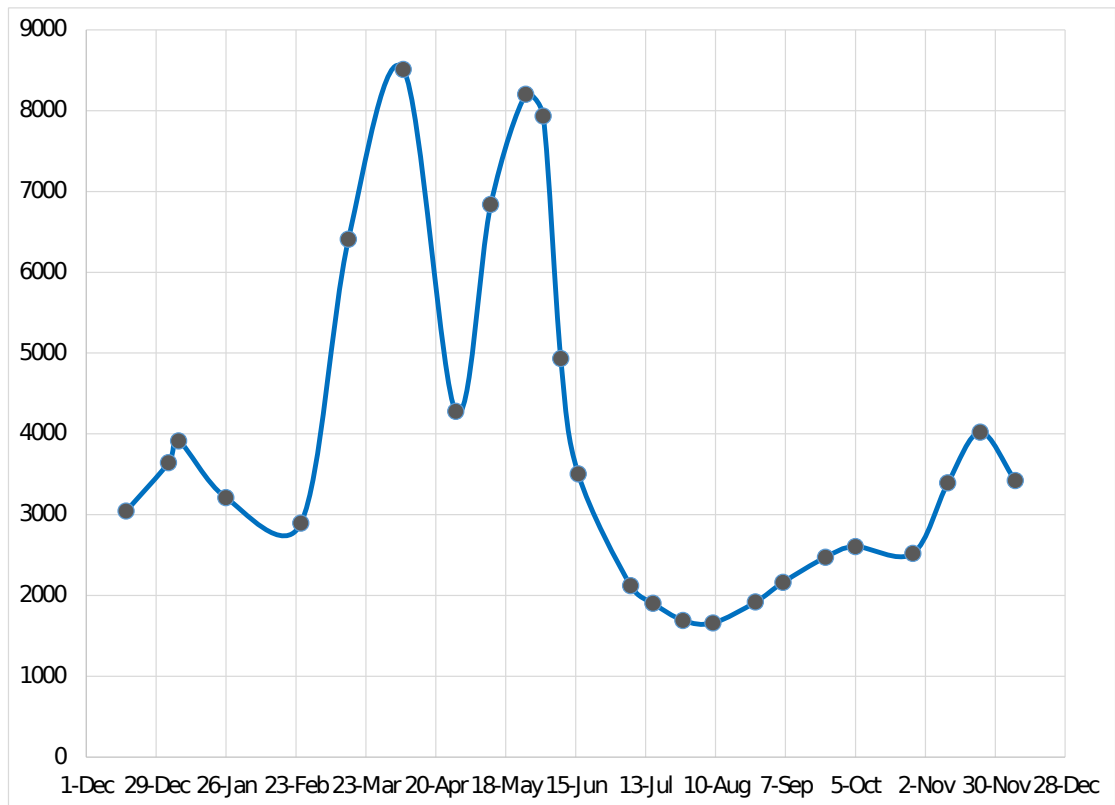
Joonis 2.2.4. Mõõdetud vooluhulgad (l/s) punktis 3, Meegomäe oja.



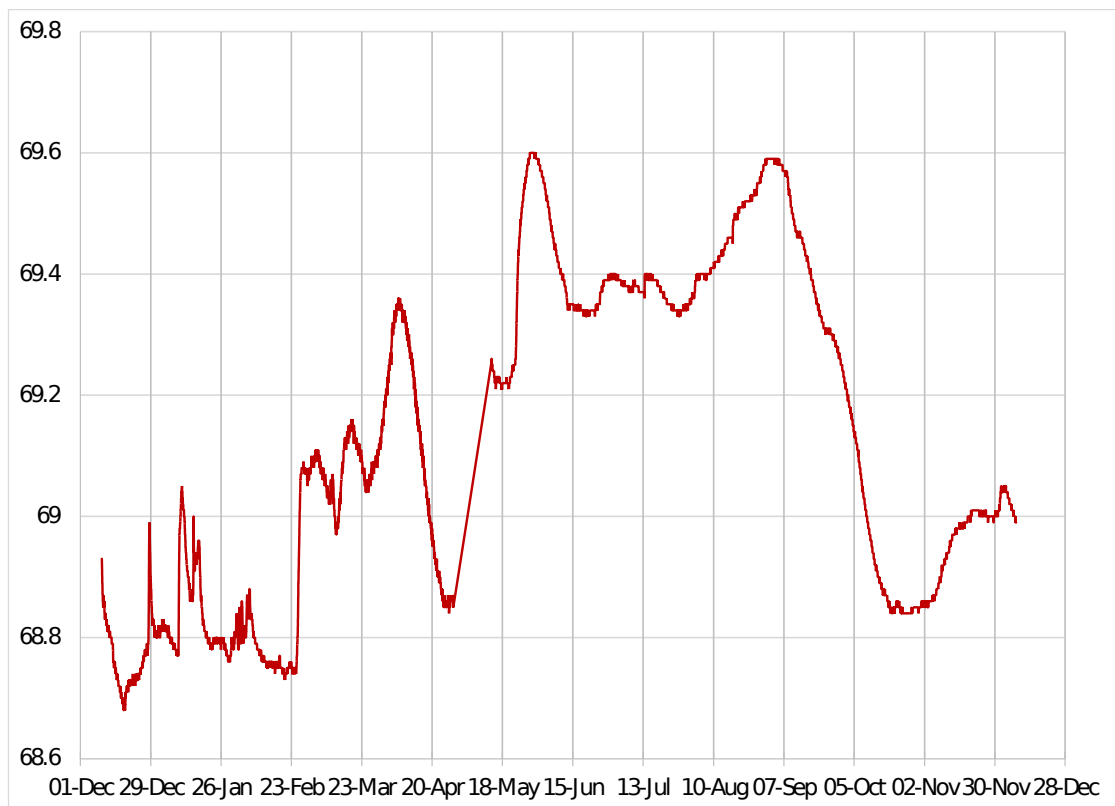
Joonis 2.2.5. Mõõdetud veetasemed (m) punktis 5, Roosisaare.



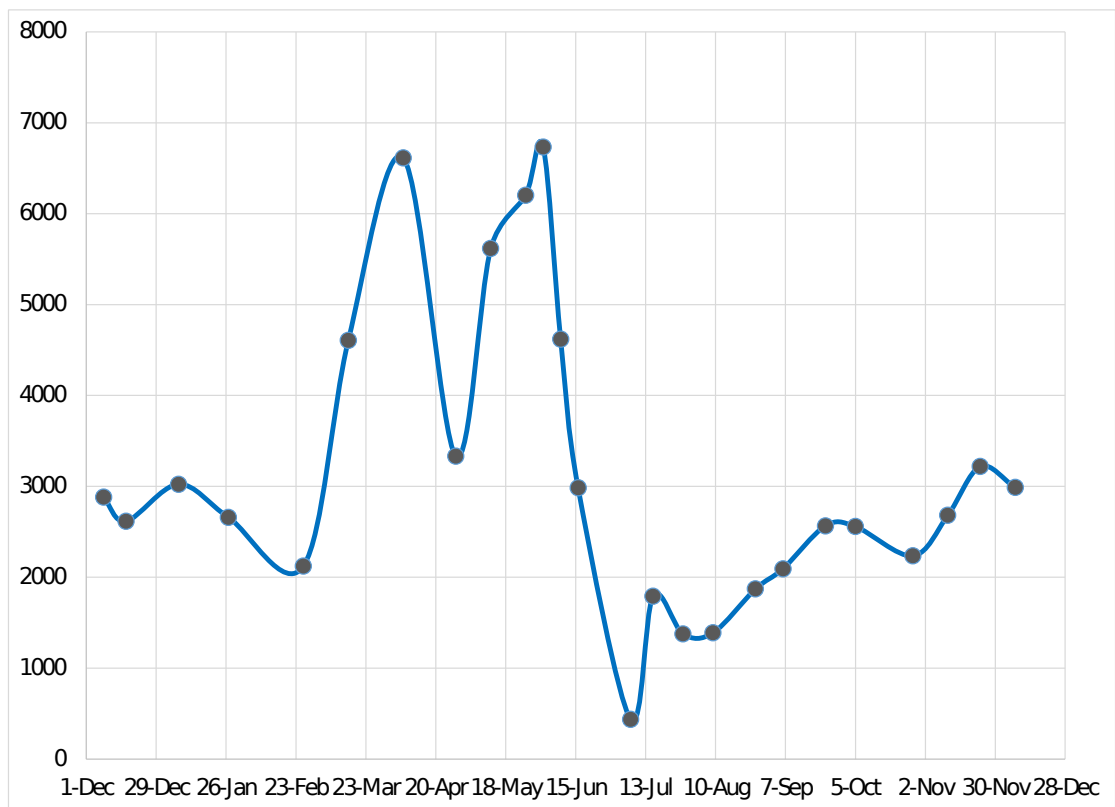
Joonis 2.2.6. Mõõdetud veetasemed (m) punktis 6, Vagula järve väljavool.



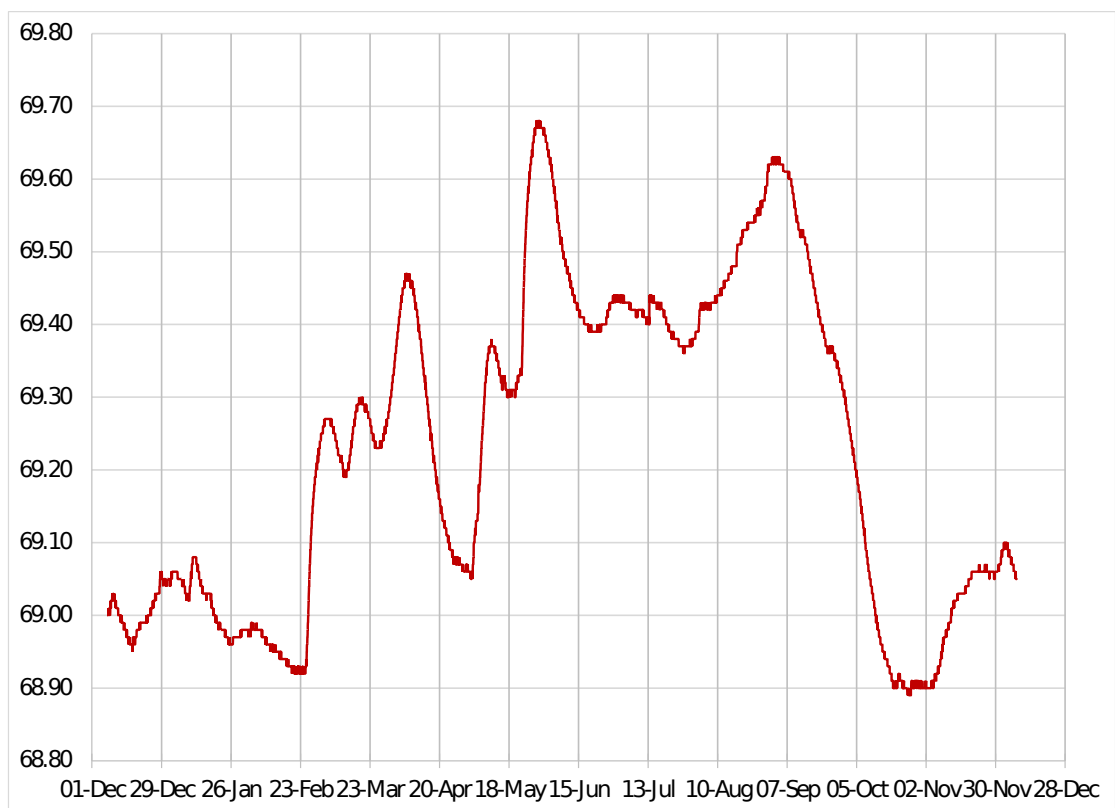
Joonis 2.2.7. Mõõdetud vooluhulgad (l/s) punktis 6, Vagula järve väljavool.



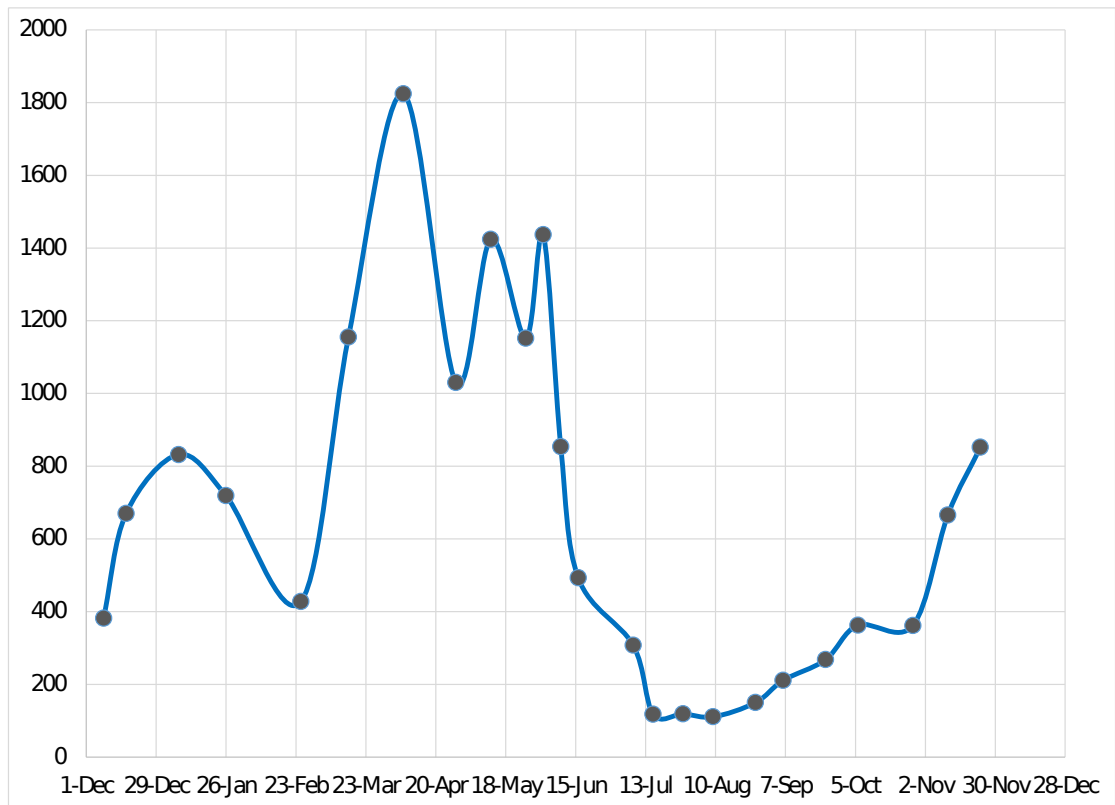
Joonis 2.2.8. Mõõdetud veetasemed (m) punktis 7, Võhandu kanal.



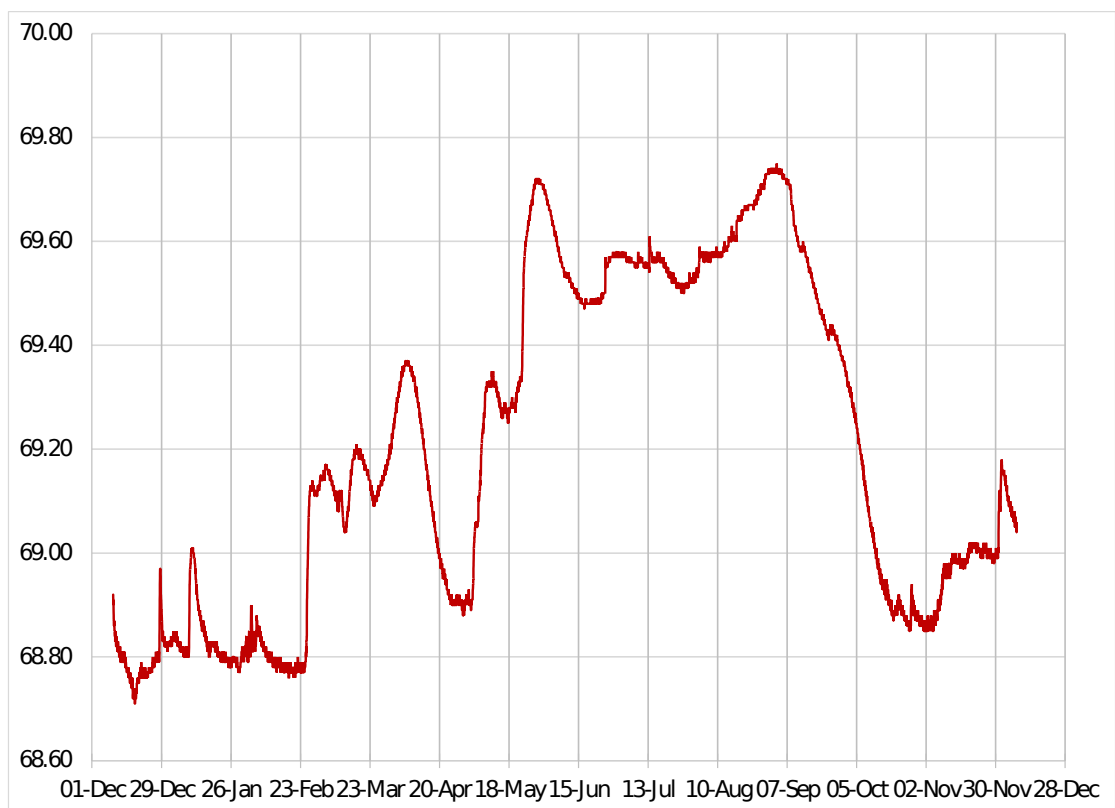
Joonis 2.2.9. Mõõdetud vooluhulgad (l/s) punktis 7, Võhandu kanal.



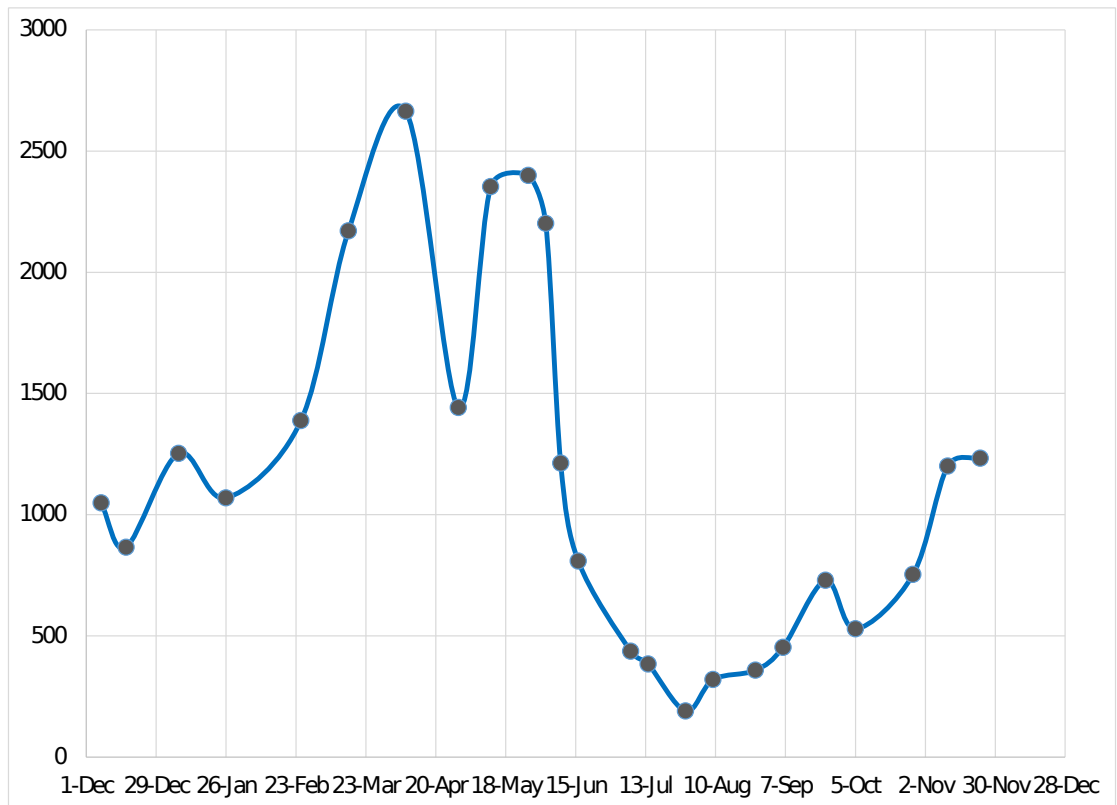
Joonis 2.2.10. Mõõdetud veetasemed (m) punktis 8, Vanajõgi.



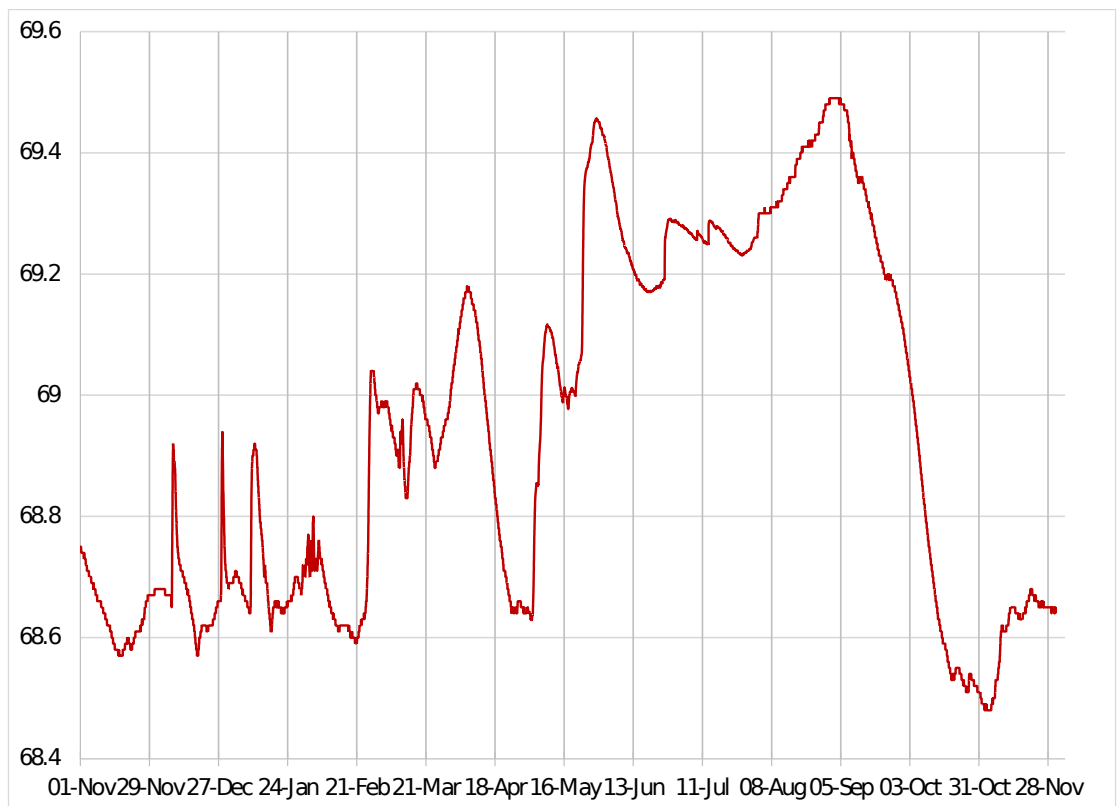
Joonis 2.2.11. Mõõdetud vooluhulgad (l/s) punktis 8, Vanajõgi.



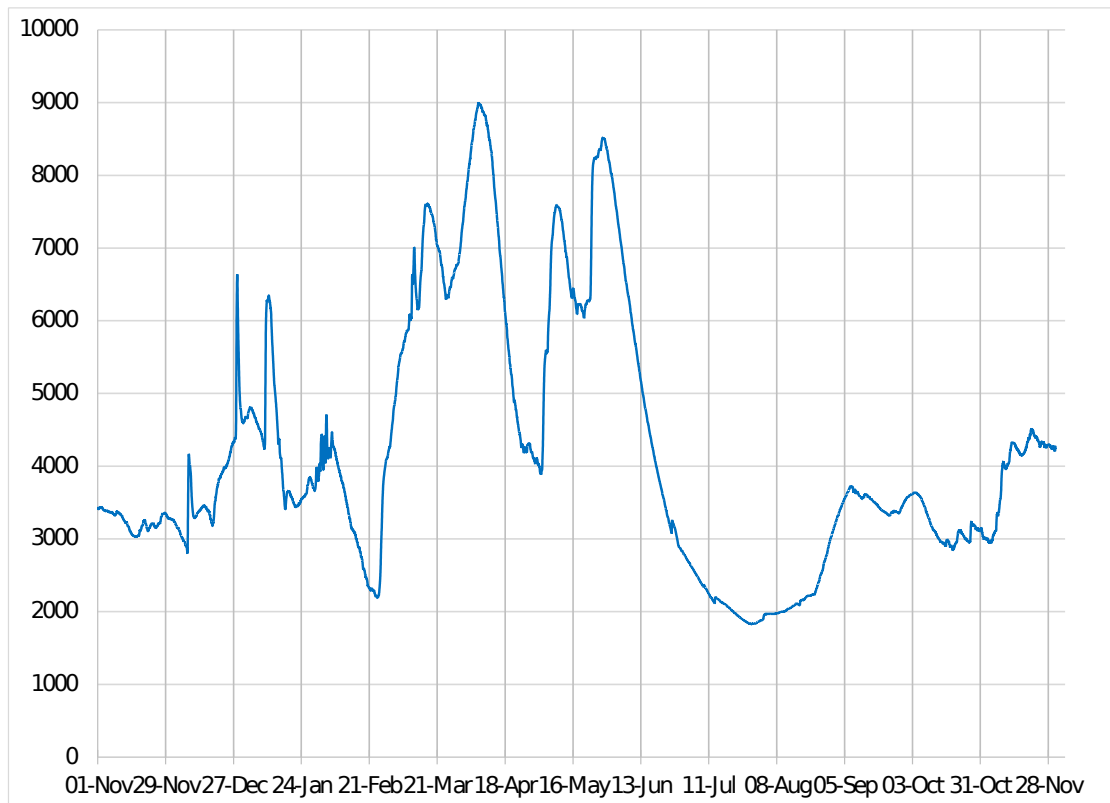
Joonis 2.2.12. Mõõdetud veetasemed (m) punktis 9, Koreli oja.



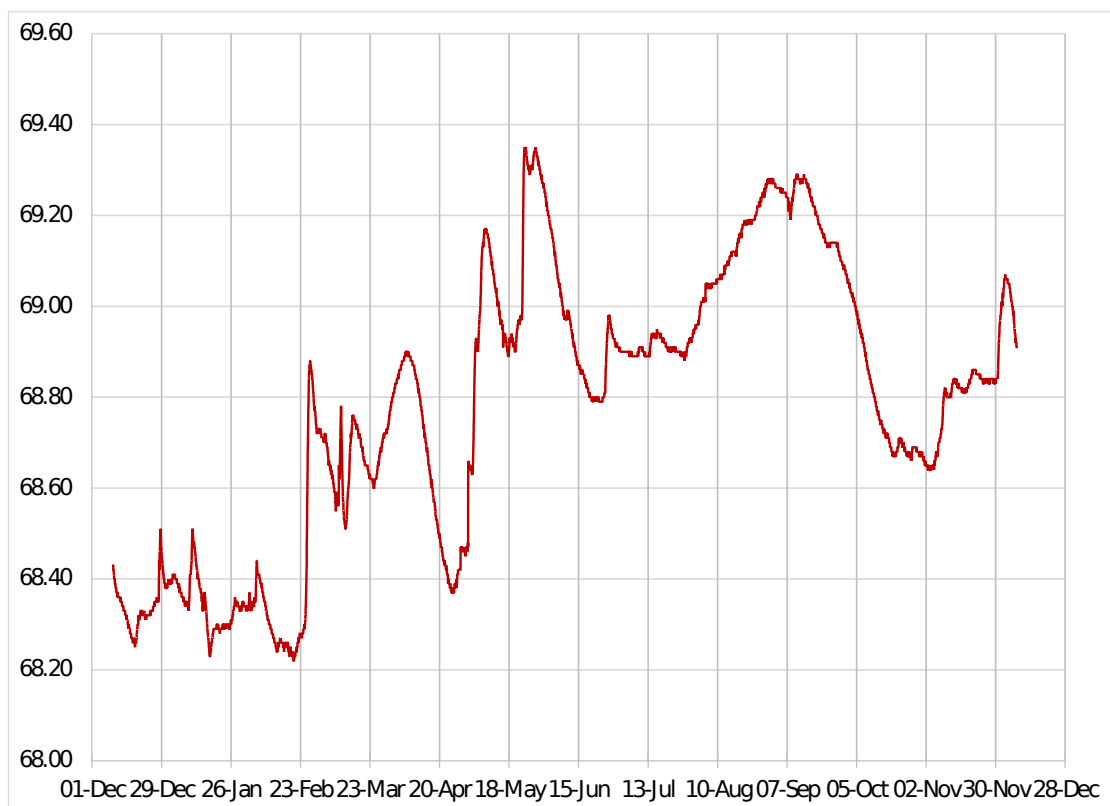
Joonis 2.2.13. Mõõdetud vooluhulgad (l/s) punktis 9, Koreli oja.



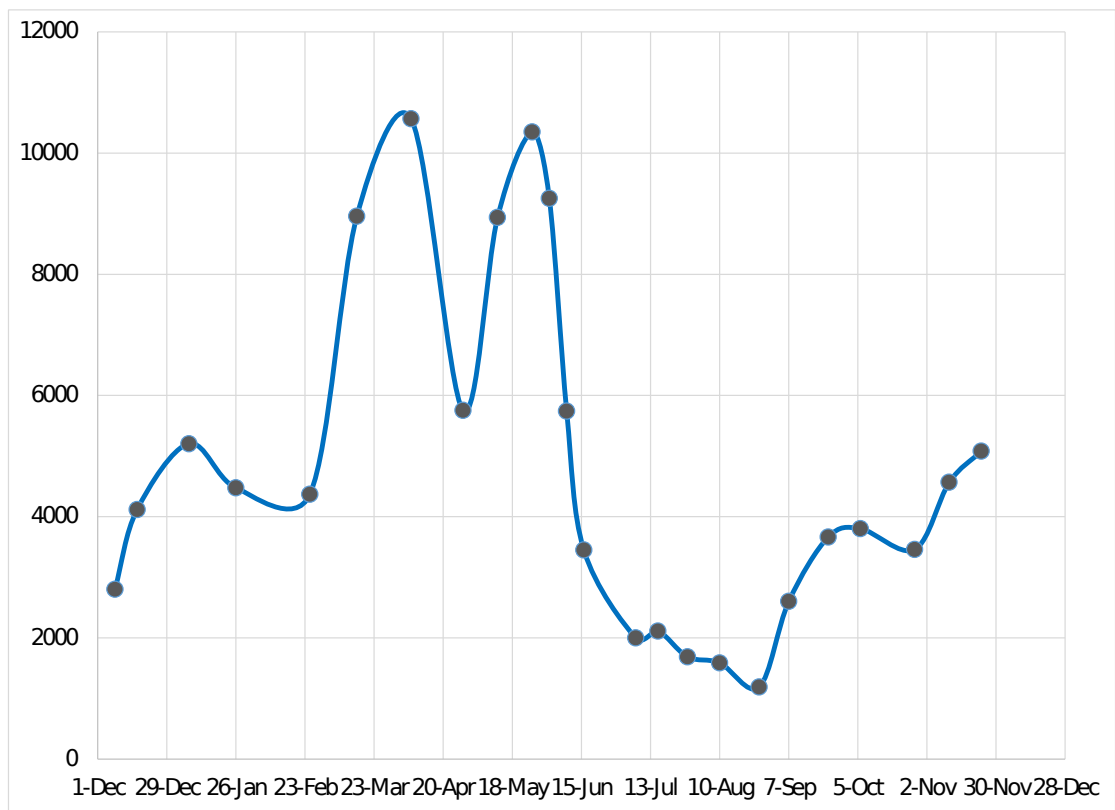
Joonis 2.2.14. Mõõdetud veetasemed (m) punktis 10, Kirumpää.



Joonis 2.2.15. Mõõdetud vooluhulgad (l/s) punktis 10, Kirumpää.



Joonis 2.2.16. Mõõdetud veetasemed (m) punktis 11, Kääpa sild.

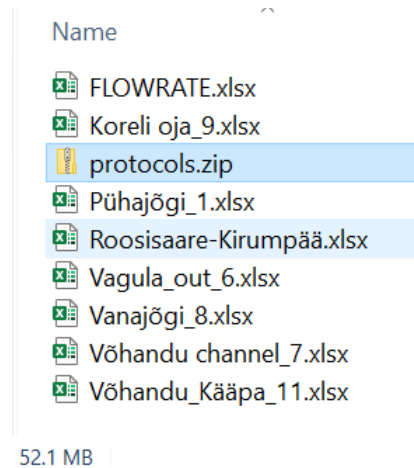


Joonis 2.2.17. Mõõdetud vooluhulgad (l/s) punktis 11, Kääpa sild.

2.3 Elektrooniliselt esitatud andmed

Mõõtmiste tulemused on esitatud elektrooniliselt. Dokumentide nimekiri on joonisel 2.3.1. Failid jagunevad nelja gruppi:

- Failid “*Seirepunkti nimi_seirepunkti number.xlsx*” on igatunnised veetaseme mõõtmiste andmed EKUK-ilt.
- Fail “*Roosisaare-Kirumpää.xlsx*” on igatunnised vooluhulkade ja veetaseme mõõtmiste andmed Keskkonnaagentuuri Ilmateenistusest.
- Fail “*FLOWRATE.xlsx*” sisaldab mõõdetud vooluhulkade andmeid EKUK-ilt.
- Failide kogum “*protocols.zip*” sisaldab vooluhulkade mõõtmiste protokolle (25 PDF formaadis faili, mis on grupeeritud seirekampaaniate järgi).



Joonis 2.3.1. Elektrooniliselt esitatud andmete ülevaade.

3 VÄLITÖÖD

3.1 Sügis 2020

Välivaatlus 21. septembril 2020 viidi läbi võimalike seirepunktide sobivuse hindamiseks. Eesmärk oli tuvastada sobivad seirepunktid veetaseme mõõtmiseks. Algsed seirepunktid ei olnud sobivad, sest need paiknesid üldjuhul veekogulõikude keskel, aga mudelisse on vaja veetaset lõikude lõpus.

Külastatud asukohad on järgnevalt kirjeldatud nende külastamise järjekorras, vt ka joonist 2.1.1 ja tabelit 2.2.1.



Joonis 3.1.1. Roosisaare sild.

Sisse-/väljavool Tamula järve/järvest (punkt 5) – Roosisaare sild, joonis 3.1.1. Suurepärane ligipääs, parkimine ja asukoht seadmete üles seadmiseks. Saab kasutada Tamula järve veetaseme mõõtmiseks.

Vanajõe truup/sild Tamulast allavoolu, Tallinna maanteel (punkt 8), joonis 3.1.2. Väga hea ligipääs, hea parkimine, hea asukoht seadmete üles seadmiseks. Saab kasutada veetaseme ja truupi läbiva vooluhulga mõõtmiseks .

Sild üle Koreli oja riigimaanteel nr 2 (punkt 9), joonis 3.1.3. Suurepärane ligipääs, hea parkimine, väga hea asukoht seadmete üles seadmiseks. Saab kasutada veetaseme ja vooluhulga mõõtmiseks.



Joonis 3.1.2. Vanajõe truup/sild.



Joonis 3.1.3. Sild üle Koreli oja.

Sild üle Võhandu jõe Kirumpääl riigimaanteel nr 64 (punkt 10), joonis 3.1.4. Suurepärane ligipääs, suurepärane parkimine. Jõeäärne platvorm, suurepärane asukoht seadmete paigaldamiseks. Saab kasutada veetaseme ja vooluhulga mõõtmiseks.

Vahejõgi, joonis 3.1.5. Ligipääs Vahejõe on võimalik tähistamata pinnastee kaudu (langenud puu piiras ligipääsu), mis on mõistlikus seisus. Talvel võib ligipääs olla piiratud lume tõttu. Vaatluspunkti üles seadmine ei ole soovitatav.



Joonis 3.1.4. Sild üle Võhandu jõe.



Joonis 3.1.5. Tee Vahejõeni.

Liitva kanal, sild Tallinna maanteel (punkt 7), vt joonis 3.1.6. Suurepärane ligipääs, parkimine. Jõeäärne platvorm, suurepärane asukoht seadmete üles seadmiseks. Saab kasutada veetaseme ja vooluhulga mõõtmiseks.



Joonis 3.1.6. Sild üle Liitva kanali.



Joonis 3.1.7. Vagula järve väljavool.

Väljavool Vagula järvest (punkt 6), vt joonis 3.1.7. Mõistlikult ligipääsetav (võimalik vajadus neliveo kasutamiseks talvel). Suurepärane parkimine, jõeäärne platvorm ja hea asukoht seadmete üles panekuks. Saab kasutada veetaseme ja vooluhulga mõõtmiseks. Vana pais ei ole kasutusel ja veetasemed ei erine. Teine (lõunapoolne) jõeharu on tammiga blokeeritud.

Sild üle Pühajõe riigimaanteel nr 69 (punkt 1), joonis 3.1.8. Suurepärane ligipääs, hea parkimine, suurepärane asukoht seadmete üles panekuks. Saab mõõta veetaset ja vooluhulka.



Joonis 3.1.8. Sild üle Pühajõe.

Pühajõe sissevool Vagula järve võib olla enamuse aastast ligipääsematu. Vanad teed tühjade kalatiikide (Järvere tiigid) vahelistel tammidel. Teed ei ole kasutusel (rohtunud, joonis 3.1.9). Seirepunkti vajalikkus on küsitav, antud asukoha vooluhulga mõõtmine ei oleks kasutatav ja veetaset saab mõõta Vagula järve väljavoolul.



Joonis 3.1.9. Vana tee Järvere kalatiikide juures.



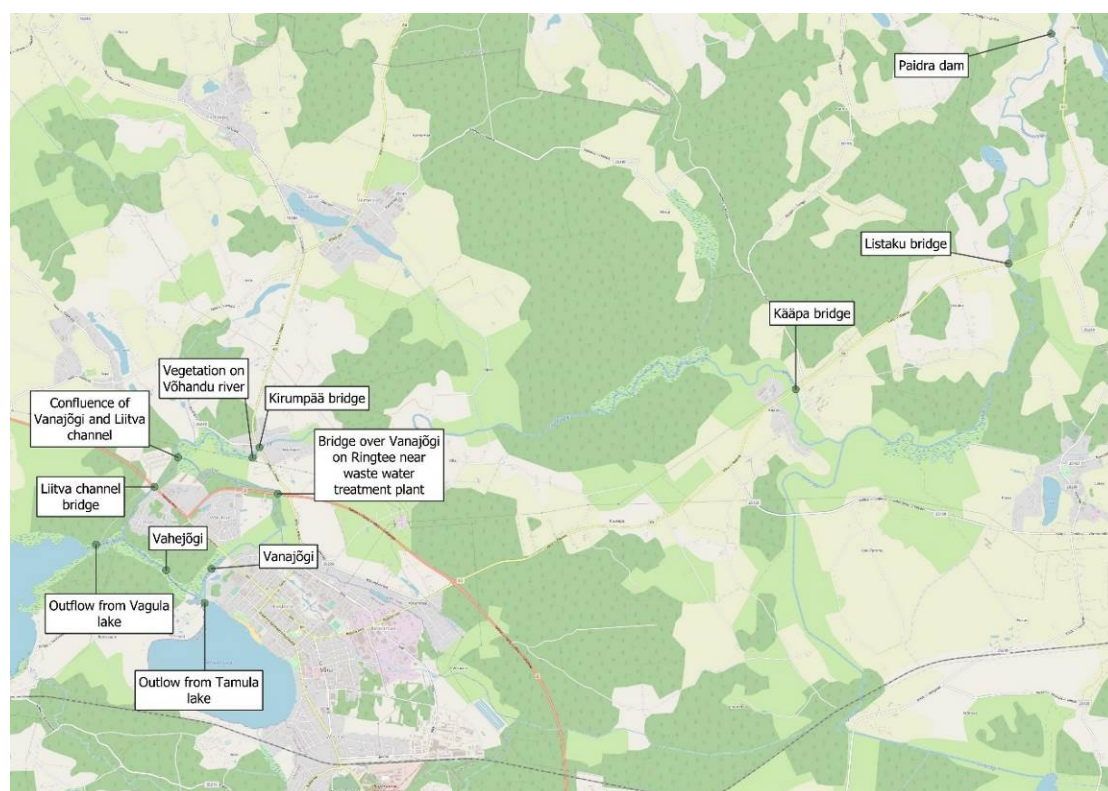
Joonis 3.1.10. Meegomäe oja.

Meegomäe oja truup (punkt 3) – väike oja Tamula järve lõunakaldal, näidatud joonisel 3.1.10. Suurepärane ligipääs, hea parkimine, hea asukoht seadmete paigaldamiseks. Üle Meegomäe oja läheb raudteesild ja tee all on truup.

3.2 Suvi 2021

3.2.1 Sissejuhatus

Välivaatlused viidi läbi 7. juulil 2021 ning nende eesmärk oli suviste tingimuste hindamine (kõrge veetase, madal vooluhulk) ja kõrge veetaseme põhjustaja otsimine. Välitööd koosnesid kahest osast. Kõigepealt külastas Konsultant peamisi sildasid Võhandu jõel Võrust allavoolu, Liitva kanalil ja Vanajõel. Teine osa välitöödest viidi läbi paadiga ja need toimusid Tamula järvel, Vahejõel, Liitva kanalis ja Võhandu jõel kuni Kirumpää sillani. Välivaatluste kaart koos vaatluspunktidega on esitatud joonisel 3.2.1.



Joonis 3.2.1. 7. juuli 2021 välivaatluse põhilised huviobjektid Võru linna piirkonnas ning Võhandu jõel Võrus linnast allavoolu.

3.2.2 Külastatud vaatluskohad

Liitva kanal

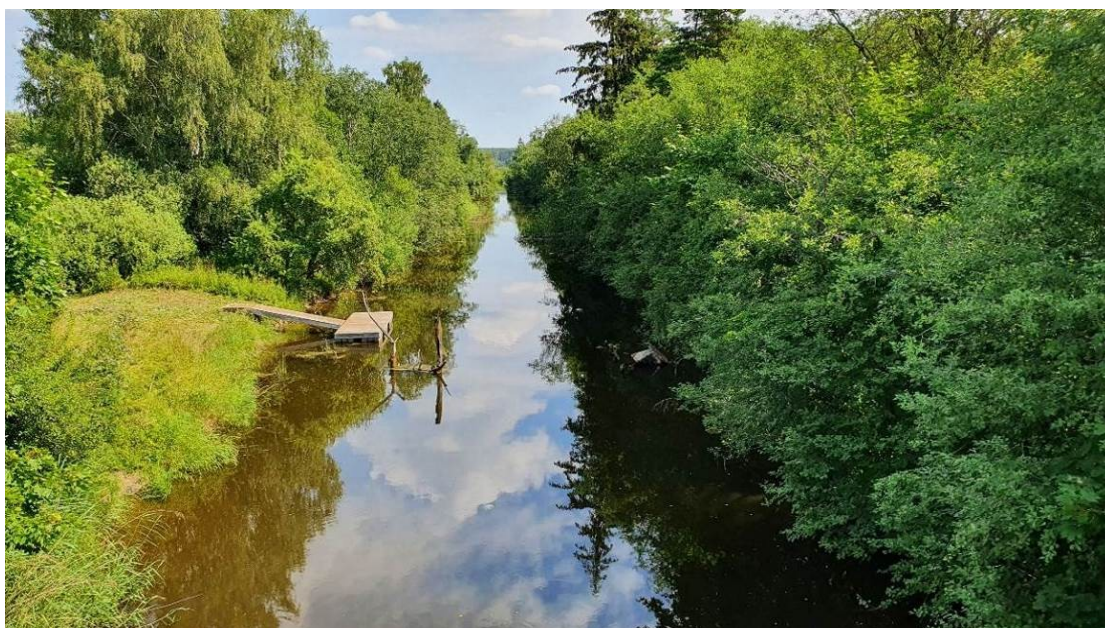
Liitva kanal toimib otseühendusena Vahejõe ja Vanajõe vahel. Suurem osa Võhandu jõe vooluhulgast voolab läbi Liitva kanali. Joonis 3.2.2 kujutab vaadet Liitva kanalist riigimaantee nr 2 silla all. Kunstlikule kanalile iseloomulikud põhjasetted ja kivid on näha joonisel 3.2.3, kanali taimestik on vähene. Joonis 3.2.4 kujutab vaadet sillalt põhja poole, kus jõe mõlemal kaldal kasvavad jõe kohale ulatuvad puud. See võib aeg-ajalt põhjustada kanali ummistumist puuokstega (vt joonis 3.2.5). Põhjaosas Liitva kanal laieneb, eriti liitumisel Vanajõega (joonis 3.2.6).



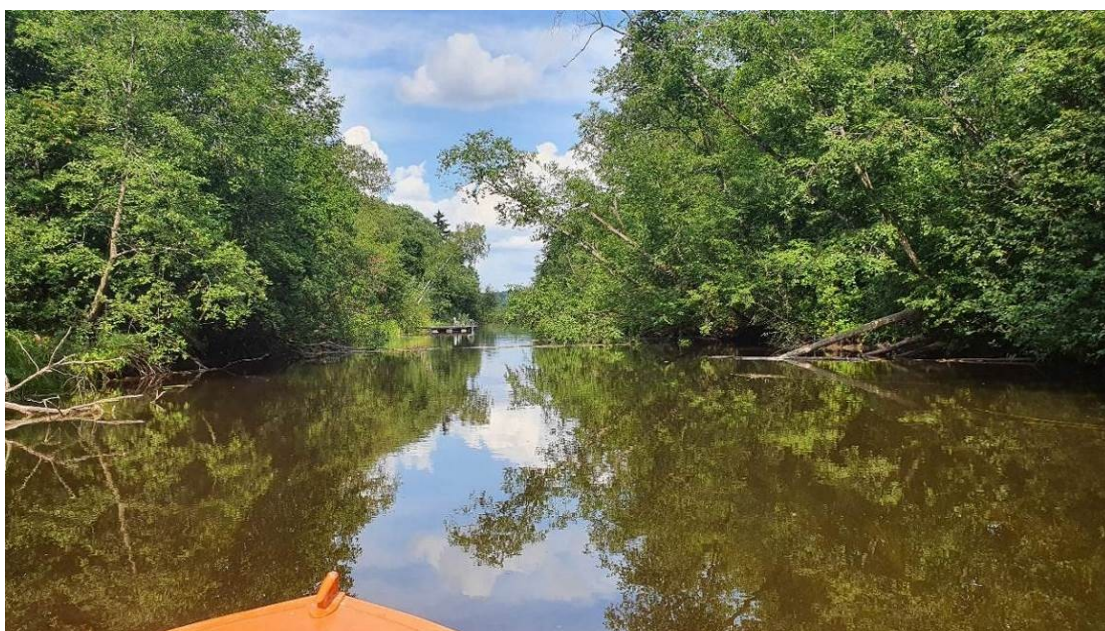
Joonis 3.2.2. Sild riigimaanteel nr 2 üle Liitva kanali.



Joonis 3.2.3. Liitva kanali põhi.



Joonis 3.2.4. Vaade sillalt Liitva kanalile (allavoolu).



Joonis 3.2.5. Vaade Liitva kanalile.



Joonis 3.2.6. Vaade Liitva kanalile Vanajõega liitumise kohas.

Vanajõgi

Vaade Vanajõe Ringtee maantee sillalt on joonisel 3.2.7. Võru reoveepuhasti territoorium on pildil üleval paremal nurgas. Jõe kallastel on antud piirkonnas rohke taimestik, mõned puud ulatuvad jõe kohale. Allavoolu Vanajõgi laieneb ja jões on palju veetaimestikku (vt joonis 3.2.8).



Joonis 3.2.7. Vaade Vanajõe Ringtee maantee sillalt (ülesvoolu).



Joonis 3.2.8. Vaade Vanajõe Liitva kanaliga liitumisel.

Kirumpää sild

Jalakäijate sild ja maantesild üle Võhandu jõe on joonistel 3.2.9 ja 3.2.10. Üks maantesilla tugisammas on antud (mööduka) veetaseme juures vees. Võhandu jõe allavoolu vaates Kirumpää sillalt (joonis 3.2.11) on näha veetaimestikku ja keskmise tihedusega kaldataimestikku.



Joonis 3.2.9. Vaade Kirumpää jalakäijate sillale (ülesvoolu).



Joonis 3.2.10. Vaade Kirumpää maantee sillale (ülesvoolu).



Joonis 3.2.11. Vaade Vöhandu jõe allavoolu Kirumpääl.

Kääpa sild

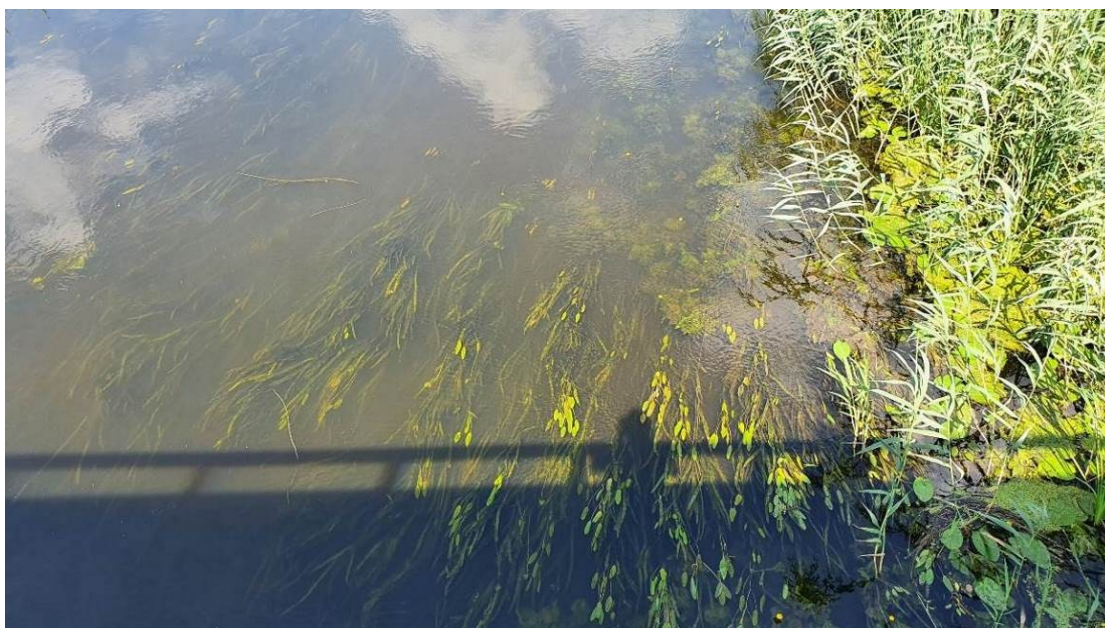
Kääpa sild asub Vöhandu jõel Kirumpää sillast umbes 8 km allavoolu. Vaatluspunkti iseloomustab tihe kaldataimestik (joonis 3.2.15) ja keskmise tihedusega veetaimestik (joonis 3.2.14). Sillast allavoolu on mõned puud kasvanud jõe kohale (joonis 3.2.13). Mõlemad silla tugisambad on vees (joonis 3.2.12).



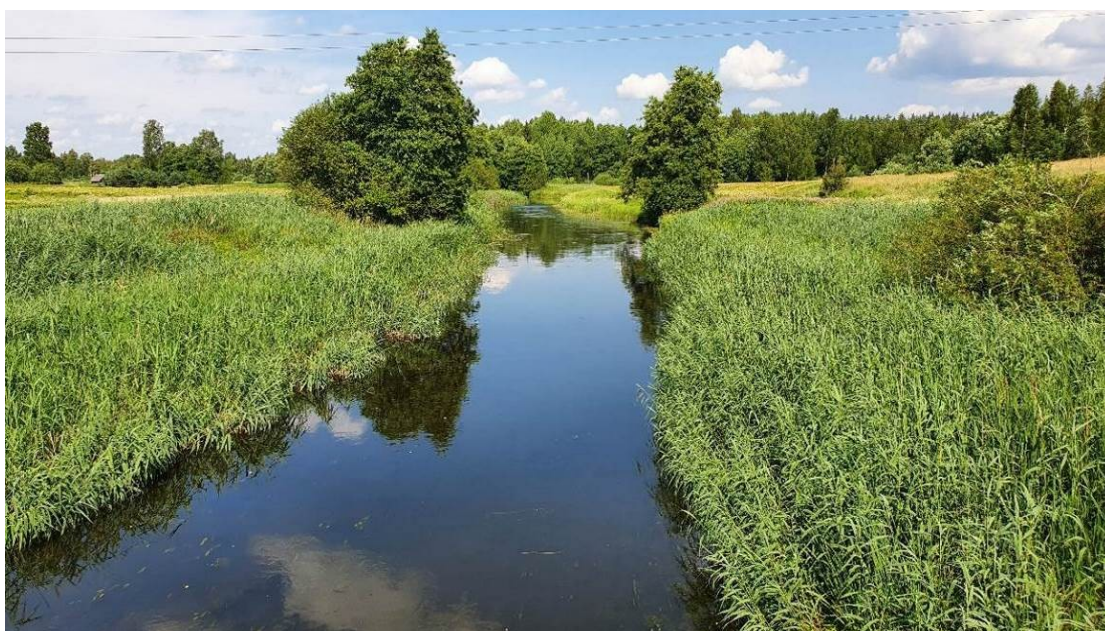
Joonis 3.2.12. Vaade Kääpa sillale (ülesvoolu).



Joonis 3.2.13. Vaade allavoolu Võhandu jõele Kääpa sillalt.



Joonis 3.2.14. Veetaimestik Kääpa silla piirkonnas.



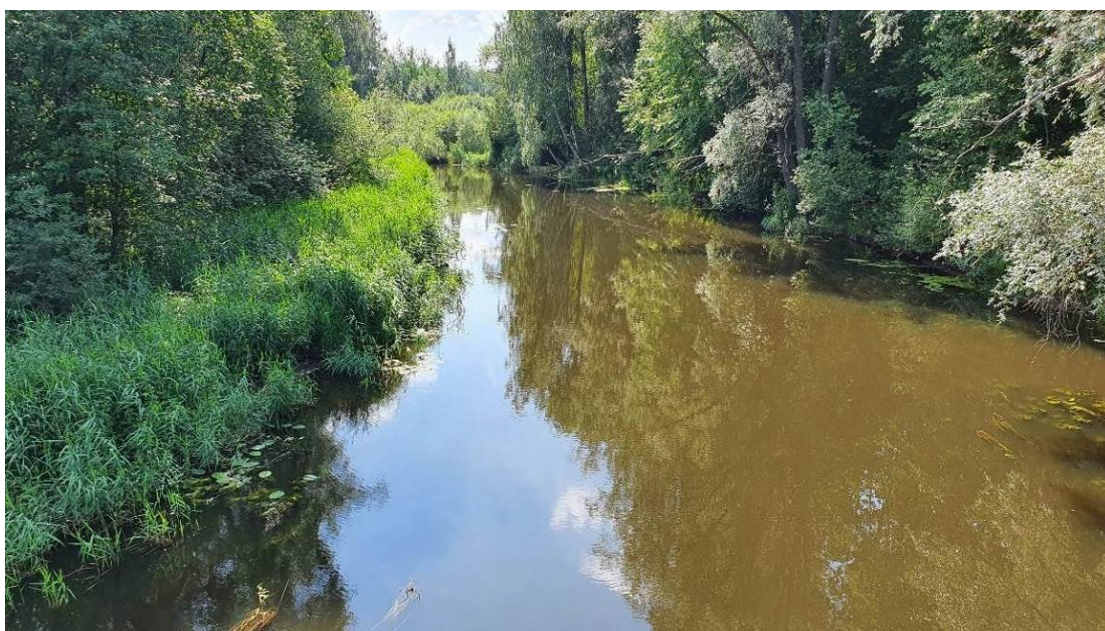
Joonis 3.2.15. Võhandu jõe kaldataimestik Kääpa silla läheduses.

Listaku sild

Listaku sild (joonis 3.2.16) asub Võhandu jõel umbes 5 km allavoolu Kääpa sillast. Jões on näha vähest kuni keskmise tihedusega taimestikku. Tihe kaldataimestik ja kallastel kasvavad puud on joonistel 3.2.17 ja 3.2.18.



Joonis 3.2.16. Listaku sild üle Võhandu jõe.



Joonis 3.2.17. Vaade Võhandu jõele ülesvoolu Listaku sillalt.



Joonis 3.2.18. Vaade Võhandu jõele allavoolu Listake sillalt.

Paidra pais

Paidra pais (joonis 3.2.19) asub Võhandu jõel ligikaudu 4 km allavoolu Listaku sillast. Paisul on praegu reguleerimata ülevool (joonis 3.2.22) ja puidust regulaator, mis on halvas seisukorras (joonis 3.2.20, 3.2.21)



Joonis 3.2.19. Paidra pais Võhandu jõel.



Joonis 3.2.20. Paidra paisu puidust regulaator.



Joonis 3.2.21. Jalakäijate sild üle Paidra paisu.



Joonis 3.2.22. Reguleerimata ülevool Paidra paisul.

Tamula järv

Võru linn asub Tamula järve kallastel (joonis 3.2.23). Järve peamine väljavool on Vanajõkke, mis suubub Võhandu jõkke (joonis 3.2.24). Tamula järve veetaseme mõõtmise andur asub Roosisaare sillal (joonis 3.2.25).



Joonis 3.2.23. Tamula järv, taustal Võru linn.



Joonis 3.2.24. Roosisaare sild – Tamula järve väljavool.



Joonis 3.2.25. Tamula järve veetaseme mõõtmise andur Roosisaare sillal.

Vahejõgi

Vahejõgi oli Võhandu jõe peamine voolusäng enne Liitva kanali rajamist. Vahejõe kaldad on lauged ja tihedalt kaldataimestikuga kaetud (joonis 3.2.26). Suvel on taimestik nii tihe, et väljavool Vanajõkke on vaevu nähtav (joonis 3.2.27).



Joonis 3.2.26. Vahejõgi.



Joonis 3.2.27. Vahejõgi. Väljavool Vanajõkke.

Võhandu jõgi Kirumpää sillast ülesvoolu

Võhandu jõgi Liitva kanali ja Vanajõe liitumiskoha ning Kirumpää silla vahel on aeglase vooluga (joonis 3.2.28) ja kohati veetaimestikku täis kasvanud (joonis 3.2.29). Paadiga läbipääs oli kohati võimatu (3.2.30).



Joonis 3.2.28. Võhandu jõgi.



Joonis 3.2.29. Veetaimestikku täis kasvanud Võhandu jõgi .



Joonis 3.2.30. Veetaimestikku täis kasvanud Võhandu jõgi, Kirumpää sild on pildi vasakus pooles.

Vagula järve väljavool

Vagula järvest väljavoolul on Võhandu jõel kaks haru (joonis 3.2.31; põhjapoolne haru paremal, lõunapoolne haru vasakul). Lõunapoolne haru on ummistunud paisujäänuste tõttu ja tavatingimustes seal veevool puudub. Põhjapoolsel harul asub mittetoimiv pais ja jalakäijate sild (joonis 3.2.32).



Joonis 3.2.31. Vaade Võhandu jõele ülesvoolu Vagula järve väljavoolu lähedal.



Joonis 3.2.32. Jalakäijate sild üle Võhandu jõe Vagula järve väljavoolu lähedal.

3.2.3 Välitööde kokkuvõte

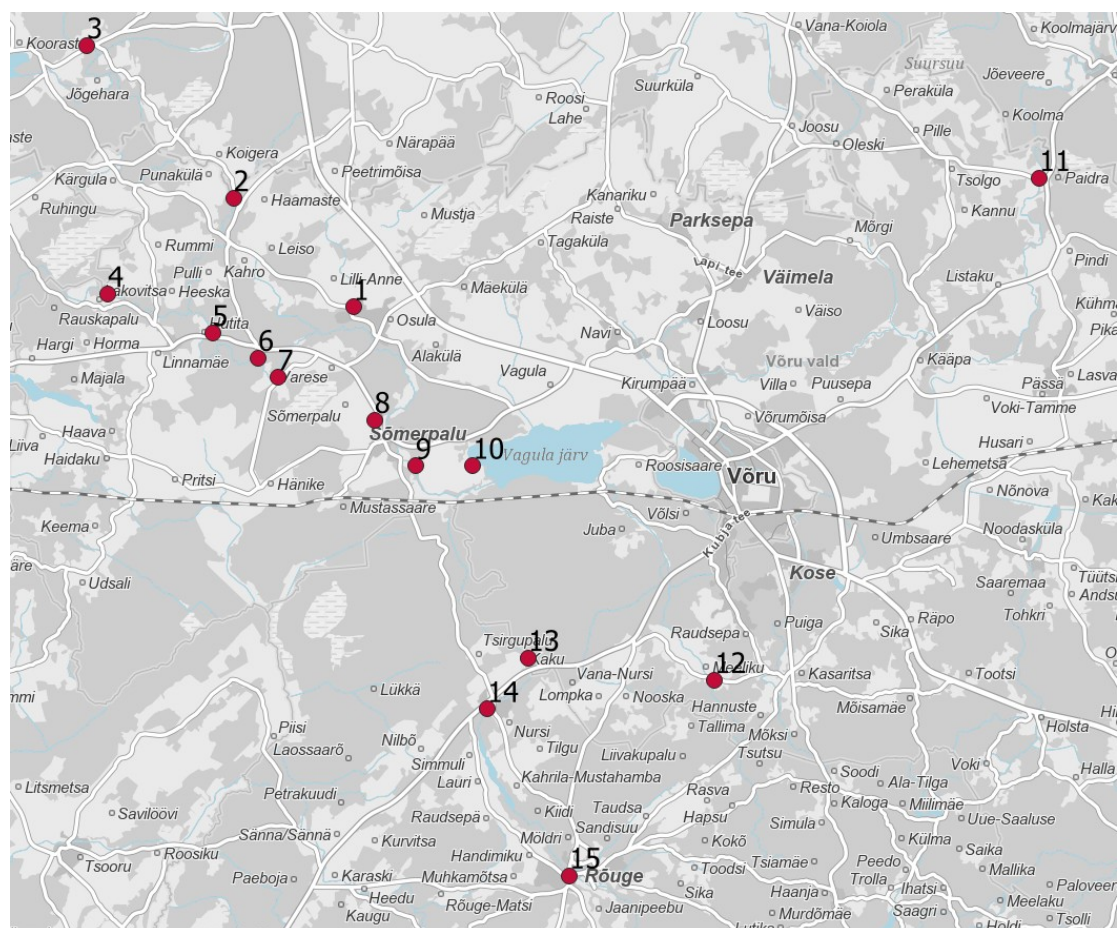
Välitöödel ei leitud tõendust selle kohta, et veevoolu takistavad ja veetaseme tõusu põhjustavad füüsilised tõkked. Ainuke võimalik huvipakkuv tõke huvipakkuvast piirkonnast allavoolu on Paidra pais. Mõju paisu paigutamisel kaugemale allavoolu tuleks teoreetiliselt hinnata.

See, kas kaldataimestiku suur osakaal võib olla suviste kõrgete veetasemete põhjustajaks madala vooluhulga juures, jääb ebaselgeks ja vajab arvutuslikku hinnangut.

3.3 Sügis 2021

3.3.1 Sissejuhatatus

Välivaatluste, mis toimusid 14. oktoobril 2021, eesmärgiks oli hinnata Võrust ülesvoolu jäävate paisude kasutatavust üleujutuste ennetamisel läbi vee mahutamise. Mitmeid teisi kohti külastati uuesti, et hinnata võimalikke üleujutusohu leevendamise lahendusi. Joonisel 3.3.1 on kujutatud 15 külastatud asukohta/objekti.

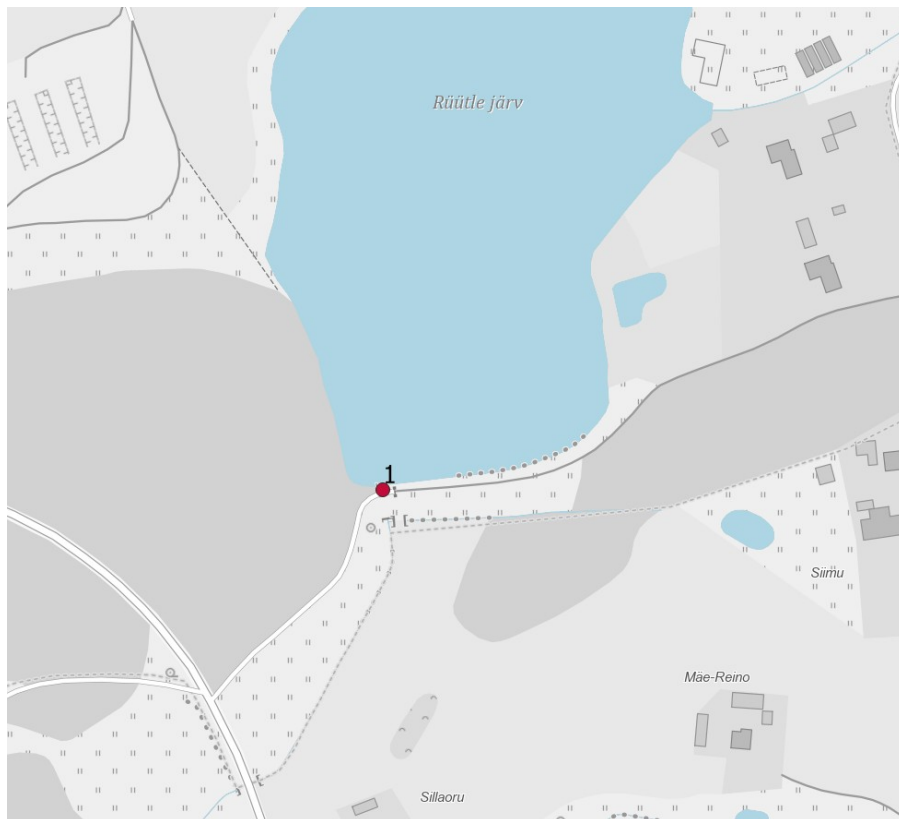


Joonis 3.3.1. Külastatud asukohad.

3.3.2 Külastatud vaatluskohad

Vaatluspunkt 1

Paisjärvel on veetaseme regulaator, mille sissevoolu ala on ligikaudu 2 m^3 . Tammi läbiv trupp on läbimõõduga 60 cm. Järve veetaset hoitakse 84.31 m (DEM kõrgusmudeli põhjal). Tammi kõrgus truubi juures on 85.21 m ja truubi väljavoolu kõrgus 78.22 m. Regulaatorile on võimalik avalikult juurde pääseda.



Joonis 3.3.2. Asukohakaart, vaatluspunkt 1.



Joonis 3.3.3. Veetaseme regulaator (vaade itta).

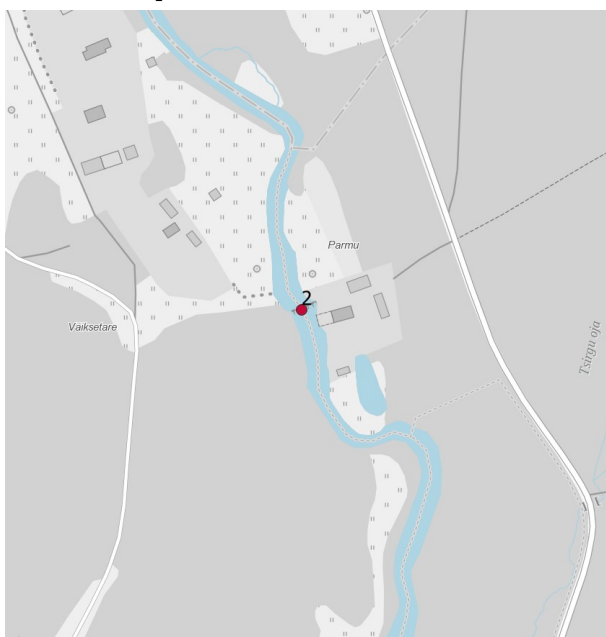


Joonis 3.3.4. Veetaseme regulaator – pealtvaade (vasakul), vaade põhja poole (paremal).



Joonis 3.3.5. Tamm (vaade lõunasse, vasakul), truup (vaade kirdesse, paremal)

Vaatluspunkt 2



Joonis 3.3.6. Asukohakaart, vaatluspunkt 2.

Vaatluspunkt 2 on maha jäetud paisuvaremed - kivikuhjatis. Veevool on 1.5 m lai, veetaseme erinevused on 40 cm. Vaatluspunkt on eramaal.



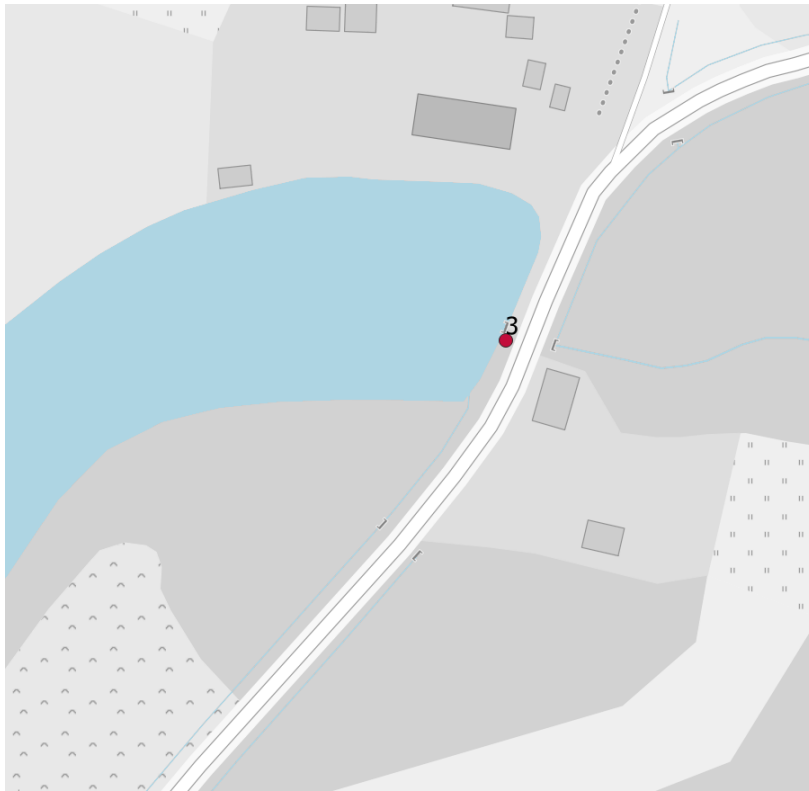
Joonis 3.3.7. Maha jäetud paisutus (vaade loodesse).

Vaatluspunkt 3

Vaatluspunkt 3 on endine veskitiik koos avaliku tee all oleva truubiga. Truubi läbimõõt on 1.2 m. Veetaset hoitakse 115.10 m juures (DEM kõrgusmudeli põhjal), teekõrgus on 116.00 m. Truubi väljavoolu kõrgus on 112.50 m.



Joonis 3.3.8. Sissevool tiigist truupi (vaade läände).



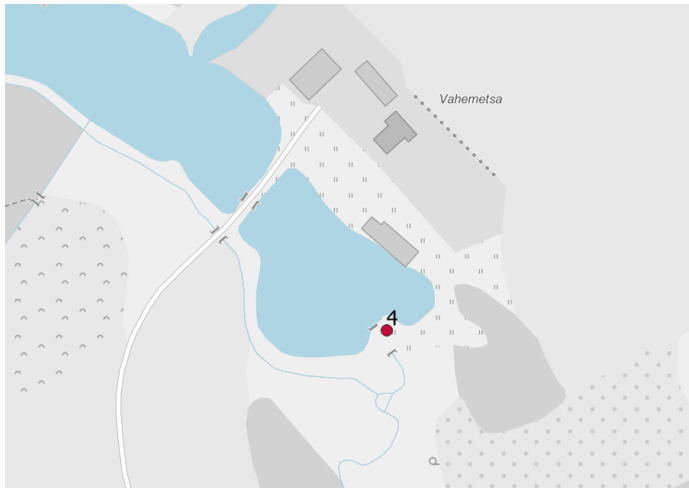
Joonis 3.3.9. Asukohakaart, vaatluspunkt 3.



Joonis 3.3.10. Truup (vaade kirdesse – vasakul, vaade põhja - paremal).

Vaatluspunkt 4

Neljas veereservuaar koosneb kahest tiigist, mis on ühendatud teealuse truubiga. Tiigid võivad saada vett mööda voolavast ojast. Tiike on võimalik tühjendada suunates vesi äravoolukanalisse. Esimesed tiigis (idapoolne) saab veetaset hoida 114.36 m kõrgusel (DEM kõrgusmudeli põhjal). Tiikide veetaseme erinevus on 30 cm. Süsteem on eraomand.



Joonis 3.3.11. Asukohakaart, vaatluspunkt 4.



Joonis 3.3.12. Esimene (vaade läände, vasakul) ja teine tiik (vaade itta, paremal).



Joonis 3.3.13. Sissevool truupi. Vaade esimese tiigi poole (läände).



Joonis 3.3.14. Väljavool äravoolukanalisse (vaade põhja, vasakul); ülevoolukanal (vaade itta, paremal).

Vaatluspunkt 5



Joonis 3.3.15. Asukohakaart, vaatluspunkt 5.



Joonis 3.3.16. Endine veskitiik (vaade loodesse, vasakul); kalapääs (vaade läände, paremal).

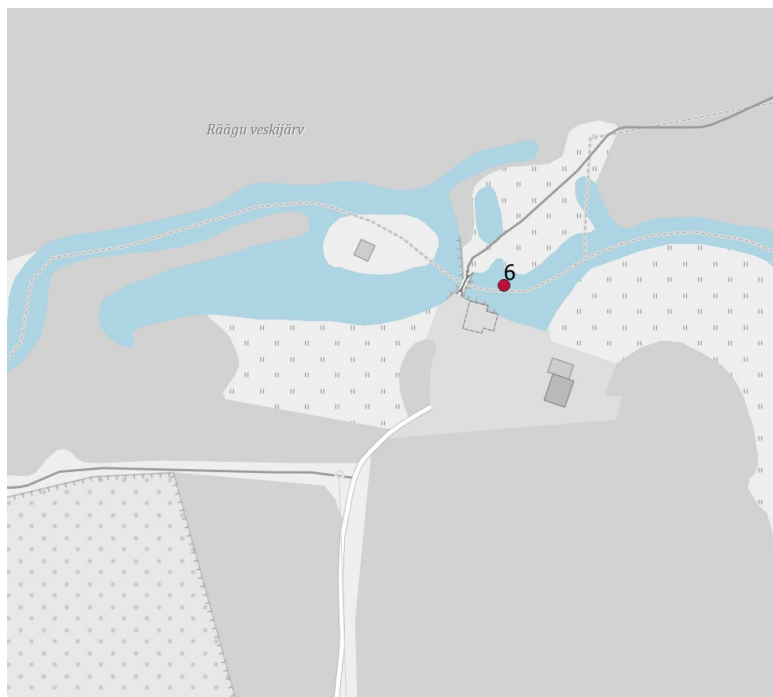
Vaatluspunkt 5 on restaureeritud veskitiik ja pais, millele on rajatud kalapääs. Veetasemete erinevus on umbes 2 m. Paisjärve veetase on 87.46 m (DEM kõrgusmudeli põhjal), paisu kõrgus 88.16 m. Allavoolu veetase langeb 84.73 m peale. Pais on eraomanduses, kuid avaliku juurdepääsuga.



Joonis 3.3.17. Restaureeritud veski ja pais (vaade loodesse).

Vaatluspunkt 6

Eramaal asuvas asukohas enam paisu ei ole.



Joonis 3.3.18. Asukohakaart, vaatluspunkt 6.



Joonis 3.3.19. Vaade põhja (vasakul) ja kirdesse (paremal).

Vaatluspunkt 7



Joonis 3.3.20. Asukohakaart, vaatluspunkt 7.

Vaatluspunktis on kalakasvatustiigid Pühajõe kaldal.



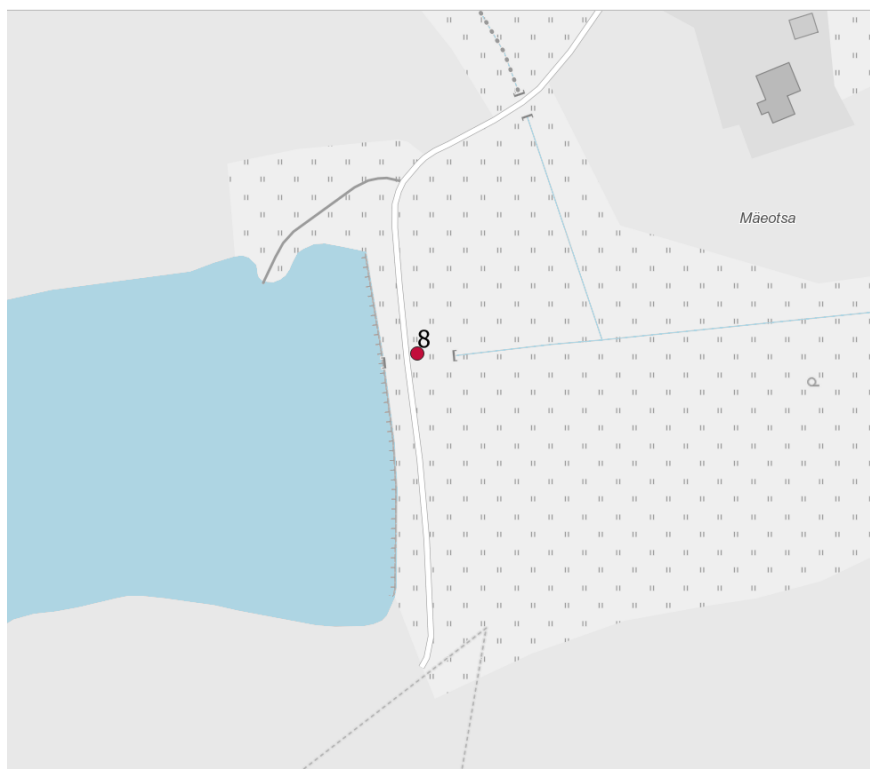
Joonis 3.3.21. Vaade tee pealt kasutusest väljas tiigile loode suunas.



Joonis 3.3.22. Vaade piki Pühajõe.

Vaatluspunkt 8

Objektiks on väiksel ojal asuv paisjärv kõrge tammi ja (kasutusest väljas) veetaseme regulaatoriga. Regulaatori sissevooluala on 2 m. Järve veetaset hoitakse 77.8 m juures (DEM kõrgusmudeli põhjal), tammi kõrgus on 80.3 m ja väljavoolu kõrgus 74.8 m.



Joonis 3.3.23. Asukohakaart, vaatluspunkt 8.



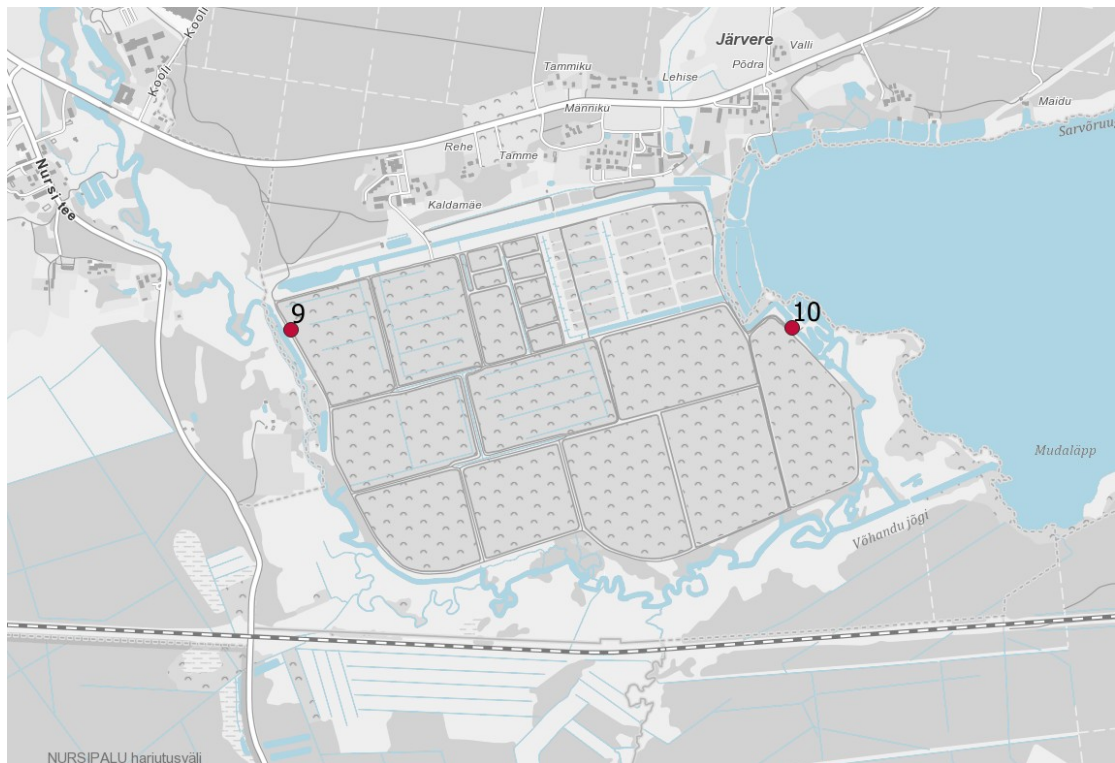
Joonis 3.3.24. Vaade tammilt läände (vasakul) ja itta (paremal).



Joonis 3.3.25. Veetaseme regulaator.

Järvere kalatiigid - vaatluspunktid 9 ja 10

Järvere kalatiike (joonis 3.3.26) külastati, et hinnata nende võimalikku kasutamist suurvee mahutamiseks. Tiigid, tammid ja truubid asuvad Pühajõe vasakul kaldal Vagula järve läänekaldal. Konsultant uuris tiikide läänekallast (vaatluspunkt 9, Joonis 3.3.27), et leida võimalikku sissevoolu. Sissevoolu ei leitud, kuid võimalik on vee imbumine läbi teealuse tammi. Pühajõe kaldal, jõe Vagula järve suubumise kohas, vaatluspunktis 10, (joonis 3.3.29) asub maha jäetud endise pumbajaama hoone (joonis 3.3.28).



Joonis 3.3.26. Asukohakaart, vaatluspunktid 9 ja 10.



Joonis 3.3.27. Osaliselt täidetud/täitunud tiik, vaade vaatluspunktist kirdesse.



Joonis 3.3.28. Maha jäetud pumpla, vaatluspunkt 10.



Joonis 3.3.29. Vaade maha jäetud pumplast Pühajõe ja Vagula järve poole, vaatluspunkt 10.

Paidra pais - vaatluspunkt 11

Konsultant külastas Paidra paisu uuesti, et hinnata, kas seda peale juuli välivaatluseid on seal veetasel reguleeritud. Välivaatlusel ei tuvastatud muutusi sulgurklappide asendis või veetasemes.



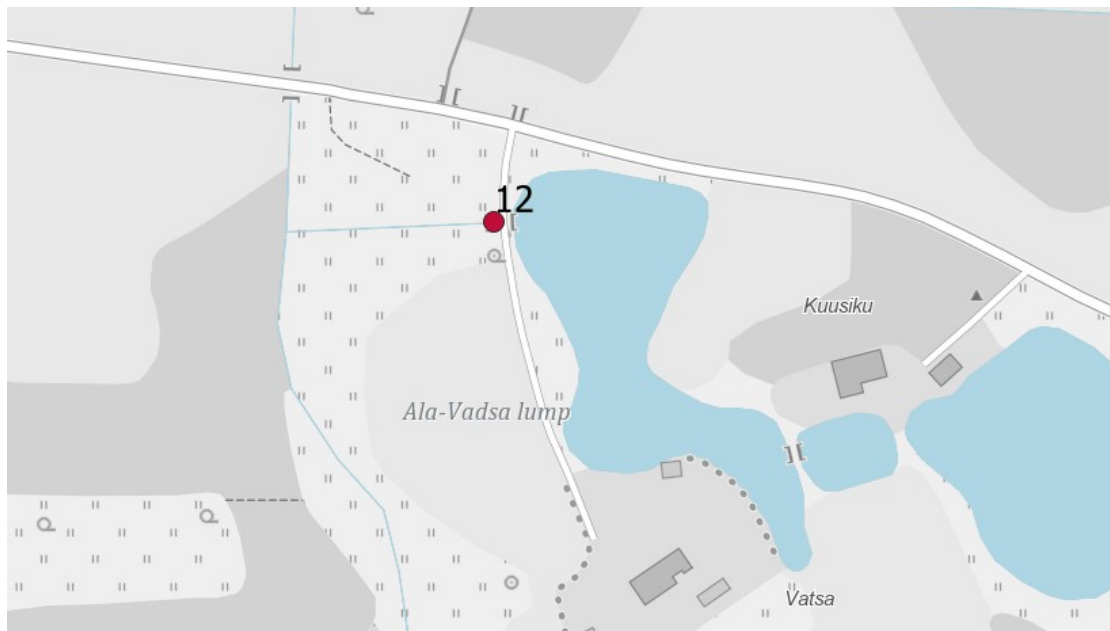
Joonis 3.3.30. Asukohakaart, Paidra pais.



Joonis 3.3.31. Paidra pais.

Vaatluspunkt 12

Vaatlusobjektiks oli väikesel ojal eraomandis olev tiikide ahel. Tiikide väljavooluks on teealune toru, mis väljub veetaseme regulaatoriga tiigist.



Joonis 3.3.32. Asukohakaart, vaatluspunkt 12.



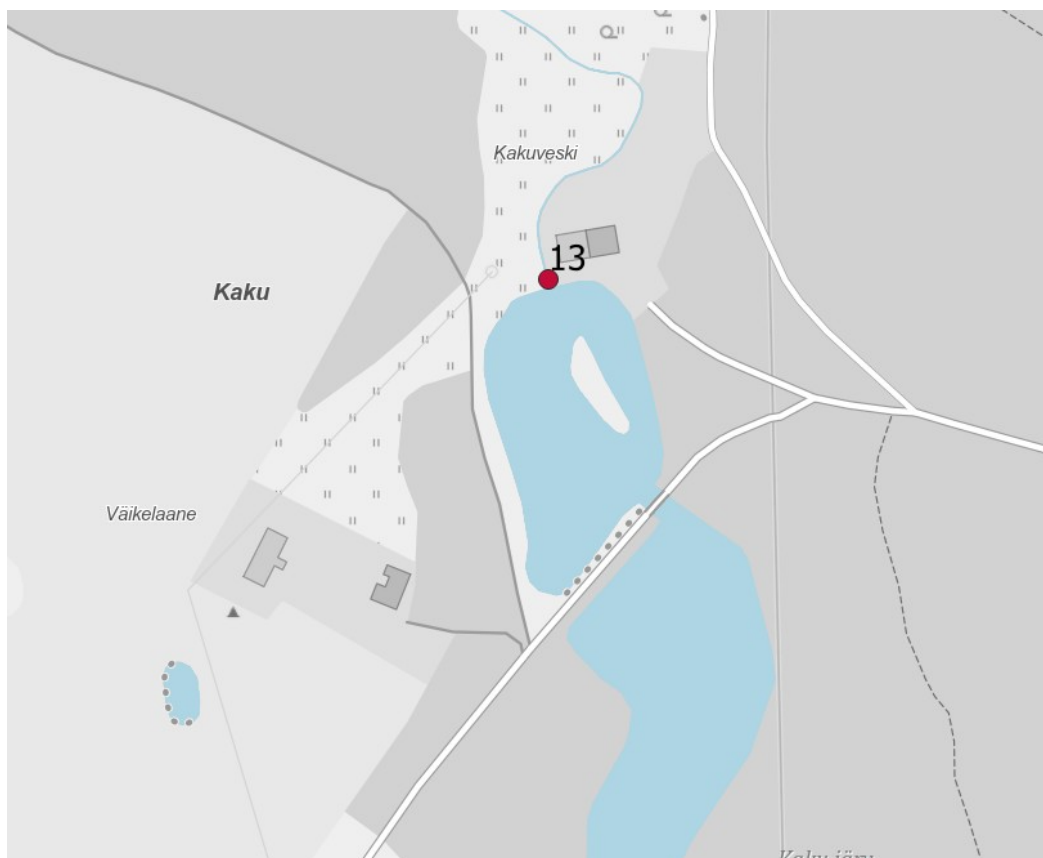
Joonis 3.3.33. Tiik, vaade lõunasse.



Joonis 3.3.34. Teealune toru (vasakul) ja veetaseme regulaator (paremal).

Vaatluspunkt 13

Veetaseme regulaator (vaatluspunkt 13 joonisel 3.3.35) asub eramaal ja ei ole avalikkusele ligipääsetav. Fotod on tehtud avaliku tee sillalt.



Joonis 3.3.35. Asukohakaart, vaatluspunkt 13.



Joonis 3.3.36. Paisjärved sillast lõunas (vasakul) ja põhjas (paremal).



Joonis 3.3.37. Sild (tamm), mis eraldab paisjärvesid (vasakul), lõunapoolne paisjärv (paremal).

Vaatluspunkt 14

Objekt on endine veski, mis on restaureerimisel. Paisjärve veetase Rõuge jõel on 98.9 m (DEM kõrgusmudeli alusel) ja väljavoolu tase on 94.5 m.



Joonis 3.3.38. Asukohakaart, vaatluspunkt 14.

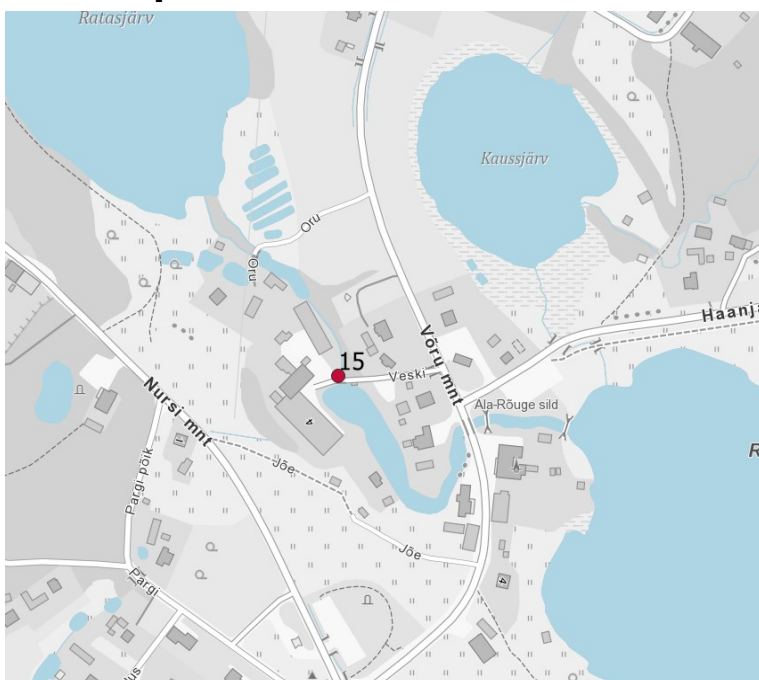


Joonis 3.3.38. Ajaloolise veski pais. Vaade itta.



Joonis 3.3.39. Vaade põhja mööda Rõuge jõge (vasakul); veskihoone varemed (paremal).

Vaatluspunkt 15



Joonis 3.3.40. Asukohakaart (Rõuge alevik), vaatluspunkt 15.

Vaatluspunktis asub pais Rõuge alevikus Rõuge jõel Rõuge Suurjärve ja Ratasjärve vahel. Paisu sanitaarveelask on lahendatud toru kaudu (joonis 3.3.41). Ehitised on avalikud.



Joonis 3.3.41. Äravoolutoru Rõuge Suurjärvest Rõuge jõkke.



Joonis 3.3.42. Rõuge jõe pais (vasakul) ja sild Rõuge Suurjärve väljavoolul (paremal).

3.3.3 Välitööde järelused

Pühajõe ja Rõuge jõe valgaladel Vagula järvest ülesvoolu on mitmeid paisjärvesid. Teoreetiliselt võiksid need paisjärved mahutada vihmasadude ajal tulvavett ning lükata edasi üleujutuse jõudmist Vagula järve.

Praktikas on sellel mitu takistust:

- Enamik paisjärvesid on eraomanduses ja omanikud ei pruugi soovida suvel veetaset alandada, et valmistuda hilissuve/varasügise vihmasadudeks.
- Mõnel paisjärvel ei ole vooluhulga regulaatoreid vaid on veetaseme regulaator.
- Kõikide paisude ja regulaatorite omanike koordineeritud tegevust on keeruline saavutada.

Kasutusest väljas olevad Järvere kalatiigid võiksid samas toimida kõrgveeaegse liigvee mahutajana, vältides seeläbi üleujutuste haripunkti Vagula järves. Selleks peaksid need tiigid olema varustatud pumpadega, kuna tiigid paiknevad Vagula järve veetasemest kõrgemal.

4 HÜDROLOOGILINE MUDEL

4.1 Mudel ja sisendandmed

Hüdroloogiline mudel loodi tarkvara HEC-HMS 4.8² abil. Tarkvara on välja töötanud USA Armee Insenerikorpus ja see on loodud hüdroloogiliste protsesside simuleerimiseks mitmeharulistes jõgikondades.



Joonis 4.1. Modelleerimispiirkond.

Mudelisse hõlmati järgmised protsessid:

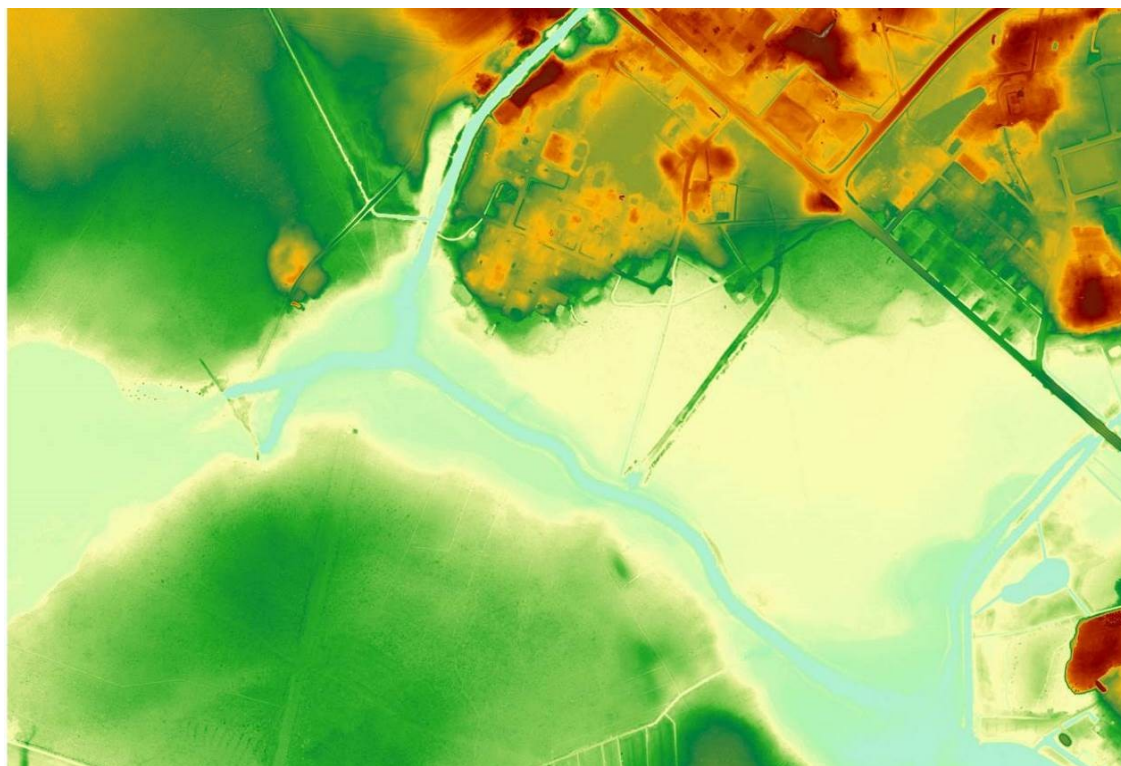
- Vee infiltratsioon pinnasesse
- Veevaru
 - o Taimkattes
 - o Pinnases
 - o Lumekihis (kasutatakse temperatuuri andmeid)
- Baasäravool
- Otsene pindmine äravool
- Ärajuhtimine

² <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>

- Aurustumine (kasutab temperatuuri andmeid)

Mudel katab 689 km² suuruse ala (vt joonis 4.1). See hõlmab kogu Võhandu jõe valgala Kirumpääst ülesvoolu.

Mudel loodi Maa-ameti Geoportaali avalikult kättesaadavate digitaalsete kõrgusmodelite andmete (DEM) abil (vt joonis 4.2).



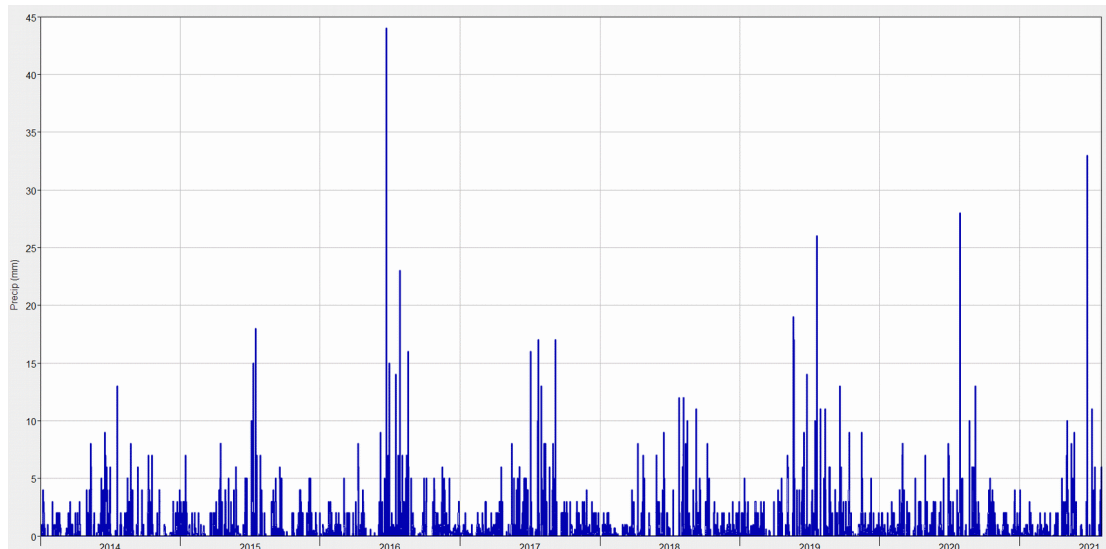
Joonis 4.2. DEM Roosisaare lähedal.

Mudel kasutab Keskkonnaagentuuri Riigi Ilmateenistuse Võru meteoroloogiajaama meteoroloogiliste vaatluste andmeid. Õhutemperatuuri ja sademete andmed on ajavahemiku 01.01.2014-02.08.2021 kohta. Andmete väljavõte tehti ISD andmestikust³. Sademete ja temperatuuri aegread on toodud vastavalt joonistel 4.3-4.4.

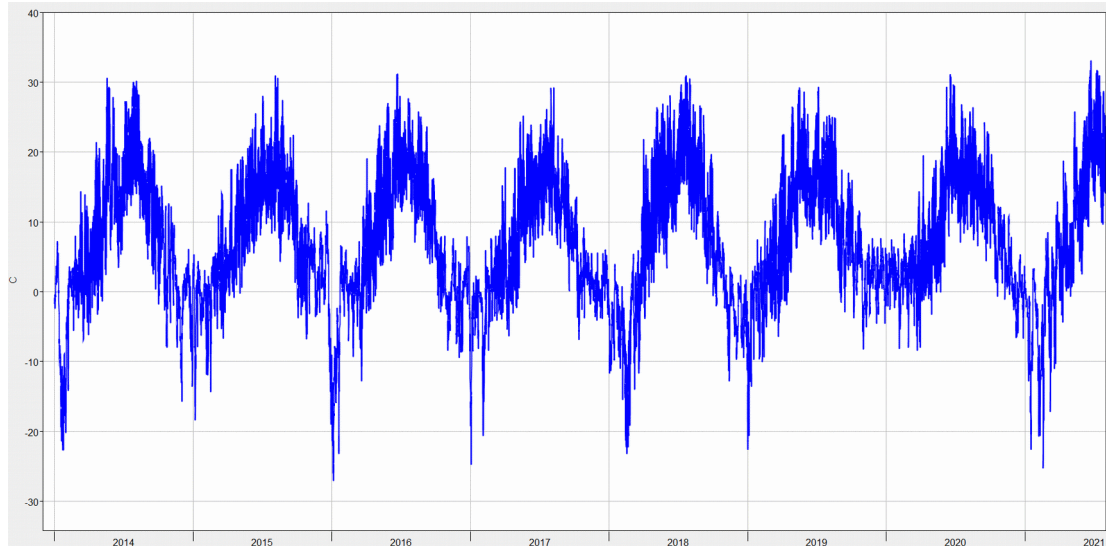
³ <https://www.ncei.noaa.gov/products/land-based-station/integrated-surface-database>

4.2 Mudeli kalibreerimine

Mudel kalibreeriti nii, et see vastaks Kirumpää hüdromeetriaajama äravoolu andmetele (punkt 10). Vooluhulga andmeid kasutati kalibreerimisperioodi 01.01.2015-31.12.2019 kohta. Vooluhulga andmed laaditi alla Keskkonnaagentuuri Riigi Ilmateenistuse veebilehelt⁴.



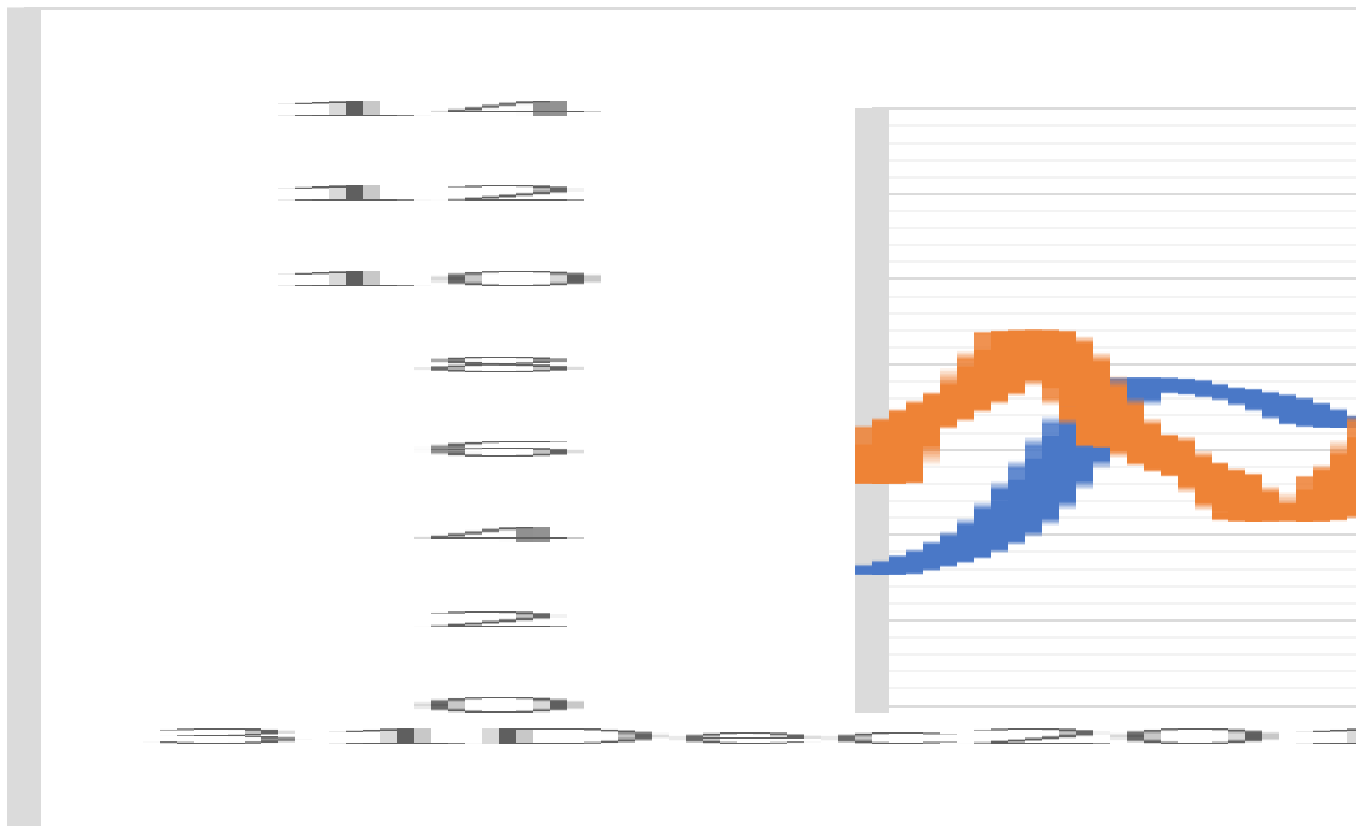
Joonis 4.3. Sademete aegread.



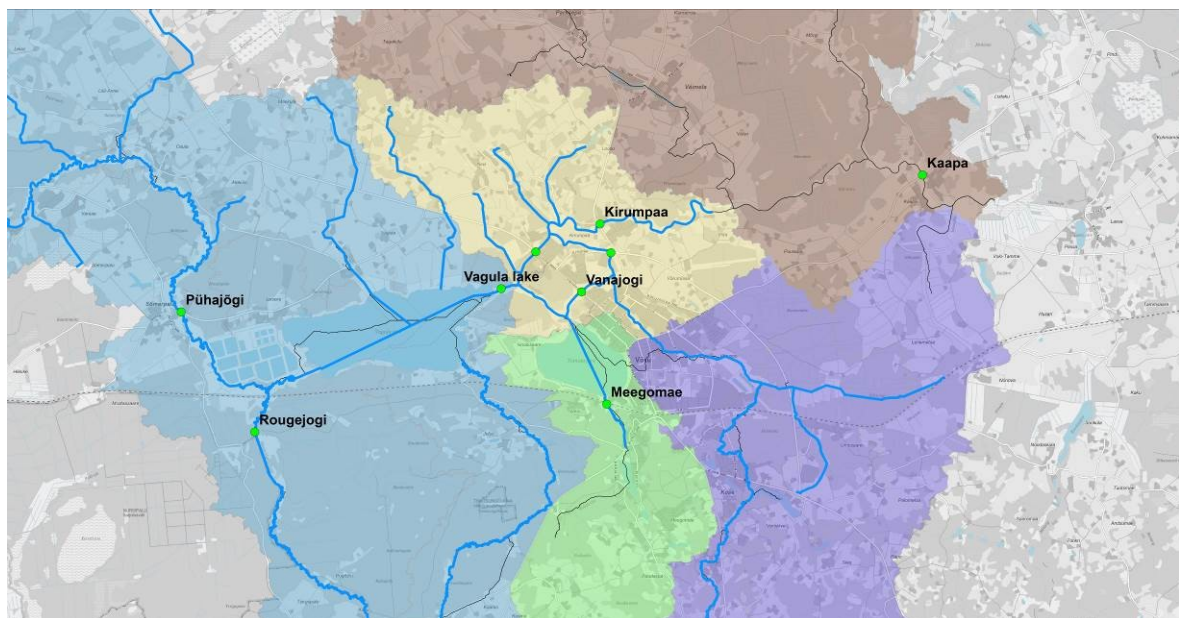
Joonis 4.4. Temperatuuri aegread.

Kalibreeritud mudel näitab *Nash-Sutcliffe*'i efektiivsust 0,291 ja protsentuaalset kõrvalekallet 1,68%, võrreldes Kirumpää jaamas mõõdetud andmetega (vt joonis 4.5).

⁴ <https://www.ilmateenistus.ee/siseveed/ajaloolised-vaatlusandmed/vooluhulgad/>



Joonis 4.5. Kirumpää jaamas mõõdetud (oranž graafik) vs modelleeritud (sinine graafik) vooluhulk.

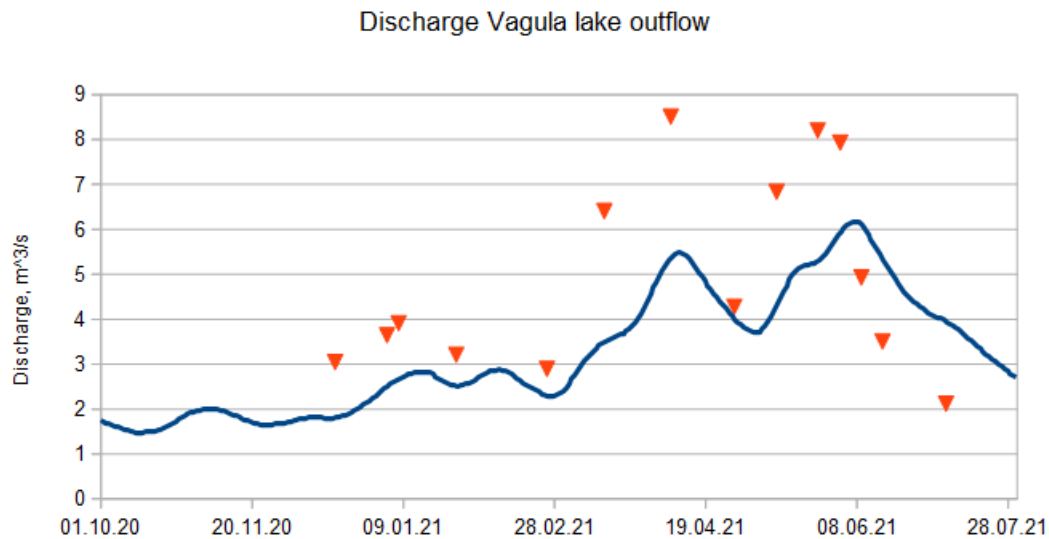


Joonis 4.6. Äravoolu mõõtejaamade asukoht hüdroloogilise mudeli valideerimiseks.

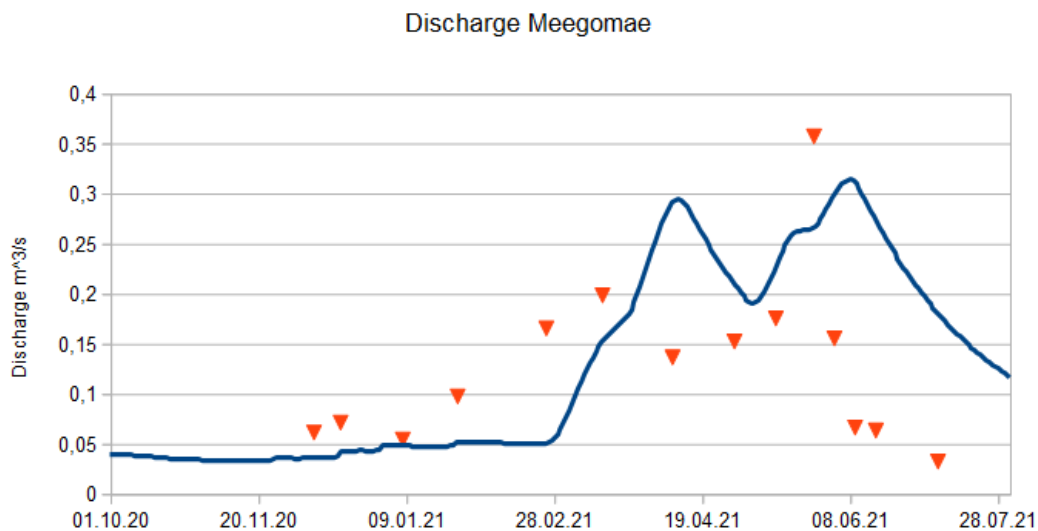
4.3 Mudeli valideerimine

Hüdroloogiliste mudelite tulemused valideeriti, võrreldes neid käesoleva projekti raames läbi viidud seire tulemustega (2. peatükk) erinevates vaatlusjaamades (vt asukohti joonisel 4.6).

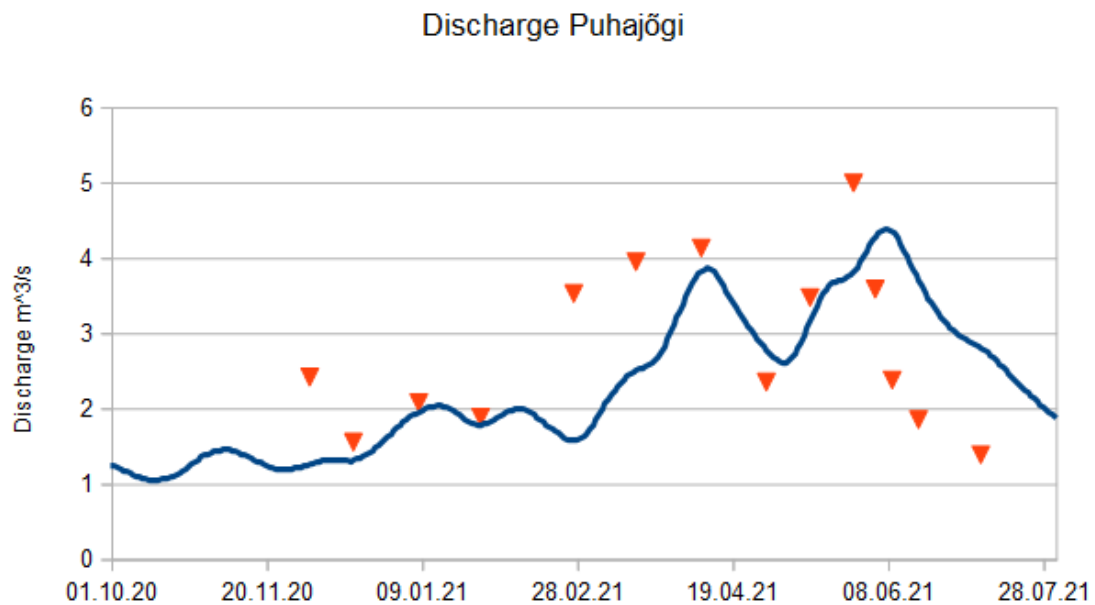
Valideerimine on näidatud aegreana mõõdetud ja modelleeritud äravoolu kohta neljas jaamas joonistel 4.7-4.10.



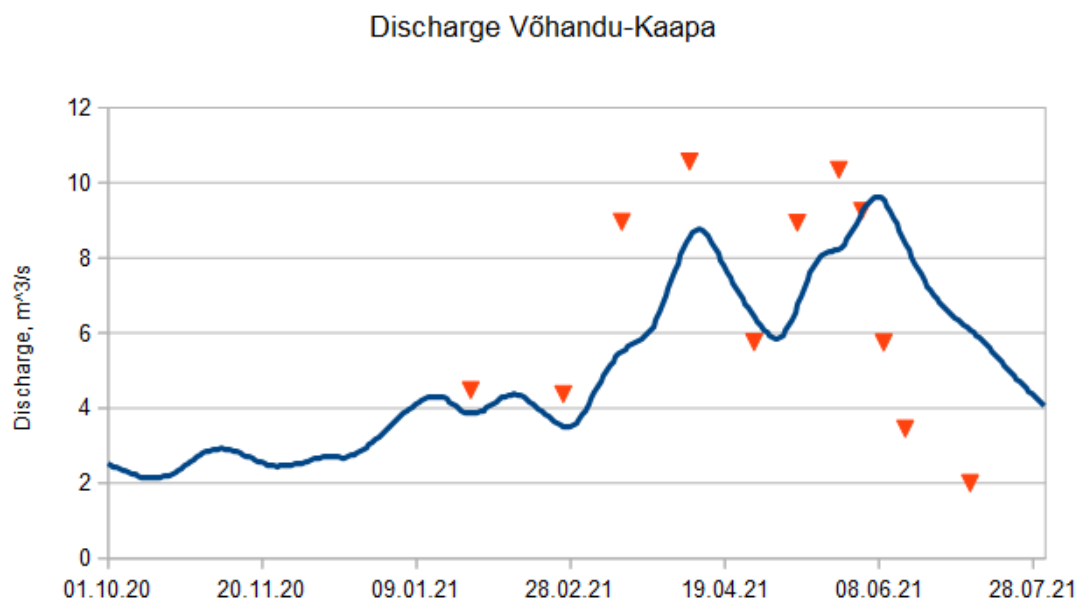
Joonis 4.7. Mõõdetud ja modelleeritud vooluhulgad Vagula järvest väljavoolu juures (punkt 6).



Joonis 4.8. Mõõdetud ja modelleeritud vooluhulgad Meegomäe ojas (punkt 3).



Joonis 4.9. Mõõdetud ja modelleeritud vooluhulgad Pühajõel (punkt 1).

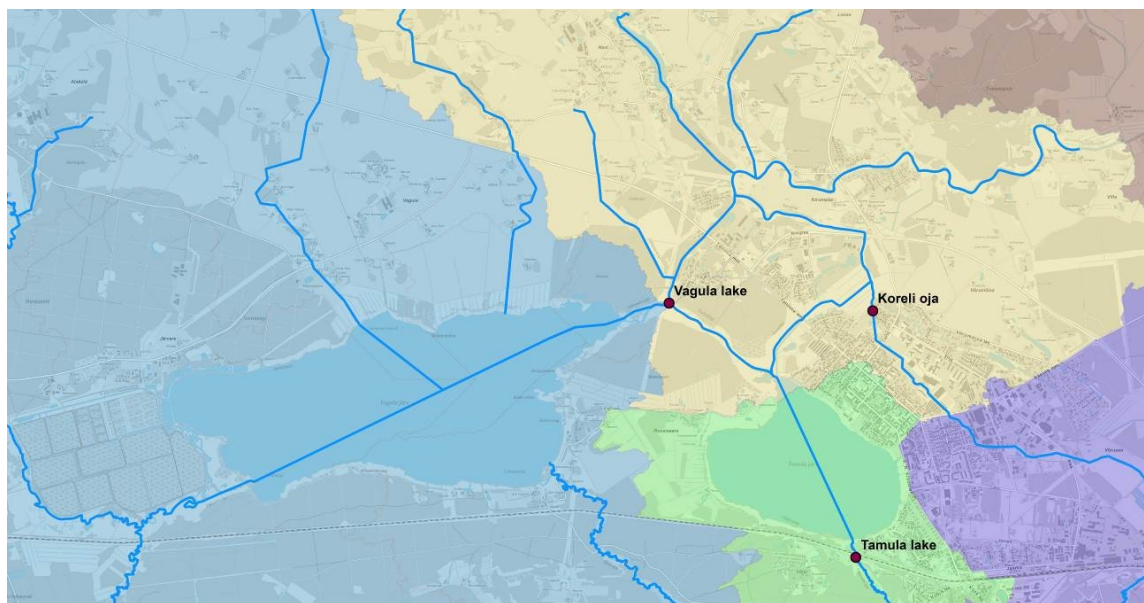


Joonis 4.10. Mõõdetud ja modelleeritud vooluhulgad Võhandu Kääpal (punkt 11).

4.4 Hüdrololoogilise mudeli kasutamine

Hüdrololoogiline mudel on välja töötatud selleks, et anda sissevoolu (äravoolu) sisendandmed hüdrodünaamilisele mudelile (4. peatükk) selle ülesvoolu jäävatel piiridel (joonis 4.11):

- Äravool Vagula järvest; siinkohal arvestatakse kogu Vagula järve valgala.
- Sissevool Tamula järve – Meegomäe oja; siinkohal arvestatakse kogu Tamula järve valgalaga.
- Sissevool Koreli oja kaudu.



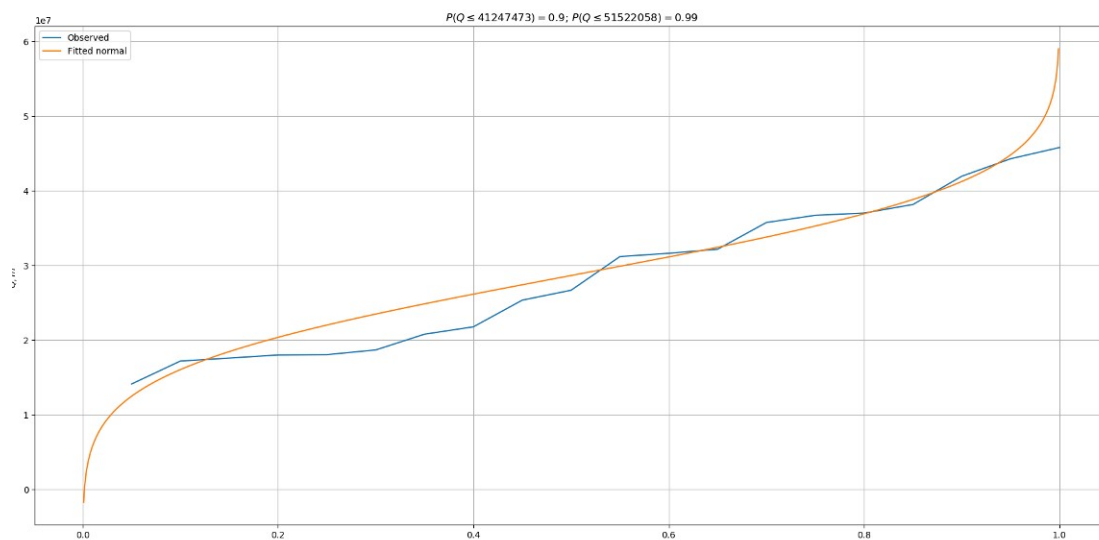
Joonis 4.11. Hüdrololoogilise mudeli poolt välja töötatud hüdrodünaamilise mudeli piiripunktide asukohad.

4.5 Üleujutuste esinemistõenäosuse arvutus

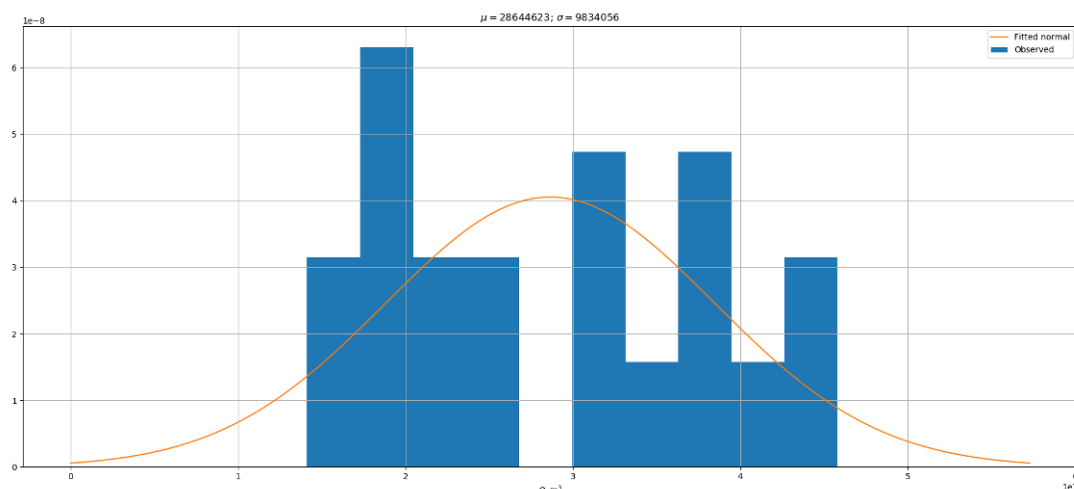
Hüdroloogilise mudeliga tehti arvutused 20-aastase perioodi (2001-2020) kohta, kasutades kogutud meteoroloogilisi andmeid. Mudeli tulemuste põhjal tehti Võhandu-Kirumpää mõõtmisjaama jaoks kaks üleujutuste esinemise tõenäosusstsenaariumi arvutust: üks kord 10 aasta jooksul ja üks kord 100 aasta jooksul. Tõenäosusstsenaariumite kohta leiti järgmised näitajad:

- Jõge läbiva vooluhulga kogumaht suveperioodil juuni-august.
- Suurim vooluhulk suvel juuni-september.

Üleujutuste esinemistõenäosuste arvutamiseks summeeriti iga suve vooluhulga kogumaht ja nende andmetega sobitati normaaljaotus (joonised 4.12-4.13). Seejärel tehti kindlaks standardhälvet ületavad väärtused (0.9 üks kord 10 aasta jooksul esineva üleujutuse jaoks ja 0.99 üks kord 100 aasta jooksul esineva üleujutuse jaoks).



Joonis 4.12. Kogu vooluhulgad suvel 20-aastase perioodi jooksul ja nende normaaljaotus.

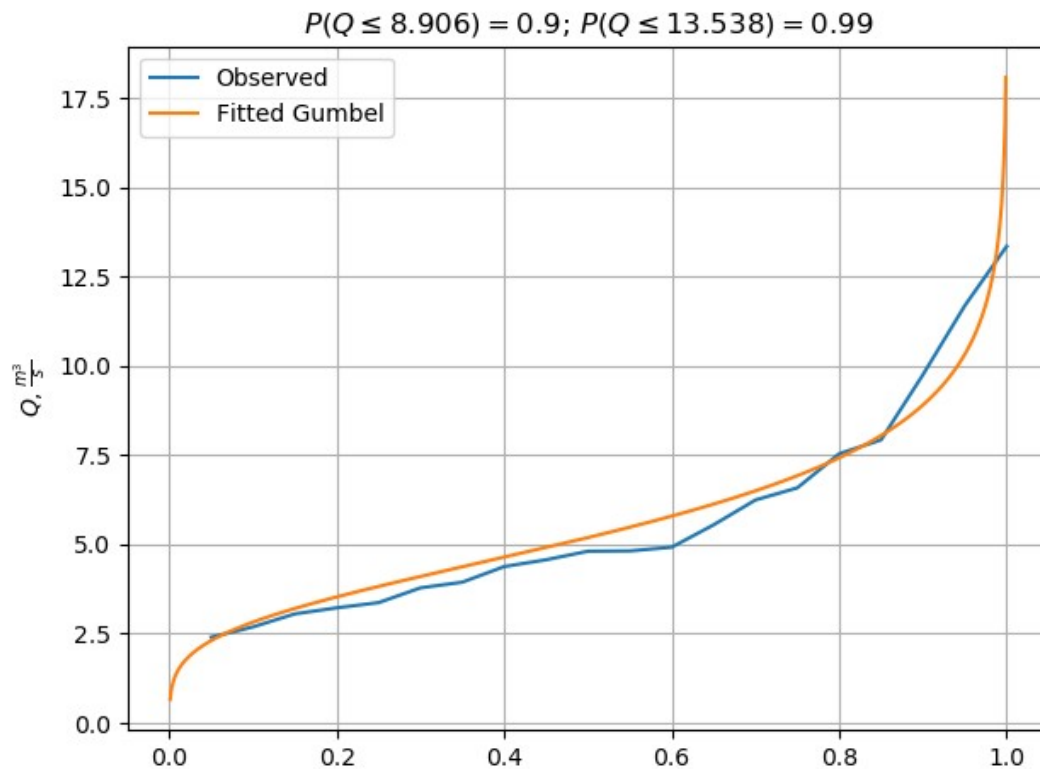


Joonis 4.13. Suviste vooluhulkade summade histogramm.

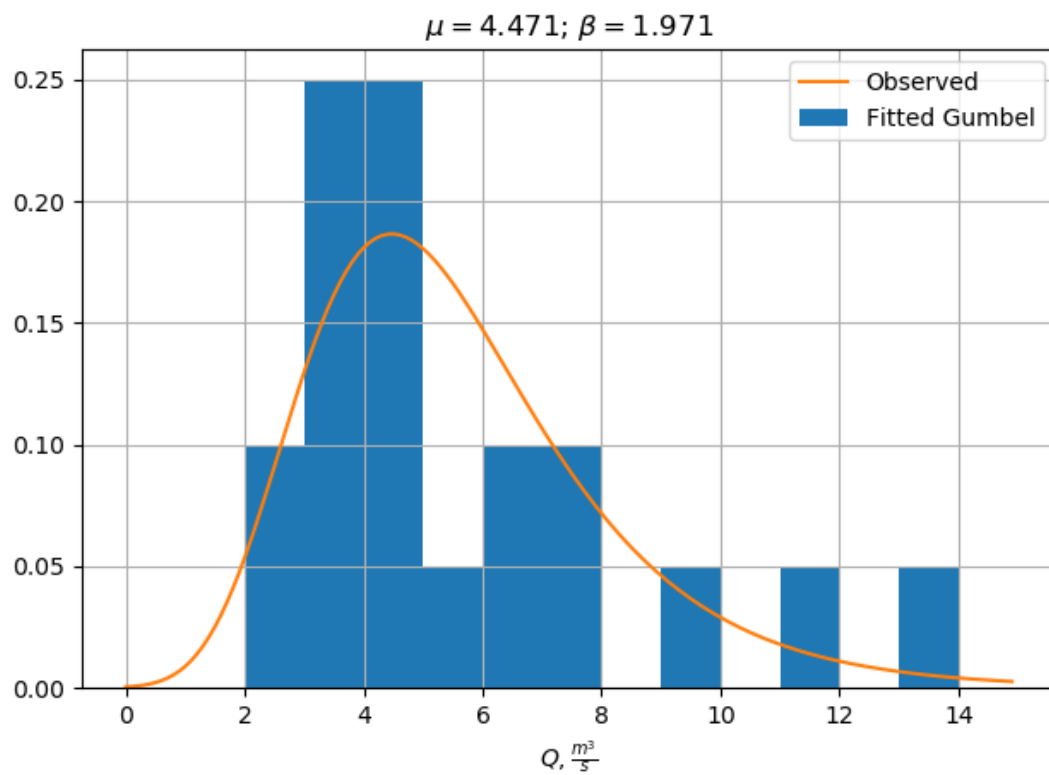
Suve suurima vooluhulga arvutamiseks erinevate esinemistõenäosuste korral kasutati järgmist algorütmi:

- arvutati maksimaalne suve vooluhulk iga aasta kohta;
- andmed sobitati Gumbeli jaotusega, mida kasutatakse ekstremaalväärtuste tõenäosuste arvutamiseks (joonised 4.14-4.15);
- vooluhulgad tõenäosustega 0.9 ja 0.99 võeti vastavalt üks kord 10 aasta ja üks kord 100 aasta jooksul korduvate üleujutuste vooluhulkadeks.

Leitud väärtused olid $8.9 \text{ m}^3/\text{s}$ iga 10 aasta tagant korduva ja $13.5 \text{ m}^3/\text{s}$ iga 100 aasta tagant korduva üleujutuse kohta.



Joonis 4.14. Maksimaalsed suvised vooluhulgad 20 aasta jooksul ja nendele sobitatud Gumbeli jaotus.



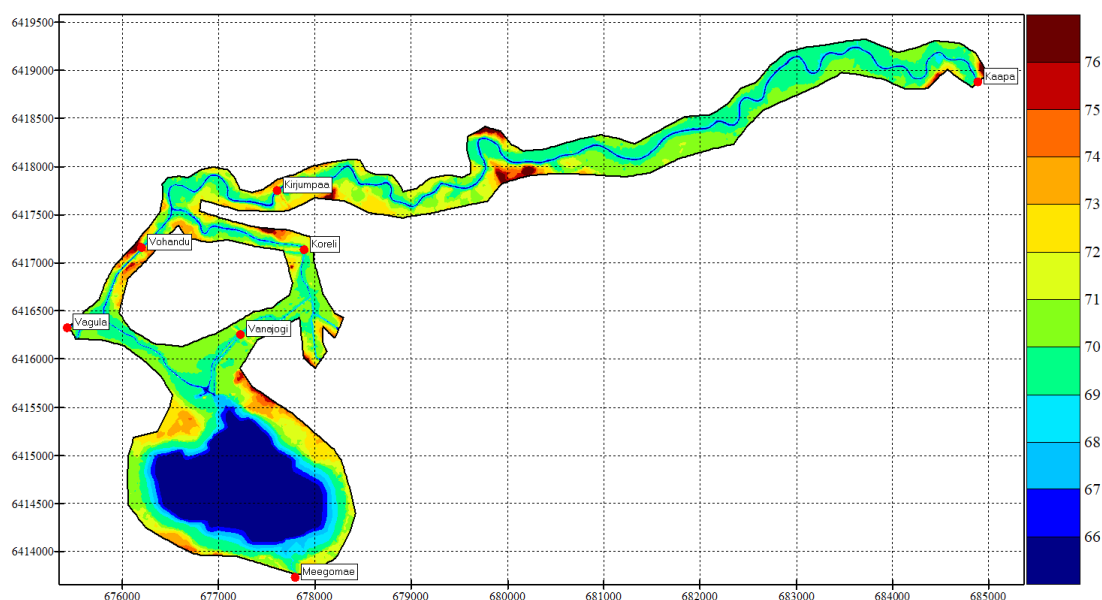
Joonis 4.15. Maksimaalsete vooluhulkade histogramm 20-aastase perioodi jooksul.

5 HÜDRODÜNAAMILINE MUDEL

5.1 Hüdrodünaamilise mudeli seadistamine

Üleujutuste jaoks olulise piirkonna kahemõõtmeliseks modelleerimiseks kasutati ettevõttesisest hüdrodünaamilist mudelit SwEvolver. SwEvolver on tarkvara, mis võimaldab teostada arvutusi mittepüsiva madala vee jaoks. Mudelit on PAIC-i üleujutuste uuringutes laialt kasutatud, nt Riia üleujutusriskide uuringus⁵ ja Leedu üleujutuste kaardistamisel.

Modelleerimispiirkond on näidatud joonisel 5.1.1. Sellesse kuuluvad Tamula järv, Võhandu kanal (Liitva kanal), Vahejõgi, Vanajõgi, Koreli oja, Võhandu jõgi kuni Kääpa sillani.



Joonis 5.1.1. Kahemõõtmeline modelleerimispiirkond.

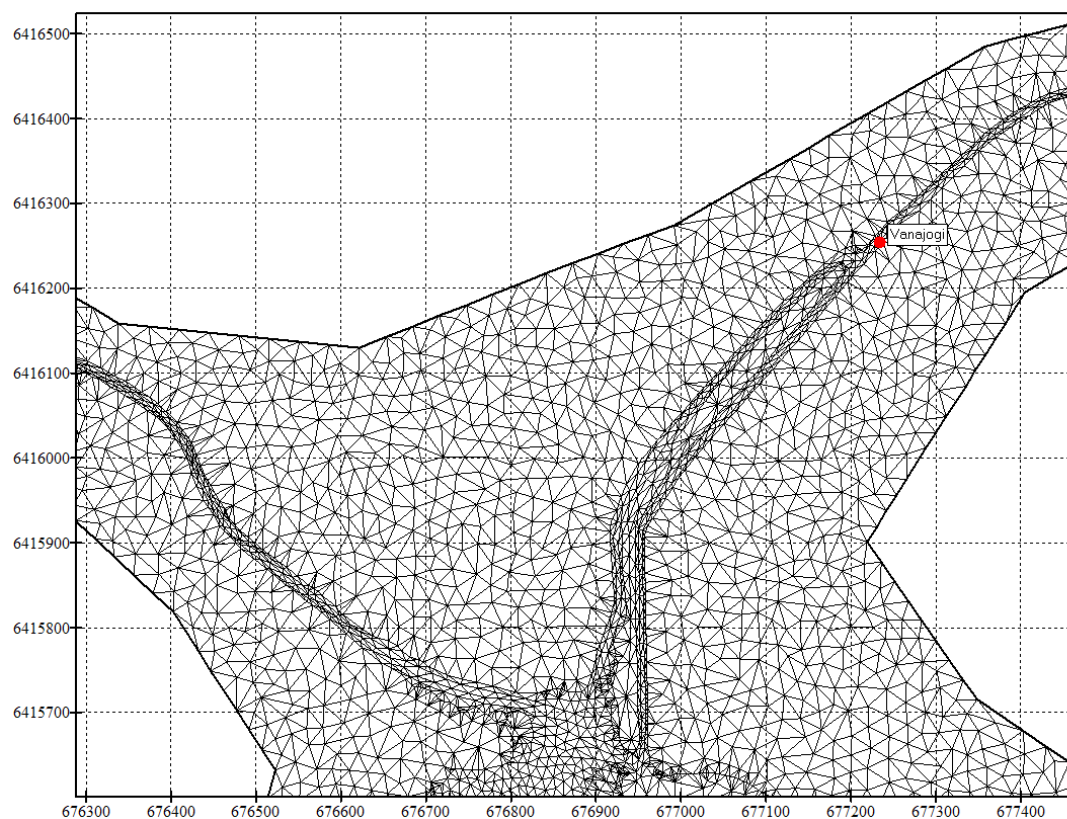
Mudel ulatub vooluveekogudest kaugemale, hõlmates ka potentsiaalselt üleujutatud alasid. Mudelis kasutatud kõrgusandmete aluseks on Maa-ameti (Geoportaali avalikud andmed) digitaalne kõrgusmudel (DEM), Kliendi esitatud Tamula järve sügavusandmed ning seirekampaania käigus mõõdetud läbilõiked.

Mudel kasutab muutuvat ruumilist diskreetimist (*spatial discretisation*). Joonisel 5.1.2 on väljavõte lõplike elementide võrest (*finite element mesh*) Roosisaare silla lähedal, Tamula järve väljavoolu juures.

Hüdrodünaamiline mudel nõuab 4 piiritingimust:

1. Kolm sissevoolu – vooluhulgad (a) väljavoolul Vagula järvest Q_v , (b) Meegomae oja sissevoolul Tamula järve Q_M ja (c) Koreli oja sissevoolul süsteemi Q_K .
2. Võhandu jõe veetase Kääpa silla juures, H_{kb} .

⁵ <https://www.rigapretpludiem.lv/>



Joonis 5.1.2. Lõplike elementide võrgustik (*finite element mesh*).

Projekti raames ei olnud ette nähtud Võhandu jõe sügavuse mõõtmisi. Seetõttu kasutati jõesängide absoluutsete kõrguse määramiseks seirekampaaniate käigus kogutud andmeid. Sügavused arvutati veetaseme ja maksimaalse mõõdetud sügavuse vahena, seirekampaaniate keskmisena (vt tabel 5.1.1).

Tabel 5.1.1. Maksimaalne mõõdetud sügavus (H), mõõdetud veetasemed (WL) ja arvutuslik jõepõhja kõrgus (Z).

kuupäev	H, m	WL, m	z, m	H, m	WL, m	z, m
	Kääpa sild			Koreli oja		
08.12	1.436	68.43	66.994	0.885	68.92	68.035
17.12	1.219	68.26	67.041	0.822	68.75	67.928
07.01	1.300	68.35	67.050	0.719	68.80	68.081
27.01	1.260	68.35	67.090	0.843	68.80	67.957
26.02	1.364	68.86	67.496	0.840	69.12	68.280
16.03	1.706	68.85	67.144	1.193	69.18	67.987
08.04	2.080	68.89	66.801	1.361	69.35	67.989
28.04	1.606	68.42	66.814	1.041	68.90	67.859
12.05	1.971	69.04	67.069	1.425	69.32	67.895
26.05	2.238	69.30	67.062	1.599	69.66	68.061
03.06	2.135	69.18	67.045	1.586	69.66	68.074
09.06	1.910	68.97	67.060	1.463	69.54	68.077
17.06	1.652	68.85	67.198	1.423	69.48	68.057
08.07	1.628	68.89	67.262	1.437	69.56	68.123
16.07	1.608	68.93	67.322	1.468	69.56	68.092
28.07	1.632	68.89	67.258	1.191	69.51	68.319

kuupäev	H, m	WL, m	z, m	H, m	WL, m	z, m
09.08	1.589	69.05	67.461	1.191	69.58	68.389
26.08	1.687	69.22	67.533	1.563	69.69	68.127
07.09	1.774	69.24	67.466	1.433	69.72	68.287
23.09	1.818	69.13	67.312	1.329	69.42	68.091
Vagula järve väljavool				Vanajõgi		
08.12	1.135	69.55	68.415	1.185	69.02	67.835
17.12	1.117	69.52	68.403	0.884	68.97	68.086
07.01	1.168	69.58	68.412	0.947	69.03	68.083
27.01	1.114	69.54	68.426	0.896	68.97	68.074
26.02	1.099	69.55	68.451	0.853	69.02	68.167
16.03	1.285	69.71	68.425	1.155	69.26	68.105
08.04	1.384	69.81	68.426	1.407	69.45	68.043
28.04	1.160	69.62	68.460	0.964	69.07	68.106
12.05	1.306	69.76	68.454	1.272	69.36	68.088
26.05	1.382	69.87	68.488	1.491	69.62	68.129
03.06	1.387	69.84	68.453	1.382	69.62	68.238
09.06	1.242	69.74	68.498	1.198	69.48	68.282
17.06	1.151	69.65	68.499	1.014	69.40	68.386
08.07	1.094	69.64	68.546	1.309	69.41	68.101
16.07	1.081	69.63	68.549	1.290	69.43	68.14
28.07	1.044	69.58	68.536	1.218	69.37	68.152
09.08	1.089	69.71	68.621	1.324	69.43	68.106
26.08	1.180	69.82	68.640	1.615	69.55	67.935
07.09	1.226	69.86	68.634	1.835	69.61	67.775
23.09	1.079	69.73	68.651	1.075	69.36	68.285
Võhandu kanal						
08.12	1.236	68.88	67.644			
17.12	1.114	68.71	67.596			
07.01	1.188	68.78	67.592			
27.01	1.150	68.79	67.640			
26.02	1.219	69.07	67.851			
16.03	1.425	69.12	67.695			
08.04	1.535	69.33	67.795			
28.04	1.122	68.86	67.738			
12.05	1.484	68.86	67.376			
26.05	1.706	69.54	67.834			
03.06	1.760	69.55	67.790			
09.06	1.603	69.41	67.807			
17.06	1.538	69.34	67.802			
08.07	1.596	69.38	67.784			
16.07	1.551	69.39	67.839			
28.07	1.535	69.34	67.805			
09.08	1.619	69.41	67.791			
26.08	1.887	69.53	67.643			
07.09	1.665	69.57	67.905			
23.09	1.471	69.31	67.839			

Jõesängi tuletatud keskmised kõrgused on tabelis 5.12. Saadud väärtuseid kasutati mudelis jõesängi loomiseks.

Tabel 5.1.2. Jõesängi kõrgus, m.

Kääpa	67.08
Koreli oja	68.03
Vagula järve väljavool	68.45
Vanajõgi	68.12
Võhandu kanal	67.59

5.2 Taimestiku ja Paidra paisu mõju hindamine

Hüdrodünaamilise mudeli otsene kasutamine ei ole võimalik, sest see vajab kahe täiendava teguri hindamist:

- taimestiku mõju arvestamiseks vee liikumisele võeti kasutusele Manning-Strickleri mudel;
- Paidra paisu mõju võeti arvesse analüütilise paisjoonena (*backwater curve*)⁶.

5.2.1 Paidra pais

DEM kõrgusmudeli ja välivaatluste andmete põhjal saadi Paidra paisu kõrguseks 67.8 m ning veetasemete erinevuseks vähemalt 1.45 (joonised 5.2.1-5.2.2). Paisu mõju projekteerimiseks ülesvoolu, kasutades paisjoont, on lisaks vaja ka võimalikku vee sügavust paisul.



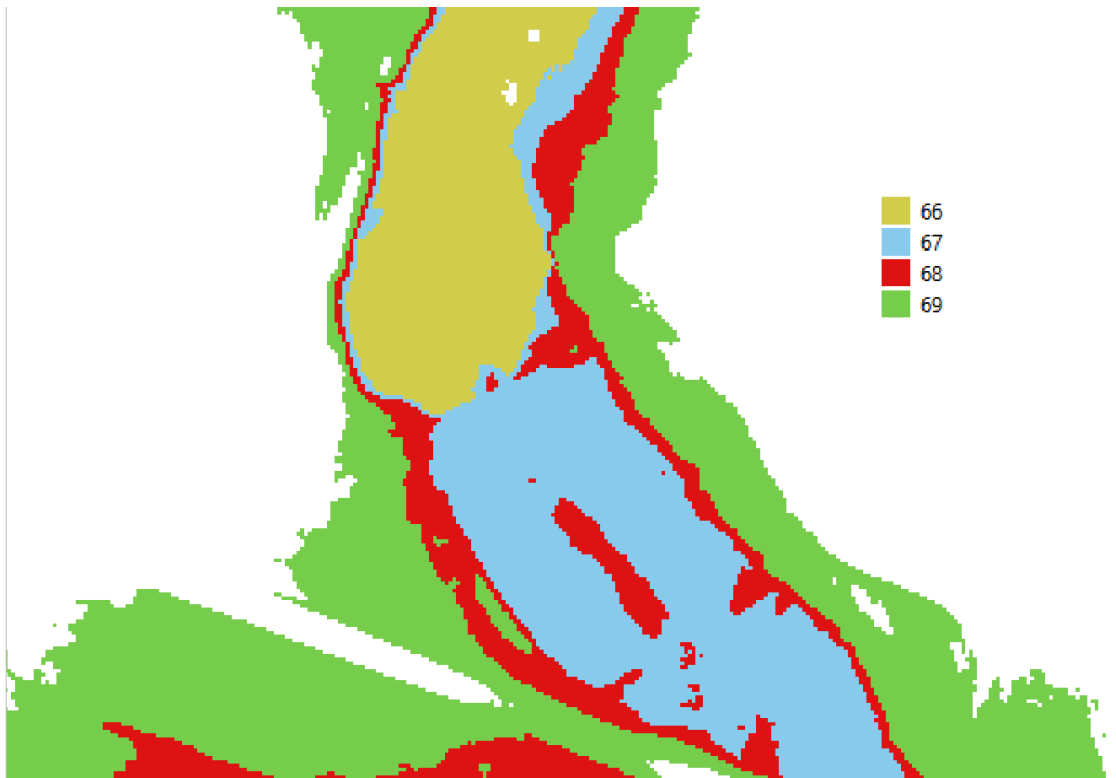
Joonis 5.2.1. Paidra paisu piirkond.

Esmane järeldus on, et Paidra pais võib ülesvoolu veevoolu mõjutada kuni Liitva kanalini välja, sest selle kõrgus 67.8 m on võrreldav kanali madalaima sügavusega, mis on 67.59 m.

Järgmiseks tuleb hinnata jõe langu järgmistel lõikudel: Võhandu-Kääpa ja Kääpa-Paidra.

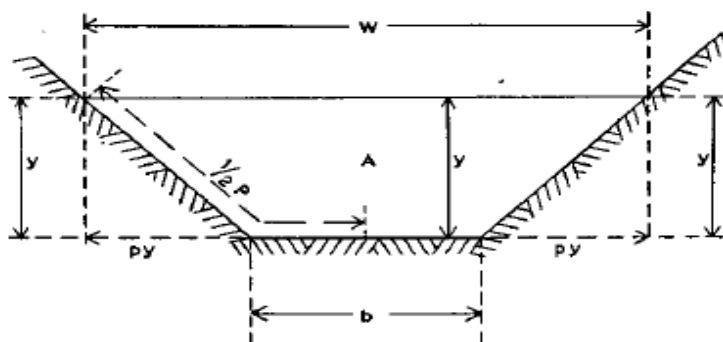
Võhandu asub jõe kilomeetritel 42.23, Kääpa 54.09 km, mis annab languks 0.41 m 11.86 km peale või $3.46 \cdot 10^{-5}$.

⁶ Hydraulics of open channels. BORIS A. BAKHMETEFF (1932).



Joonis 5.2.2. Kõrguste kaart Paidra paisu piirkonnas.

Paidra pais asub jõe 65.37 kilomeetril ehk 11.28 km Kääpa sillast allavoolu. On teada, et jõesängi kõrgus on seal vähem kui $67.8 - 1.45 = 66.35$. Kääpa-Paidra lõigu arvutuslik kalle on 66.69 m (0.39 m 11.28 km peale). Selle tulemusena me näeme, et Kääpa-Paidra lõigu lang on suurem kui eelneval lõigul. Täpsemalt, lang on vähemalt 0.73 m 11.28 km peale, või $6.47 \cdot 10^{-5}$.



Joonis 5.2.3. Ristlõige.

Paisjoone arvutamiseks on vaja luua vooluhulga mõõtmiste asukohtade (tabel 5.1.2) ristlõiked. Ristlõigetel (joonis 5.2.3) on järgmised parameetrid: jõepõhja laius b , veepinna laius w ja nõlva kalle P .

Nende väärtuste leidmiseks kasutati DEM kõrgusmodelit. Mudelist saadi keskmine veepinna ulatus W ja jõekalda kõrgus d_2 . Jõepõhja kõrgus d_1 saadi seirekampania käigus tehtud mõõtmistelt.

Eelduseks võeti, et jõepõhja laius on $b = W / 2$, seega kalle on $p = \frac{W}{(d_2 - d_1) \cdot 4}$.

Täpsed väärtused, mis oleksid kooskõlas mõõdetud vooluhulkade ja veetasemetega, määrati kalibreerimise teel, mille käigus minimeeriti b and d_2 kohta tehtud eelduste poolt põhjustatud vigu. Geomeetriliste näitajate kokkuvõte on tabelis 5.2.1.

Tabel 5.2.1. Ristlõigete parameetrid.

	Kääpa	Koreli	Vagula	Vanajõgi	Võhandu
W	15.2	3.8	21.4	5.1	11.3
d_1	67.08	68.03	68.45	68.12	67.59
d_2	68.65	68.90	69.30	69.00	69.8
b	6.20	3.86	10.61	3.20	3.21
p	3.48	3.30	2.07	0.46	2.64

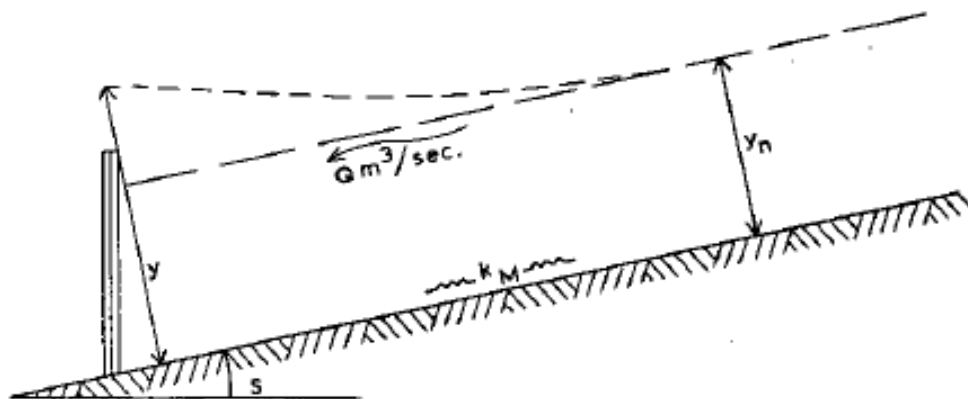
Pindala, übermõõdu ja hüdraulilise raadiuse saab veetasemega y siduda valemis:

$$A(y) = (b + py)y;$$

$$P(y) = b + 2y\sqrt{1 + p^2};$$

$$R(y) = A / P.$$

Vooluhulga valem on $Q(h) = A(h) \cdot k_M R^{2/3}(h) S^{1/2}$, kus S - kalle. Selle kaudu saab väljendada veetaset pöördvõrdeliselt $h = Q^{-1}(h)$.



Joonis 5.2.4. Analüütilise paisjoone arvutamise illustratsioon.

Keskmine hüdrauliline raadius veetasemete y_n ja y_0 vahel (joonis 5.2.4) on $\bar{R}$.

Proportsionaalne veetaseme muutus on $\eta = y / y_n$. Hüdraulilise astendaja valem on

$$\eta^n = \frac{A^2 R^{4/3}(y_0)}{A^2 R^{4/3}(y_n)}, \text{ seega astendaja on } n = \ln(\eta^n) / \ln(\eta).$$

Keskmine hüdrauliline takistustegur on $C = k_M \bar{R}^{1/6}$, funktsioon on integraalavaldis

$$B(\eta) = - \int_0^\eta \frac{d\eta}{\eta^n - 1}, \text{ faktoriga } \beta = \frac{C^2 WS}{gP}.$$

Iga veetaseme kohta arvutati $X = \eta - (1 - \beta)B(\eta)$. Iga kahe teadaoleva veetaseme erinevuse saab arvutada $L = (X_1(\eta_1) - X_2(\eta_2))y_n / S$, kus $\eta_i = y_i / y_n$. Veetaseme arvutamiseks ühes kindlas kohas kasutatakse interpoleerimist.

Paidra paisu hinnatud mõju veetasemetele Kääpa silla juures ja Võhandu kanalis on kokku võetud tabelis 5.2.2. Paidra paisu mõju võib ulatuda kuni 30 cm-ni Kääpa silla juures ning 13 cm-ni Võhandu kanalis.

Tabel 5.2.2. Paidra paisu hinnatud mõju, väljendatuna veetaseme liigmäära (m) kaudu.

	Kääpa	Võhandu kanal
09. juuni	0.081	0.041
17. juuni	0.260	0.100
08. juuli	0.266	0.102
16. juuli	0.271	0.103
28. juuli	0.296	0.132
09. aug	0.274	0.104
26. aug	0.254	0.099
07. sept	0.220	0.091
23. sept	0.181	0.074

5.2.2 Taimkatte mõju

Kirjanduse põhjal on teada, et taimede kasv võib veevoolu takistust muuta kuni kolm korda⁷.

Manningi kareduskoefitsendi valem on⁸

$$K_M = 0.035 + 0.0239 \frac{K_{va}}{VR},$$

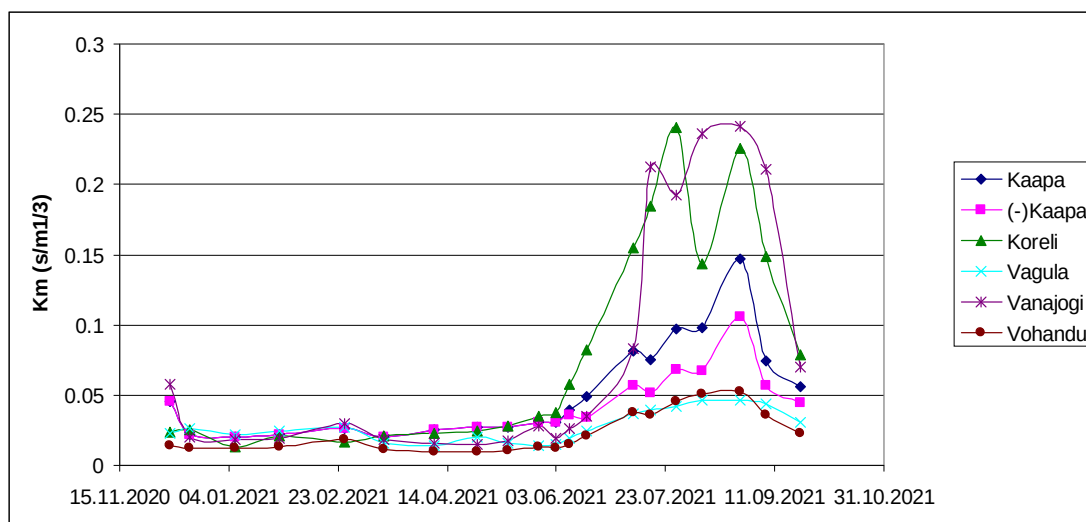
kus K_{va} on taimkatte koefitsient. Taimkatte mõju kvantitatiivselt hindamiseks on vaja kiiruse ja hüdraulilise raadiuse tuletise VR arvutamist igal ajahetkel. Ülaloodud valemis kasutati VR vahemikua 0.04 kuni 0.11 vooluhulga 4 m³/s juures ehk tingimustes, mis üldjoontes vastavad käsitletavale olukorrale.

Muutused arvutatud (Manningi) kareduskoefitsient mõõtmisperioodi jooksul on joonisel 5.2.5. Vastav aegrida arvutatud taimkatte koefitsientidega on joonisel 5.2.6. Aegrida “(-)Kääpa” vastab Kääpa silla lähedasele ristlõikele, kus voolutakistus on

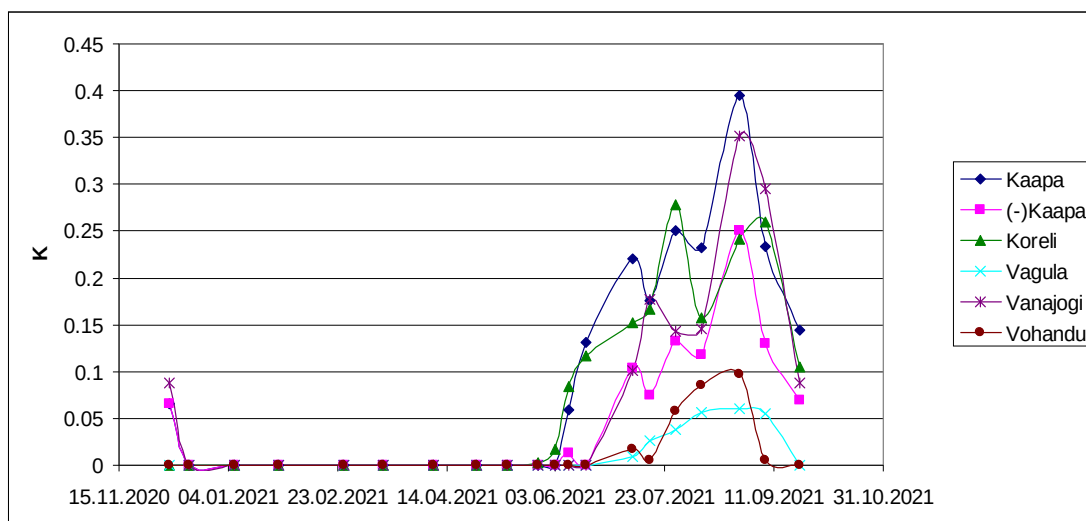
⁷ Shih S. F. Rahi G. S. (1981) Seasonal variation of Manning's roughness coefficient in a subtropical marsh. Trans. ASAE 25 (1), 116–119

⁸ Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Kanals and Flood Plains. GEORGE J. ARCEMENT, JR., and VERNE R. SCHNEIDER. U.S. GEOLOGICAL SURVEY WATER-SUPPLY PAPER 2339

arvutatud ilma Paidra paisu mõjuta. Tuleb arvesse võtta, et taimkatte mõju Vagula väljavoolul ja Liitva (Võhandu) kanalis on väiksem kui teistes töös käsitletud lõikudes.



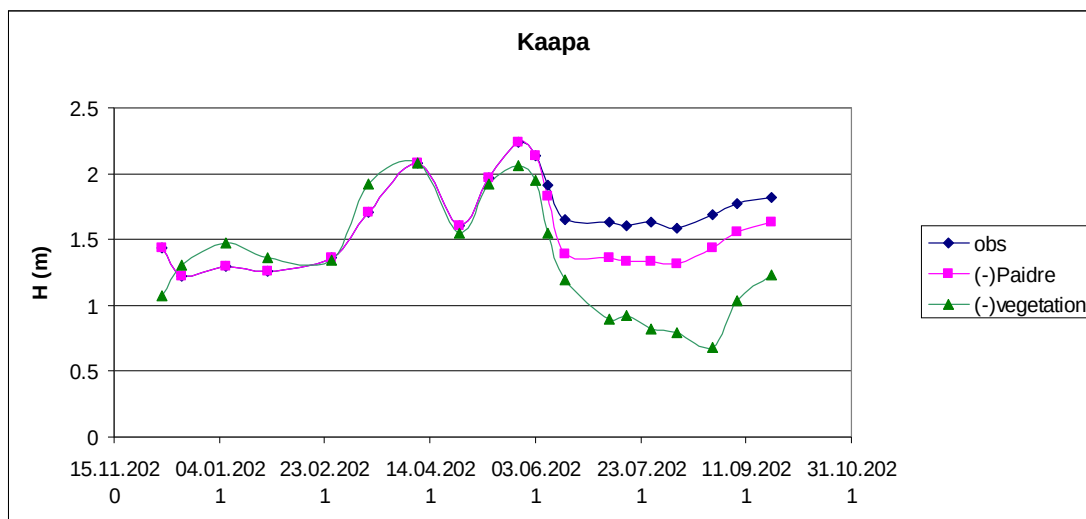
Joonis 5.2.5. Aegrida arvutatud Manningi koefitsientidega mõõtmisperioodi ajal.



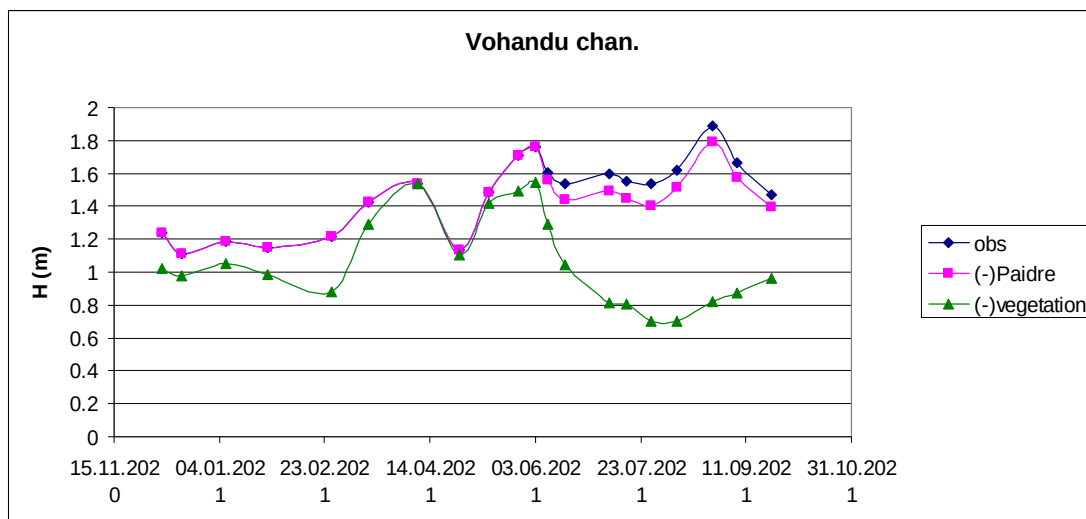
Joonis 5.2.5. Aegrida arvutatud taimkatte koefitsiendiga mõõtmisperioodi ajal.

Paidra paisu ja taimkatte mõju võrdlemiseks vt jooniseid 5.2.6 ja 5.2.7. Sinine joon on mõõdetud sügavus. Roosa “(-)Paidra” ja roheline “(-)vegetation” on hüpoteetilised väärtused, mis on arvutatud vastavalt ilma Paidra paisuta ja ilma taimestikuta. Taimestiku eemaldamise mõju kajastab siin kogu taimkatte eemaldamist jõesängist ning ei ole võrdsustatav taimkatte niitmisega ülejutuste leevendamise meetmena.

Paidra paisu mõju väheneb ülesvoolu. Taimkatte mõju ilmneb juunis ja väheneb septembris.



Joonis 5.2.6. Vee sügavus Kääpa silla juures Paidra paisuga ja ilma ning taimkattega ja ilma.



Joonis 5.2.7. Vee sügavus Võhandu (Liitva) kanalis Paidra paisuga ja ilma ning taimkattega ja ilma.

5.3 Hüdrodünaamilise mudeli kalibreerimine

Hüdrodünaamilise mudeli kalibreerimine teostati püsiolukorrale, kus jõesängis on välja arenenud suvine taimestik ja voolutakistus on suur (madal vooluhulk, kõrge veetase). See olukord vastab 26. augusti 2021 seirekampaniale.

Lisaks tehti hüdrodünaamilise mudeli valideerimine kahele olukorrale, mis erinevad voolu takistatusse poolest:

1. Keskmise taimestikuga olukord (vooluhulk on võrreldav kalibreerimisel kasutatud stsenaariumiga, madalam veetase), vastab 7/8. juulile 2021.
2. Areneva taimestikuga olukord (kõrgem vooluhulk, veetase võrreldav kalibreerimisel kasutatud stsenaariumiga), vastab 16/17. juunile 2021.

Paidra paisuga arvestati kõigis kolmes stsenaariumis (alapeatükk 5.2.1). Eeldus on, et mudel, mis selgitab neid kolme põhimõtteliselt erinevat voolurežiimi, on sobiv edasiseks stsenaariumite modelleerimiseks.

Tabel 5.3.1. Kalibreerimise ja valideerimise piirtingimused

Piirtingimus	16/17. juuni	7/8. juuli	26. aug
Q_v , l/s	3503	2120	1918
Q_m , l/s	64	33	63
Q_k , l/s	316	129	208
H_{kb} , m	68.85	68.89	69.22

Kõigi kolme stsenaariumi piirtingimuste kokkuvõte on tabelis 5.3.1. Tähelepanu saab pöörata sellele, et sama veetase juunis ja juulis mõõdeti 1.75 kordse vooluhulga erinevuse juures.

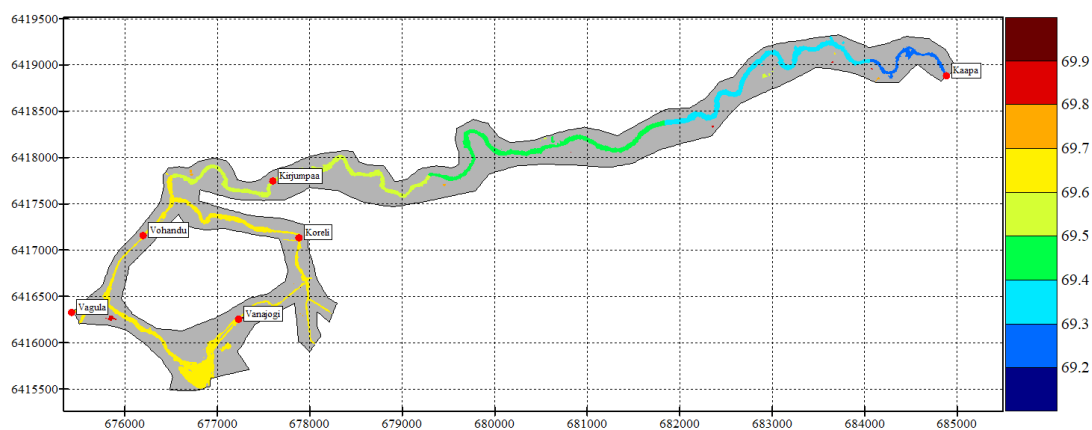
Tabel 5.3.2. Valitud punktide mõõdetud (Mõõt) ja modelleeritud (Mod) veetasemete ja vooluhulkade võrdlus

Parameeter	16/17-Jun		7/8-Jul		26-Aug	
	Mõõt	Mod	Mõõt	Mod	Mõõt	Mod
$H_{Koreli\ oja}$, m	69.48	69.43	69.55	69.45	69.69	69.62
$H_{Vagula\ järv}$, m	69.65	69.54	69.64	69.53	69.82	69.67
$H_{Vanajõgi}$, m	69.65	69.50	69.64	69.50	69.55	69.65
$H_{Võhandu\ kanal}$, m	69.35	69.44	69.38	69.45	69.54	69.62
$H_{Kirumpää}$, m	69.18	69.35	69.26	69.38	69.43	69.56
$Q_{Võhandu\ kanal}$, l/s	2983	2638	1822	1690	1872	1740
$Q_{Võhandu\ kanal}$, %	78.7%	75.3%	80.7%	74.9%	83.9%	80.0%

Kalibreerimise eesmärk oli saavutada mõõdetud ja modelleeritud veetasemete vastavus. Mõõdetud ja modelleeritud veetasemed on kokku võetud tabelis 5.3.2. Teine kalibreerimise eesmärk oli saavutada vastavus Võhandu (Liitva) kanalis ($Q_{Võhandu\ kanal}$) mõõdetud ja modelleeritud vooluhulkade vahel ja nende osakaalus hüdrodünaamilise

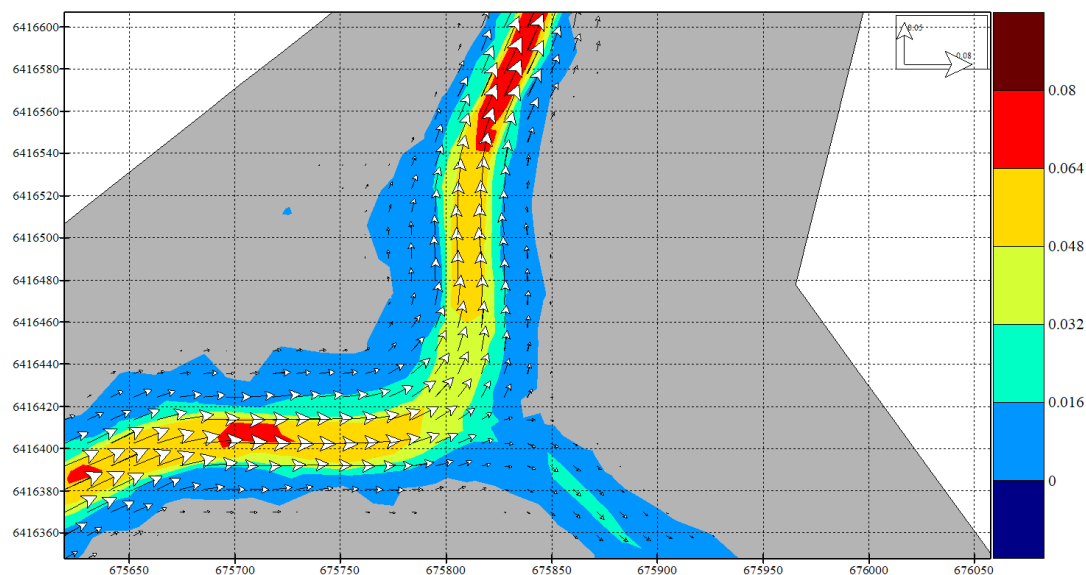
süsteemi kogu vooluhulgas. Veevoolu jaotus Võhandu kanali ja Vahejõe vahel on samuti tabelis 5.3.2.

Veetaseme jaotus kalibreerimise situatsioonis mudeli ulatuses on joonisel 5.3.1 (välja arvatud Tamula järv). Tasub tähele panna, et veetaseme erinevused Tamula järve, Võhandu kanali ja Vanajõe vahel on väga väikesed kuni nende liitumiskohani.



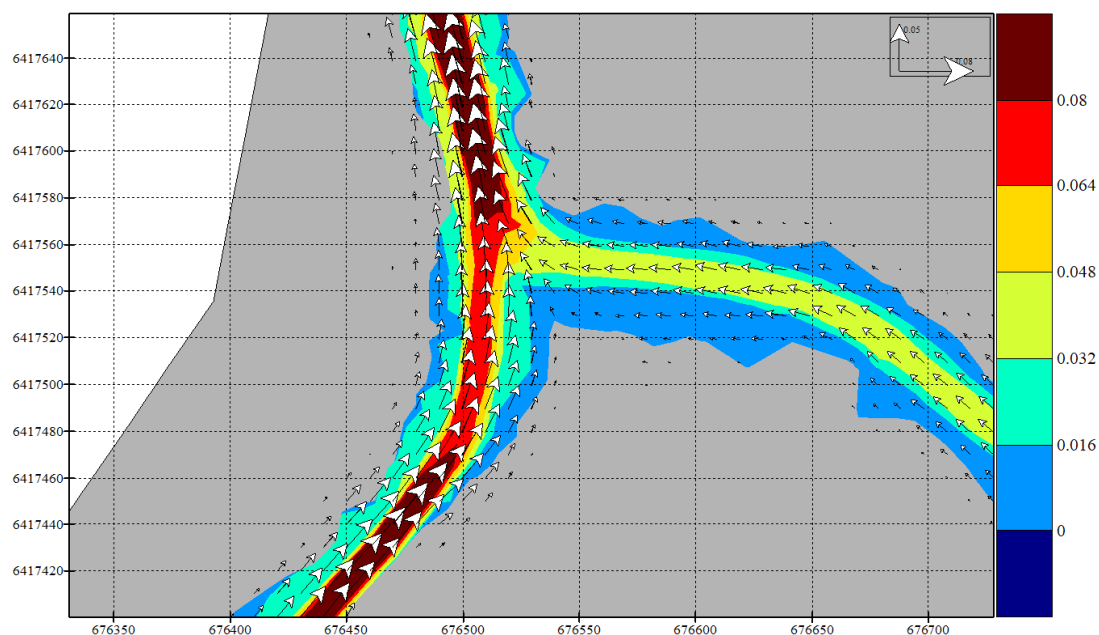
Joonis 5.3.1. Veetasemed modelleeritud alal kalibreerimise (26. augusti 2021) stsenaariumis.

Veevoolu jaotus Võhandu kanali ja Vahejõe vahel on esitatud tabelis 5.3.2. Olenemata vaadeldavast juhtumist, voolab ligikaudu 80% veest läbi Võhandu kanali. Hüdrodünaamiliste väljade illustatsioon on toodud Võhandu kanali mõlema otsa kohta joonistel 5.3.2-5.3.3.



Joonis 5.3.2. Veevoolu jaotumine Võhandu kanali/Vahejõe hargnemiskohas, kalibreerimise (26. augusti 2021) stsenaarium.

Kalibreeritud Manningi koefitsient jõe põhiharus oli augustis 0.12, juunis ja juulis vastavalt 0.04 ja 0.075. Juuni ja juuli Manningi koefitsiendid vastavad tüüpilisele kivise põhjaga ja kasvava taimeistikuga jõele⁹. Kalibreeritud väärtus augusti jaoks on lähedane tiheda taimeistiku karedustegurile¹⁰.



Joonis 5.3.3. Veevoolu jaotus Koreli oja/Võhandu kanali liitumiskohas kalibreerimise (26. augusti 2021) stsenaarium.

Kalibreeritud Manningi koefitsiendid vastavad üldjoones alapeatükis 5.2.2. hinnatud Manningi koefitsientidele. Koefitsiendid on välja toodud tabelis 5.3.3.

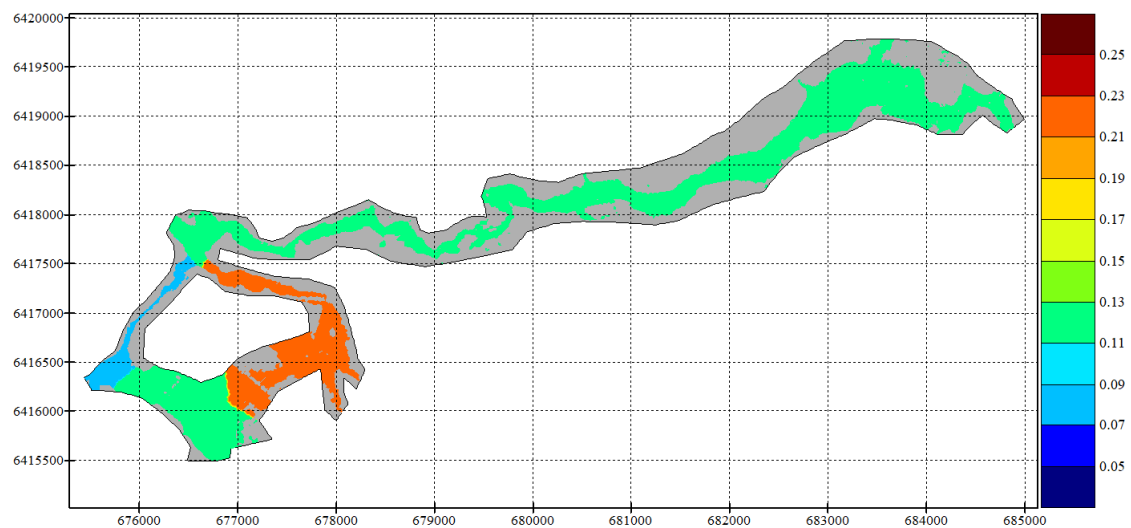
Tabel 5.3.3. Muutused (Manningi) kareduskoefitsiendid mõõtmisperioodi jooksul.

	Kääpa	Koreli oja	Vagula järv	Vanajõgi	Võhandu kanal
17. juuni	0.049	0.082	0.024	0.035	0.021
08. juuli	0.081	0.155	0.036	0.083	0.037
26. aug	0.147	0.226	0.046	0.241	0.052

Kõikides mudeli stsenaariumites kasutati Manningi koefitsiendi ruumilist jaotust mudeli määramisala piires vastavalt välitööde käigus kogutud andmetele, vt joonis 5.3.4.

⁹ Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Kanals and Flood Plains. GEORGE J. ARCEMENT, JR., and VERNE R. SCHNEIDER. U.S. GEOLOGICAL SURVEY WATER-SUPPLY PAPER 2339

¹⁰ Shih S. F. Rahi G. S. (1981) Seasonal variation of Manning's roughness coefficient in a subtropical marsh . Trans. ASAE 25 (1), 116–119.



Joonis 5.3.4. Manningi koefitsiendi jaotus kalibreerimise (26. augusti 2021) stsenaariumi korral.

6 MODELLEERIMINE

6.1 Baasstsenaarium (algsituatsioon)

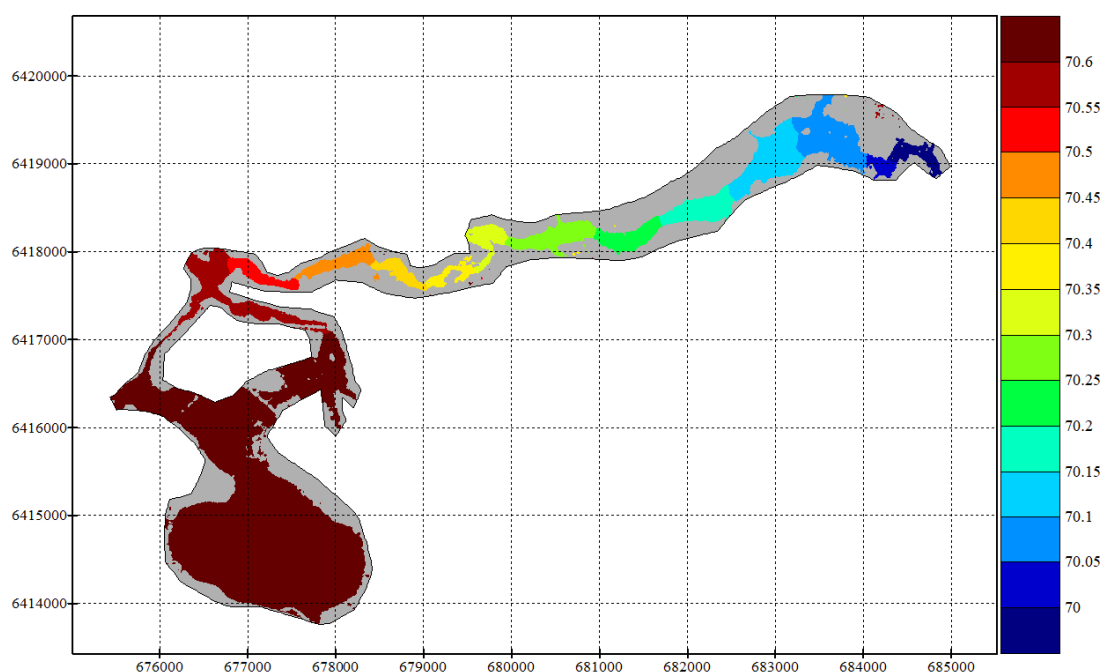
Baasstsenaarium (algsituatsioon) on suvine suurvesi, mis esineb tõenäosusega üks kord 10 aasta jooksul. Baasstsenaariumi arvutuskäik tehti suure voolutakistusega ja kõrge vooluhulgaga olukorrale, mis arvestab Paidra paisu mõjuga. Stsenaarium arvestab suvise täielikult välja arenenud taimestikuga.

Stsenaariumi piirtingimused on kirjeldatud tabelis 6.1 – vooluhulgad Vagula järve väljavoolul, Meegomäe ojas ja Koreli ojas ning veetase Kääpa silla juures.

Tabel 6.1. Baasstsenaariumi piirtingimused.

Piirtingimus	Väärtus
Q_V , l/s	7528
Q_M , l/s	342
Q_K , l/s	683
H_{kb} , m	70.07

Veetase H_{kb} arvutati, kasutades Manning-Stickleri võrrandit Kääpa silla juures mõõdetud ristlõikel. Manningi karedustegur, mis leiti 8. juuli 2021 mõõtmiste põhjal, on 0.057. Vaba vooluga veetase on sel juhul 69.92 m. Paidra paisu mõju lisamisel tõuseb veetase 70.07 m.



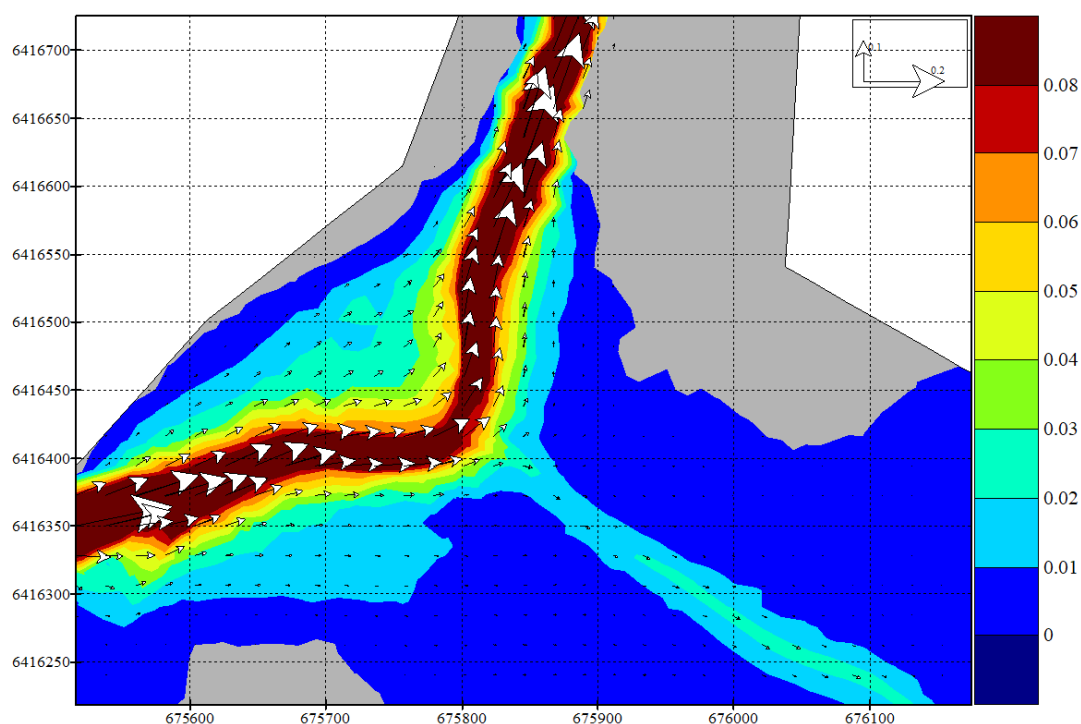
Joonis 6.1. Veetaseme jaotus mudelis baasstsenaariumi (algsituatsiooni) korral.

Veetaseme jaotus on esitatud joonisel 6.1, mõned olulisemad väärtused on välja toodud tabelis 6.2.

Joonistel 6.2-6.3 on esitatud hüdrodünaamilised väljad Võhandu (Liitva) kanali mõlema otsa kohta.

Tabel 6.2. Veetase valitud punktides baasstsenaariumi korral.

Asukoht	Veetase, m
$H_{\text{Koreli oja}}$	70.070
$H_{\text{vagula järv}}$	70.569
$H_{\text{vanajõgi}}$	70.601
$H_{\text{Võhandu kanal}}$	70.591
$H_{\text{Koreli oja}}$	70.556
H_{Tamula}	70.594
$H_{\text{Kirumpää}}$	70.487

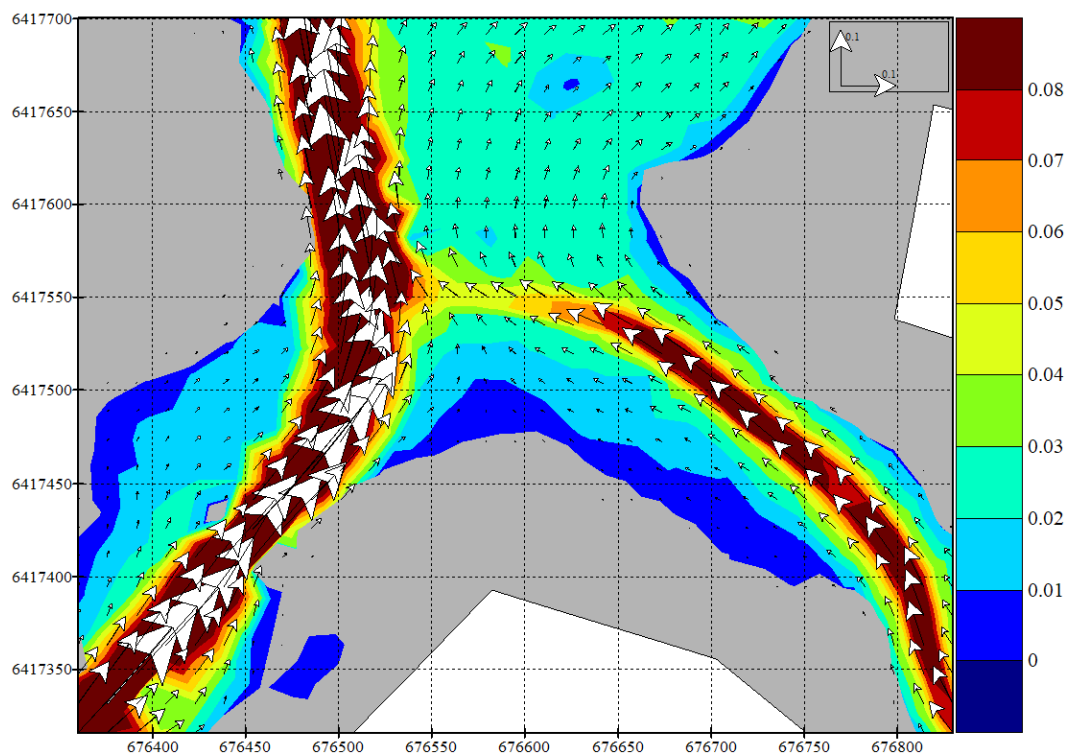


Joonis 6.2. Veevoolu jaotus Võhandu kanali/Vahejõe hargnemisel.

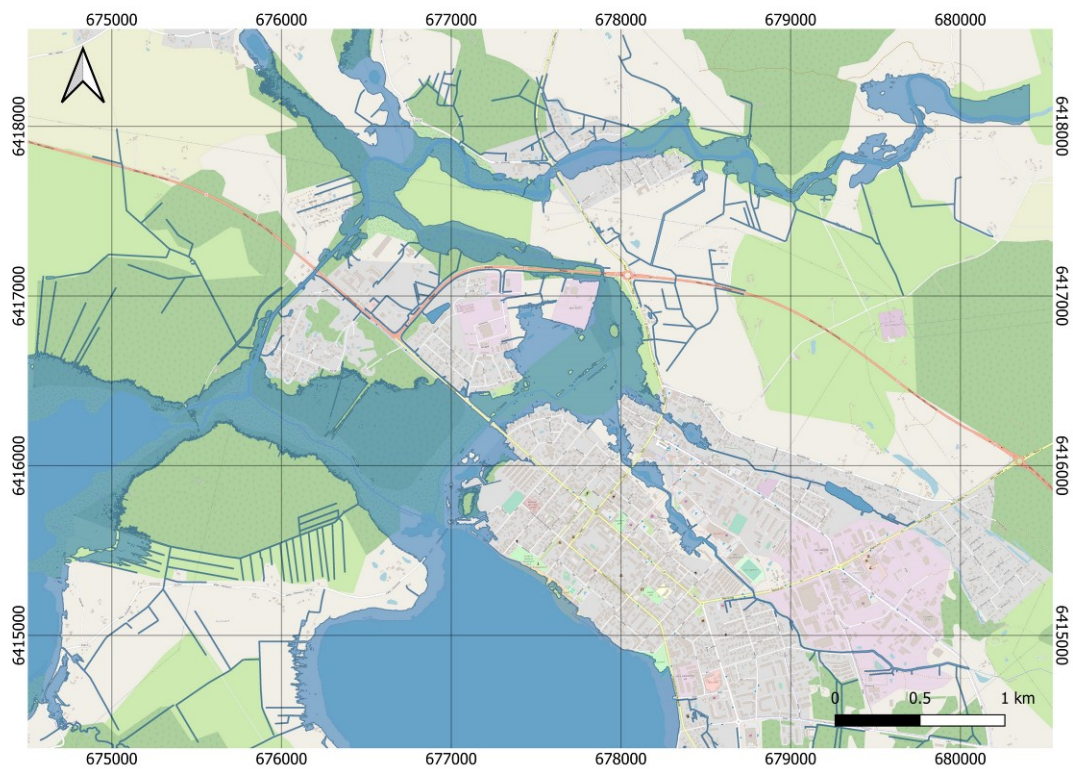
Baasstsenaariumi (algsituatsiooni) korral üleujutatud alade kohta koostati kaardid. Üleujutusala on näidatud joonisel 6.4. Tamula järv ja Võru linn on täpsemalt kajastatud joonistel 6.5-6.6 ning Vagula järve väljavoolu piirkond joonistel 6.7-6.8.

Üleujutusala ulatus on suur ning pikad suvised üleujutused võivad elanikele kaasa tuua olulisi häiringuid. Mitmed hooned ja taristu osad (nt juurdepääsuteed) on tõenäosusega üks kord 10 aasta jooksul esinevatest üleujutusest otseselt mõjutatud.

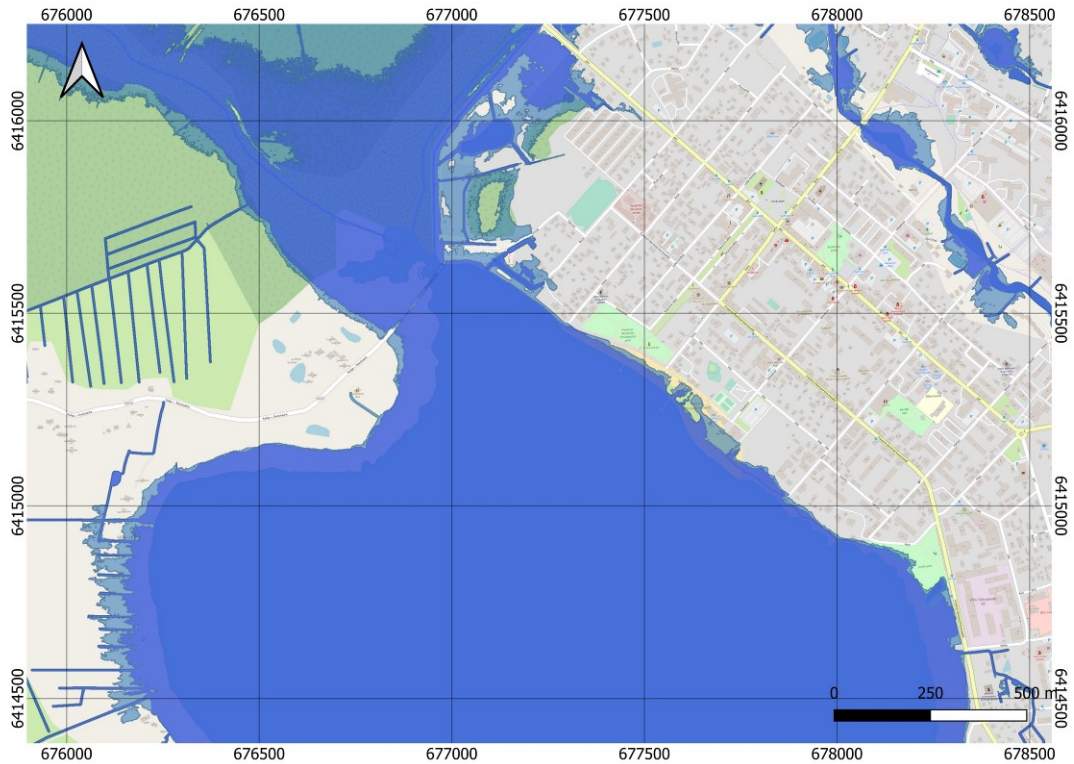
Üleujutusala kontuurid on esitatud elektrooniliselt *shape* formaadis failidena („x10_70.07_elev“) kaustas SHP.



Joonis 6.3. Veevoolu jaotus Koreli oja/Võhandu liitumiskohas.



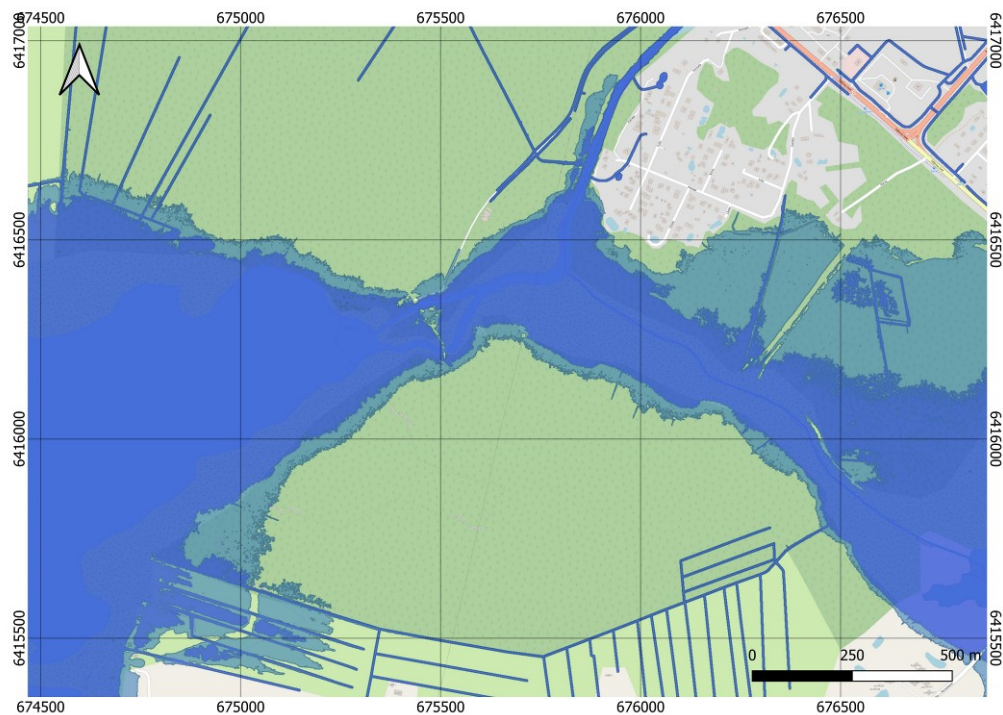
Joonis 6.4. Üleujutatud alad baasstsenaariumi (algsituatsiooni) korral.



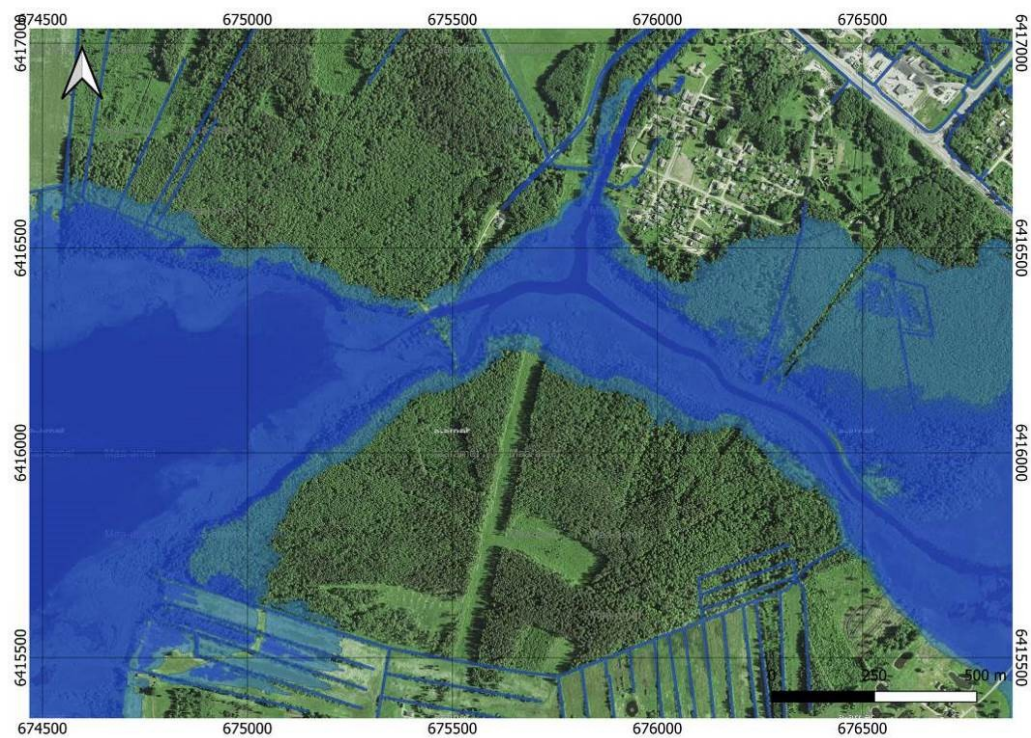
Joonis 6.5. Üleujutatud alad topograafilisel aluskaardil Tamula järve ja Võru linna piirkonnas baasstenaariumi korral (helesinine) ja leevendavate meetmete rakendamisel (tumesinine).



Joonis 6.6. Üleujutatud alad ortofotol Tamula järve ja Võru linna piirkonnas baasstenaariumi korral (helesinine) ja leevendavate meetmete rakendamisel (tumesinine).



Joonis 6.7. Üleujutatud alad topograafilisel kaardil Vagula järve väljavoolu piirkonnas baasstsenaariumi korral (helesinine) ja leevendavate meetmete rakendamisel (tumesinine).



Joonis 6.8. Üleujutatud alad ortofotol Vagula järve väljavoolu piirkonnas baasstsenaariumi korral (helesinine) ja leevendavate meetmete rakendamisel (tumesinine).

6.2 Üleujutusi leevendavate meetmete modelleerimine

Kõik leevendavaid meetmeid modelleeriti suvise suurvee olukorras ehk hinnati nende mõju alapeatükis 6.1 kirjeldatud baasstsenaariumile.

Kokku modelleeriti 28 leevendavate meetmete rakendamise stsenaariumit.

6.2.1 Paidra paisu eemaldamine

Esiteks kaaluti veetaseme alandamist Paidra paisu juures ehk paisu täielikku likvideerimist. Saavutatavate veetasemete erinevus algsituatsioonist on välja toodud tabelis 6.3.

Tabel 6.3. Veetase ja veetaseme alanemine, võrreldes algsituatsiooniga Paidra paisu likvideerimisel.

Asukoht	H, m	Δ , m
Kääpa	69.900	0.170
Koreli oja	70.520	0.049
Vagula järv	70.559	0.042
Vanajõgi	70.546	0.045
Võhandu kanal	70.507	0.049
Tamula järv	70.550	0.044
Kirjumpää	70.431	0.056

Tulemused näitavad, et suvise kõrge vooluhulga stsenaariumi korral (baasstsenaarium) on paisu mõju on madalam ja selle eemaldamise mõju on väiksem (nii suhteliselt kui absoluutväärtuste poolest) kui suvise madala vooluhulga korral, mida hinnati mudeli kalibreerimisel. Paisu eemaldamisel alaneks veetase Tamula järves ja Liitva kanalis suure vooluhulga korral 4 kuni 5 cm ning väikse vooluhulga korral kuni 13 cm. Selle põhjuseks on kõrgem vabalt voolava vee tase, mis on võrreldav paisutuse maksimaalse kõrgusega.

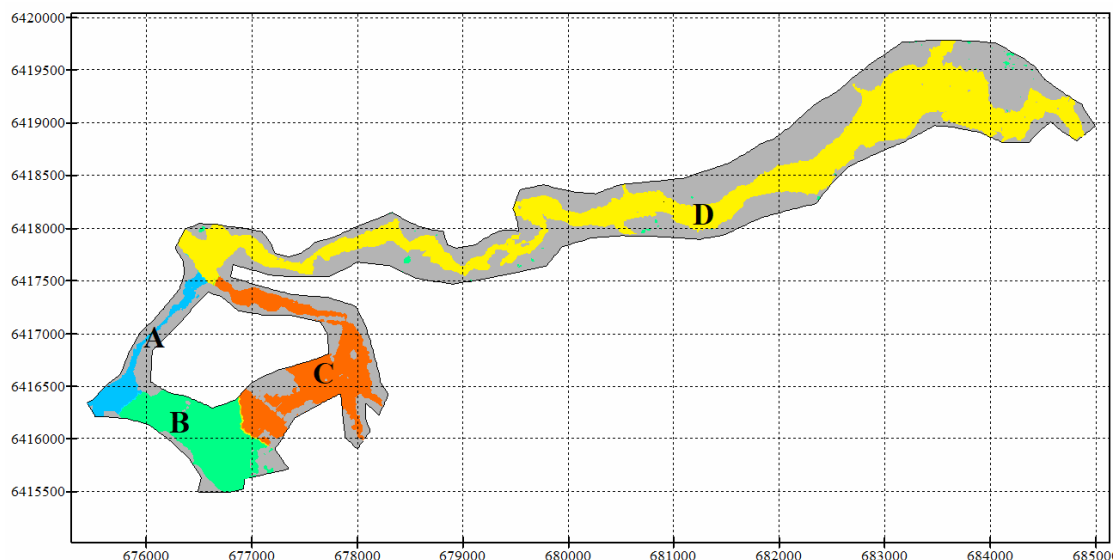
Sellegipoolest hinnatakse kõiki järgnevaid leevendavaid meetmeid koos Paidra paisu eemaldamisega.

6.2.2 Taimestiku eemaldamine

Teiseks kaaluti taimestiku eemaldamist jõesängist. Selleks, et hinnata taimestiku eemaldamist erinevates piirkondades, jagati süsteem neljaks tsooniks (vt joonis 6.9):

- Tsoon A koosneb Vagula järve väljavoolust ja Võhandu (Liitva) kanalist allavoolu kuni liitumiskohani Koreli ojaga;
- Tsoon B on Vahejõgi;
- Tsoon C koosneb Vanajõe ja Koreli ojast;

- Tsoon D on Võhandu jõe peamine voolusäng Koreli oja ja liitumisest Kääpa sillani.



Joonis 6.9. Mudeli jaotus taimestiku eemaldamise ja süvendamise tsoonideks.

Modelleeriti 10 taimestiku eemaldamise stsenaariumit:

- 5 taimestiku eemaldamise ala – taimestiku eemaldamine tsoonidest A, B, C, D ja tervest mudeli määramispiirkonnast;
- 2 taimestiku eemaldamise taset – täielik taimestiku eemaldamine, mis vastab taimkatte koefitsiendile $K_{va} = 0$ (Tabel 6.4) ja realistlikum stsenaarium, kus eemaldatakse 90% taimestikust, mis vastab taimkatte koefitsiendile $K_{va} = 10\%$ (Tabel 6.5).

Taimestiku eemaldamise efektiivsust hinnati, võrreldes alanenud veetaset veetasemega algsituatsioonis, kus on eemaldatud Paidra pais.

Tabel 6.4. Veetase ja veetaseme alanemine valitud punktides taimestiku täieliku eemaldamise korral.

Asukoht	H_A , m	Δ_A , m	H_B , m	Δ_B , m	H_C , m	Δ_C , m	H_D , m	Δ_D , m	H_{ABCD} , m	Δ_{ABCD} , m
Kääpa	69.900	0.0	69.900	0.0	69.900	0.0	69.900	0.0	69.900	0.0
Koreli oja	70.509	0.011	70.520	0.0	70.502	0.018	70.150	0.370	70.114	0.406
Vagula järv	70.529	0.030	70.558	0.001	70.540	0.019	70.241	0.318	70.163	0.396
Vanajõgi	70.525	0.021	70.546	0.000	70.522	0.024	70.214	0.332	70.148	0.398
Võhandu kanal	70.499	0.008	70.507	0.000	70.500	0.007	70.135	0.372	70.115	0.392
Tamula järv	70.527	0.023	70.550	0.000	70.526	0.024	70.222	0.328	70.155	0.395
Kirumpää	70.429	0.002	70.431	0.000	70.428	0.003	70.068	0.363	70.067	0.364

Tulemustest järeldub, et taimestiku eemaldamine tsoonis B (Vahejõgi) ei mõjuta süsteemi veetaset. Vanajõe, Koreli oja ja Liitva kanali puhastamine alandab veetaset 2-3 cm. Kõige suurem mõju on taimestiku eemaldamisel Liitva kanali ja Koreli oja liitumisest allavoolu. Esiteks toetab taimestiku eemaldamine nimetatud piirkonnas üleliigse vee süsteemist välja liikumist ning teiseks on tsoon D teistest tsoonidest ulatuslikum.

Kombineerides taimestiku eemaldamist kõikides tsoonides (ABCD), on võimalik parimal juhul saavutada umbes 40 cm veetaseme alanemine Tamula järves.

Taimestiku eemaldamine 90% ulatuses vähendab meetme efektiivsust ühe kolmandiku võrra.

Tabel 6.5. Veetase ja veetaseme alanemine valitud punktides taimestiku eemaldamise korral 90% ulatuses.

Asukoht	H_A , m	Δ_A , m	H_B , m	Δ_B , m	H_C , m	Δ_C , m	H_D , m	Δ_D , m	H_{ABC} , m	Δ_{ABCS} , m
Kääpa	69.900	0.000	69.900	0.000	69.900	0.000	69.900	0.000	69.900	0.000
Koreli oja	70.490	0.030	70.520	0.000	70.503	0.017	70.270	0.250	70.244	0.276
Vagula järv	70.516	0.043	70.559	0.000	70.542	0.017	70.338	0.221	70.297	0.262
Vanajõgi	70.508	0.038	70.546	0.000	70.525	0.021	70.318	0.228	70.227	0.319
Võhandu kanal	70.481	0.026	70.507	0.000	70.500	0.007	70.254	0.253	70.242	0.265
Tamula järv	70.511	0.039	70.550	0.000	70.529	0.021	70.324	0.226	70.284	0.266
Kirjupää	70.427	0.004	70.431	0.000	70.427	0.004	70.181	0.250	70.180	0.251

6.2.3 Süvendamine

Üheks võimalikuks meetmeks on jõesängi sügavamaks muutmine (süvendamine). Konsultant modelleeris 10 süvendamise stsenaariumit:

- 5 süvendamise ala – eraldi tsoonid A, B, C, D ja terve mudeli ulatus;
- 2 süvendamise taset – sügavuse suurendamine 0.5 m võrra m (Tabel 6.6) ja 1 m võrra (Tabel 6.7).

Umbkaudne süvendamistööde maht kõikide stsenaariumite korral on tabelis 6.8.

Tabel 6.6. Veetase ja veetaseme alanemine valitud punktides 0.5 m süvendamise korral.

Asukoht	H_A , m	Δ_A , m	H_B , m	Δ_B , m	H_C , m	Δ_C , m	H_D , m	Δ_D , m	H_{ABC} , m	Δ_{ABCS} , m
Kääpa	69.900	0.000	69.900	0.000	69.900	0.000	69.900	0.000	69.900	0.000
Koreli oja	70.506	0.014	70.521	-0.001	70.519	0.001	70.443	0.077	70.436	0.084
Vagula järv	70.537	0.022	70.559	0.000	70.558	0.001	70.490	0.069	70.474	0.085

Asukoht	H_A , m	Δ_A , m	H_B , m	Δ_B , m	H_C , m	Δ_C , m	H_D , m	Δ_D , m	H_{ABC} , m	Δ_{ABCS} , m
Vanajõgi	70.527	0.019	70.547	-0.001	70.545	0.001	70.475	0.071	70.462	0.084
Võhandu kanal	70.496	0.011	70.508	-0.001	70.508	-0.001	70.429	0.078	70.426	0.081
Tamula järv	70.530	0.020	70.550	0.000	70.548	0.002	70.480	0.070	70.466	0.084
Kirumpää	70.421	0.010	70.431	0.000	70.432	-0.001	70.355	0.076	70.354	0.077

Tabel 6.7. Veetase ja veetaseme alanemine valitud punktides 1 m süvendamise korral.

Asukoht	H_A , m	Δ_A , m	H_B , m	Δ_B , m	H_C , m	Δ_C , m	H_D , m	Δ_D , m	H_{ABC} , m	Δ_{ABCS} , m
Kääpa	69.900	0.000	69.900	0.000	69.900	0.000	69.900	0.000	69.900	0.000
Koreli oja	70.490	0.030	70.522	-0.002	70.519	0.001	70.388	0.132	70.368	0.152
Vagula järv	70.516	0.043	70.560	-0.001	70.557	0.002	70.441	0.118	70.403	0.156
Vanajõgi	70.508	0.038	70.548	-0.002	70.544	0.002	70.424	0.122	70.393	0.153
Võhandu kanal	70.481	0.026	70.509	-0.002	70.509	-0.002	70.372	0.135	70.359	0.148
Tamula järv	70.511	0.039	70.551	-0.001	70.547	0.003	70.429	0.121	70.396	0.154
Kirumpää	70.409	0.022	70.432	-0.001	70.433	-0.002	70.300	0.131	70.293	0.138

Süvendamise mõju hinnati, võrreldes alandatud veetaset veetasemega algsituatsioonis, kus on eemaldatud Paidra pais.

Tulemuste põhjal on võimalik järeldada, et süvendamine on vähem tõhusam kui taimestiku eemaldamine ning võrreldes vajalike tegevuste mahuga, olukorda oluliselt ei paranda. Süvendamise puhul alaneb veetase Tamula järves parimal juhul 8 cm (0,5 m süvendamise korral) kuni 15 cm (1 m süvendamise korral).

Sarnaselt taimestiku eemaldamisega, on süvendamise mõju märgatavam, kui seda teha Liitva kanali ja Koreli oja liitumiskohast allavoolu, mis soosib vee süsteemist välja voolamist.

Tabel 6.8. Süvendamistööde mahud.

Süvendamise piirkond	Maht, tuhat m ³	
	0.5 m võrra	1 m võrra
A	41.9	83.9
B	32.1	64.3
C	73.1	146.3
D	301.6	603.3
ABCD	448.0	896.1

6.2.4 Vagula ja Tamula järvede ühendamine

Lisaks kaaluti uue kanali rajamist Vagula ja Tamula järvede ühendamiseks ja vooluhulga osalist sellesse kanalisse juhtimist. Kanali asukoht on üldistatud ja ei ole mudeli seisukohast oluline. Tamula järve sissevool on valitud eeldusega, et Tamula järve loodekalda kraavid on ühenduses Vagula järvega. Uue kanali kasutamine vajab lisaks regulaatoreid, mis reguleeriksid voolu osakaalu Vagula järve väljavooludes.

Tabel 6.9. Veetaseme erinevused (Δ , m) ja vooluhulk Liitva kanalis veevoolu ümber suunamisel.

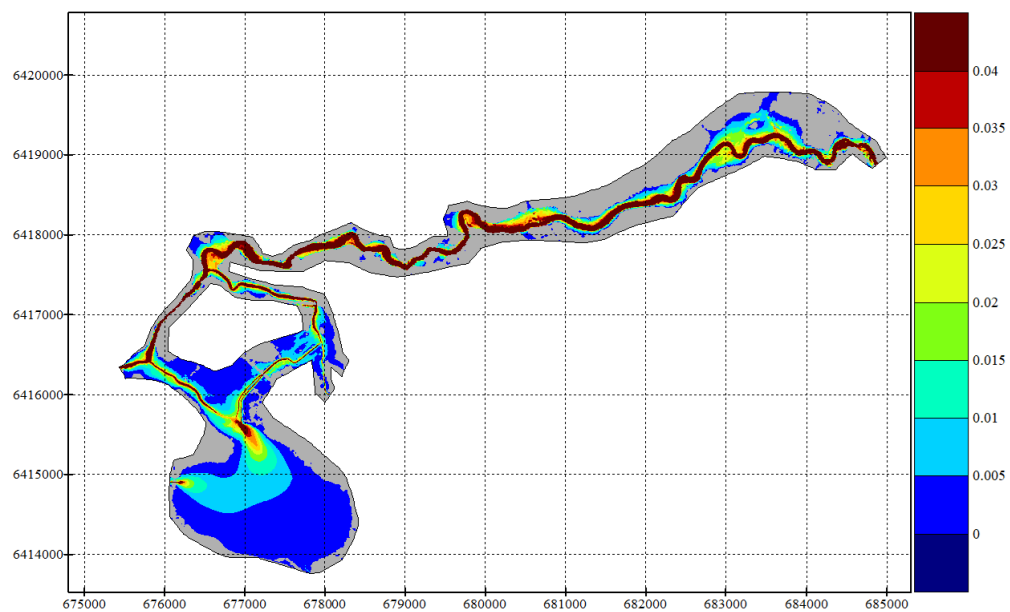
Veevoolu suunamine ümber	5%	10%	20%	30%	50%	70%	100%
Δ Kääpa	0	0	0	0	0	0	0
Δ Koreli oja	0	0.001	0.002	0.005	0.005	0.014	0.036
Δ Vagula järv	0.001	0.002	0.005	0.001	0.001	0.025	0.055
Δ Vanajõgi	0	0.001	0.002	0.005	0.004	0.011	0.03
Δ Võhandu kanal	0.001	0.002	0.004	0.007	0.007	0.018	0.044
Δ Tamula järv	0.001	0.001	0.002	0.004	0.004	0.009	0.028
Δ Kirumpää	0.001	0.001	0.003	0.006	0.001	0.017	0.041
Q_{VH} , m ³ /s	6.67	6.66	6.64	6.59	6.59	6.37	6.01
Q_{VH} , %	88.64%	88.51%	88.23%	87.59%	87.59%	84.60%	79.80%

Vee kõrvale juhtimise mõju hinnati, võrreldes veetaseme veetasemega algsituatsioonis (positiivne mõju – veetaseme tõus), kus on eemaldatud Paidra pais.

Modelleeriti 7 situatsiooni erinevate Tamula järvest läbi juhitud veekogustega (5% kuni 100%).

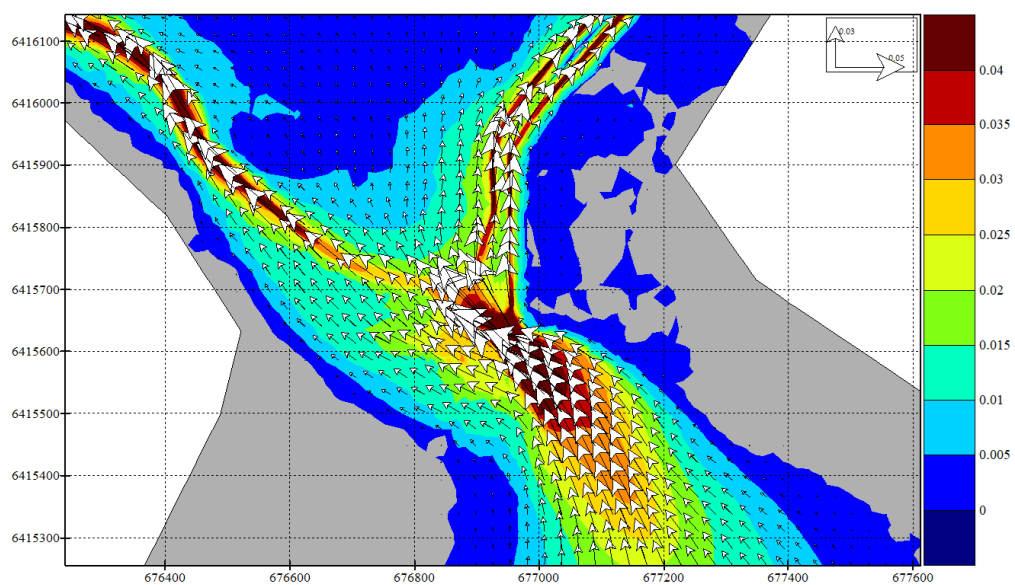
Modelleerimise tulemused on veetasemete erinevustena kokku võetud tabelis 6.9. Kõikide stsenaariumite korral on veetaseme tõus ebaoluline (vähem kui 3 cm Tamula järves), sest rohkem vett peab läbima Vahejõe ja Vanajõe ning neis kanalites on voolutakistus suurem kui Liitva kanalis.

Tamula järvest läbi voolava veehulga suurendamine vähendab Võhandu kanalis jõudvat veehulka (vt tabel 6.9). Arvutuslik Tamula järve veetaseme erinevus on alla 3 cm. Lisaks muudab vee kõrvale juhtimine Vahejõe voolusuunda. Voolustrid on esitatud joonistel 6.10-6.13.

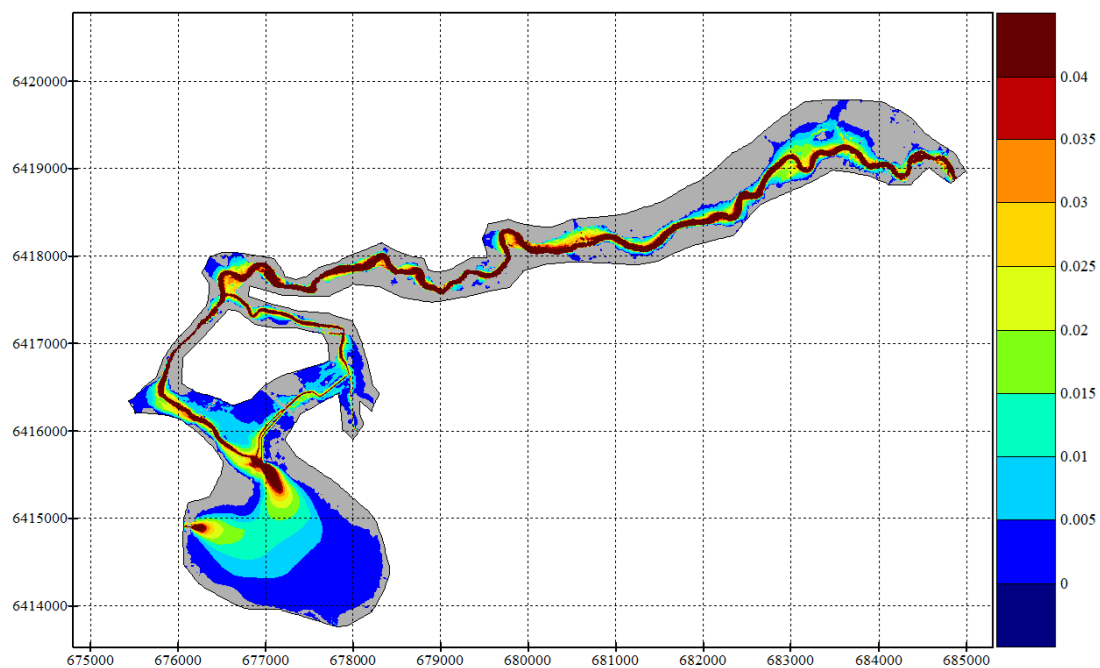


on

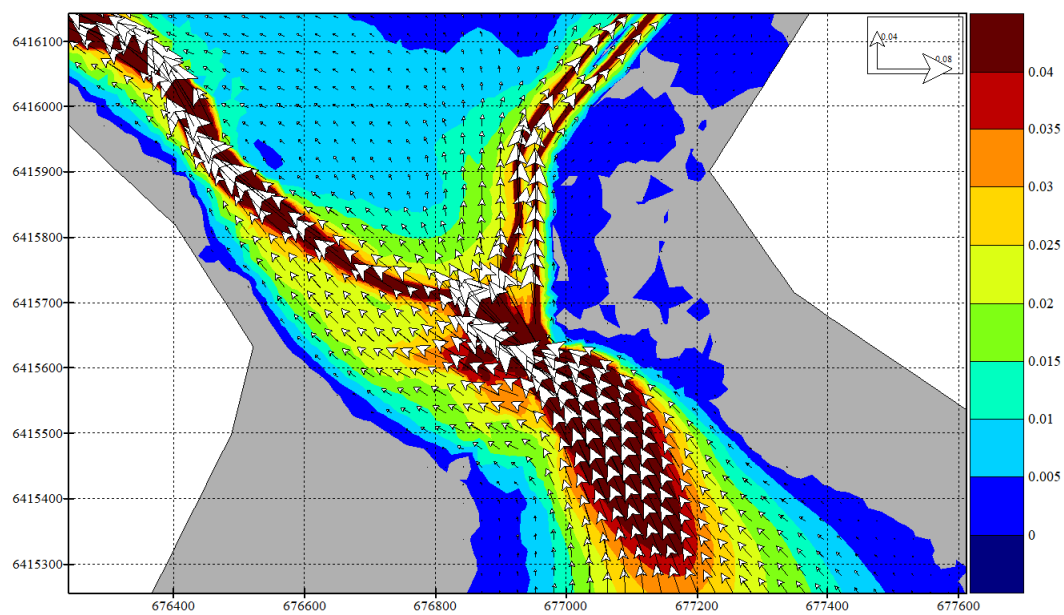
Joonis 6.10. Veevoolu jaotus mudelis 50% situatsioonis.



Joonis 6.11. Veevoolu jaotus Tamula järve väljavoolul 50% situatsioonis.



Joonis 6.12. Veevoolu jaotus mudelis 100% situatsioonis.



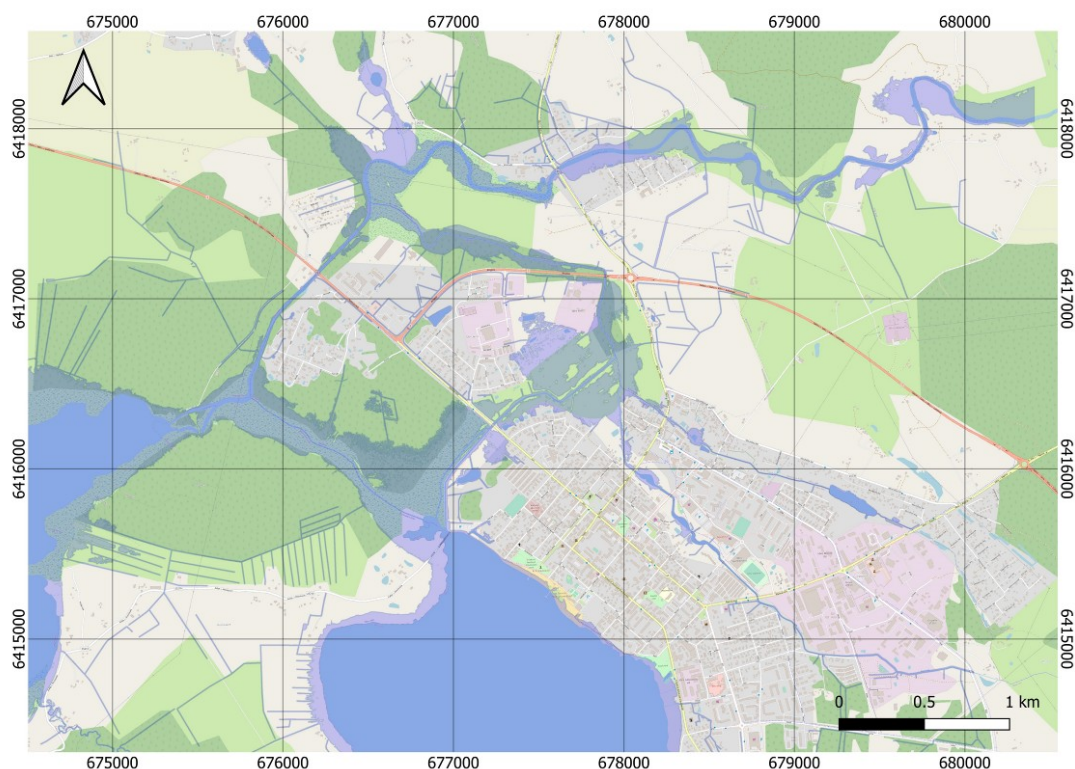
Joonis 6.13. Veevoolu jaotus Tamula järve väljavoolul 100% situatsioonis.

6.2.5 Muutused üleujutusohuga aladel

Suurima mõjuga üleujutusohu vähendamise lahenduse/meetme selgitamiseks võrreldi muutuseid, mis toimuvad üleujutatud aladel.

Suurima mõjuga meetmeks on Paidra paisu eemaldamine koos taimestiku eemaldamisega mudelis määratud piirkonnas (situatsiooni ABCD).

Selle stsenaariumi järgsed üleujutusalad on esitatud joonisel 6.14.



Joonis 6.14. Üleujutusalad Paidra paisu likvideerimisel ja taimestiku eemaldamisel

Võrdluseks saab vaadata baasstsenaariumi järgseid üleujutusalasid joonisel 6.4 ning mõlema stsenaariumi (meetmetega ja ilma) võrdlevat ulatust joonistel 6.5-6.8.

Üleujutusalade kontuurid on esitatud elektrooniliselt *shape* formaadis failidena („x10_69.90_ABCD_elev“) kaustas *SHP*.

7 LEEVENDAVATE MEETMETE SOOVITUSED

7.1 Üleujutuste põhjused

Võru riskipiirkonnas toimuvate üleujutuste põhjuseid on lähemalt käsitletud aruande eelnevates peatükkides. Kokkuvõtvalt on kõrge veetaseme/üleujutuste põhjused järgmised:

- Süsteem Vagula järv – Tamula järv – vana Võhandu jõe säng – Liitva kanal - Võhandu jõgi kuni Kääpa sillani on väga väikse jõesäangi languga. Tegu on loodusliku olukorraga (loodusliku põhjusega).
- Suvine tihe taimestik voolusängides takistab veevoolu ning aeglustab jõevoolu veelgi. Selle tagajärjeks on suvised kõrged veetasemed.
- Üleujutused tekivad Võru riskipiirkonnas siis, kui sademed põhjustavad suurenenud vooluhulga, mida taimestikku täis voolusäng ei suuda tõhusalt ära juhtida.

7.2 Üleujutuste leevendamise üldpõhimõtted

Seirekampaaniatest ja võimalike leevendusmeetmete modelleerimisest saab järeldada alljärgnevat (vt ka joonis 7.1):

- Veetase on suvise suurvee ajal ohustatud piirkonnas Vagula järve väljavoolust allavoolu - Liitva kanalis, Vahejões, Tamula järves, Vanajões, Koreli ojas ja Võhandu jões Kirumpää sillani - väga sarnane.
- Leevendavate meetmete nagu kanalite laiendamine ja süvendamine ning taimestiku eemaldamine rakendamine Liitva kanalis, Koreli ojas, Vahejões ja Vanajões (kriitiline ala) on vähem tõhusad. Need meetmed annavad arvestatava efekti, kui neid rakendada Koreli oja ja Võhandu jõe liitumiskohast allavoolu.
- Veetaseme alandamine suvistes tingimustes on võimalik, kui soodustada väljavoolu Võhandu kanali kaudu ja/või vähendada kriitilisel ajaperioodil (juulist septembri keskpaigani) sissevoolu Vagula järvest.



Joonis 7.1. Üleujutusohu vähendamise põhimõtteline skeem.

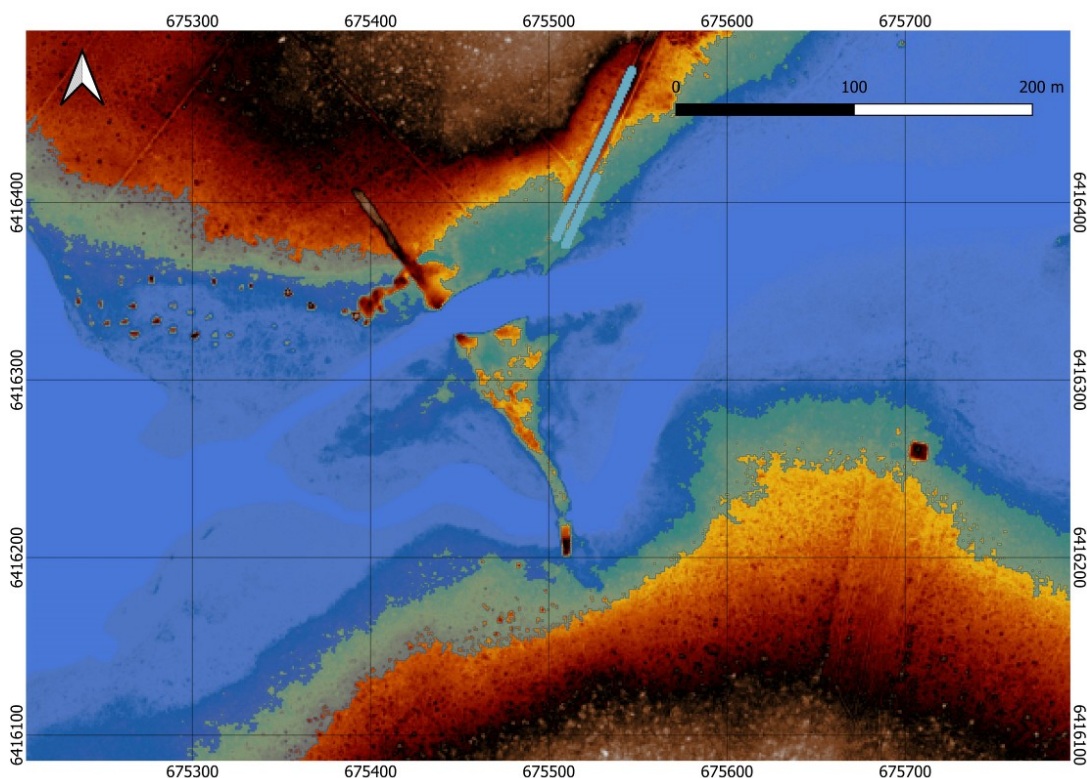
Väljavoolu saab soodustada kahel moel: (1) Paidra paisu eemaldamisega ja (2) voolutakistuse vähendamisega Koreli oja ja Liitva kanali liitumiskohast allavoolu jäävas jõesängis. Viimast on võimalik saavutada süvendamise ja/või taimestiku eemaldamisega.

1. Paidra paisu eemaldamine. Selle meetmega on võimalik saavutada veetaseme alanemine kriitilistes piirkondades 5 cm võrra (tõenäosusega üks kord 10 aasta jooksul esineva üleujutuse korral). Seega võib seda meetet lugeda valikuliseks. Konsultandi soovitus on võtta paisu omanikega ühendust ja leppida kokku kas paisu eemaldamises või võimaluses ohuolukorras paisjärve veetaset reguleerida.
2. Taimestiku eemaldamine. Taimestiku eemaldamine voolusängist parandab süsteemist vee välja voolamist, kui taimestik eemaldatakse Liitva kanali ja Koreli oja liitumiskohast allavoolu jäävas Võhandu jõe osas. Taimestiku eemaldamine 90% ulatuses alandab veetaset 22-25 cm ja see võib olla oluline mõju. Selle meetme rakendamisel on siiski ka mitu probleemi:
 - a. Tegevuse mõju jõe ökosüsteemile, mille hindamine ei olnud osa käesolevast tööst.
 - b. Taimestik kasvab pärast eemaldamist tagasi (korduv tegevus).
 - c. Makrofüütide eemaldamise keerukus ja hind on võrreldav veekogu süvendamisega.
3. Süvendamine. Süvendamine mahus 300 kuni 600 tuhat m³ alandaks veetaset 8 kuni 13 cm (tõenäosusega üks kord 10 aasta jooksul esineva üleujutuse korral). Vastuargumendid sellele meetmele on mõju jõe ökosüsteemile (k.a põhjaelustik) ja majanduslik aspekt. Süvendamise arvestuslik hind on 10 EUR 1 m³ kohta (s.h eemaldatud materjali käitlus).

Kokkuvõttes on üksikute äravoolu soodustamise meetmete rakendamisel suvise suurvee taseme alandamisele väike mõju ning need ei paku veetaseme reguleerimise vahendeid.

Seetõttu on konsultandi soovitus rakendada meetmeid, mis vähendavad süsteemi sissevoolava vee hulka. On kolm põhimõttelist asukohta vee mahutamiseks ning selle Vagula järvest allavoolu jõudmise aeglustamiseks:

1. Mitu väikest veehoidlat Pühajõe ja Rõuge jõe valgala. Nendel veehoidlate kogumahutavus võimaldaks vähendada vihmasadude aegset vooluhulka. Samas on veehoidlate süsteemsel kasutamisel üleujutuste ennetamiseks mitu takistust: mitmed väljavoolu regulaatorid ei tööta, tammid ja paisud on eraomanduses jm. Peamine probleem on aga see, et veehoidlate kasutamiseks on vajalik üleujutuste eelne koordineeritud ühine tegutsemine, mida on keeruline saavutada.
2. Kasutusest väljas olevaid Järvere kalatiike Vagula järve läänekaldal saab kasutada veehoidlana Pühajõega seotud üleujutuste ennetamiseks. Kalatiikide kogumahutavus on ca 3.7 miljonit m³. Selle lahenduse lisaväärtus on mahajäetud ala korrastamine ja hüljatud veepumpla taastamine. Samas on tiikide kõrgus 73 m, mistõttu tuleb nende täitmiseks vett pumbata ning ei piisa lihtsalt veevoolu ümber suunamisest.

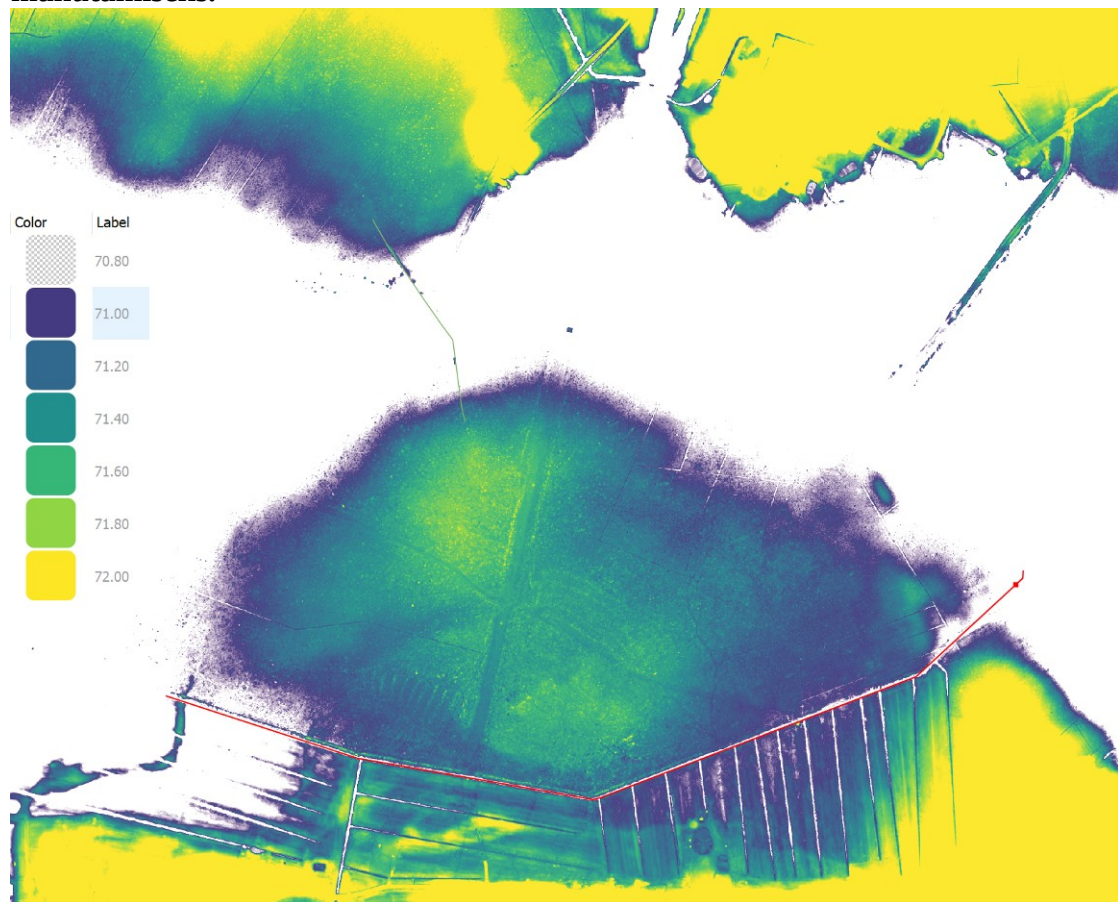


Joonis 7.2. Vagula järve väljavoolu piirkonna reljeef.

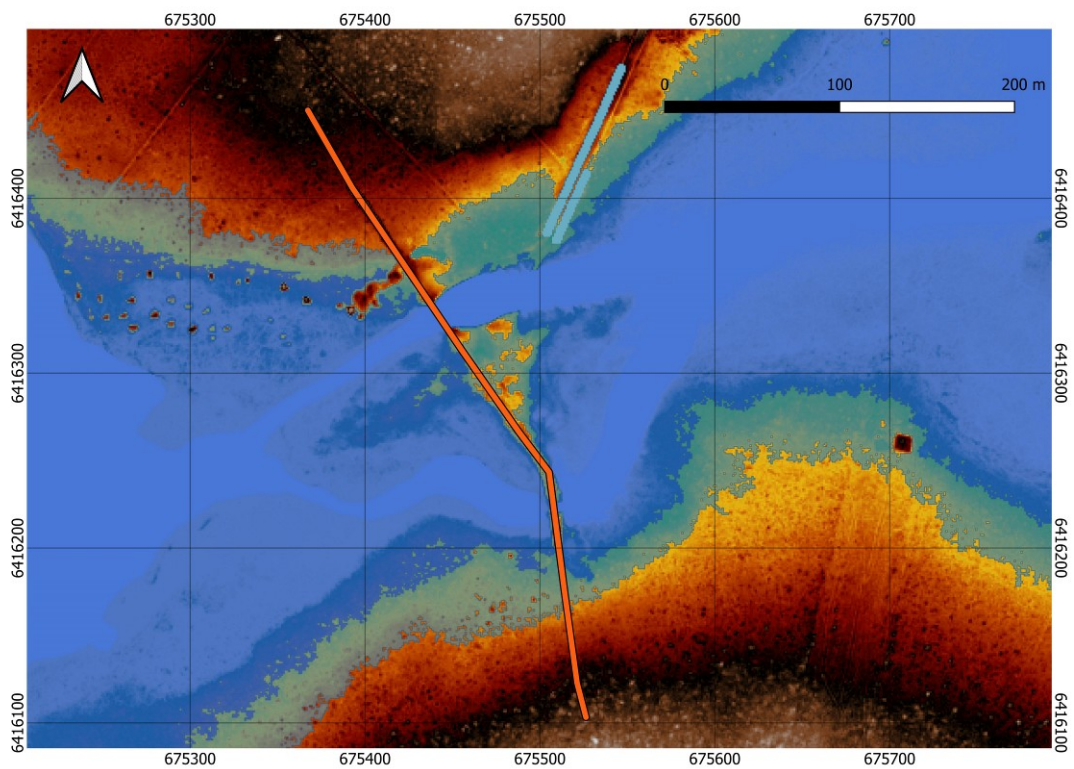
3. Vagula järve väljavoolule paisregulaatori rajamine. See võimaldaks järve kasutada veereservuaarina. Tegevuse eesmärk oleks vähendada enne üleujutusi järve veetaset, et võimaldada kõrgvee perioodil suurvee järkjärgulist kogunemist veekogusse. Lahendust on lähemalt kirjeldatud alapeatükis 8.1. Vagula järve väljavoolu piirkonna reljeef on näidatud joonisel 7.2. Regulaatori saaks paigutada praeguse jalakäijate silla juurde maha jäetud regulaatori asemele. Regulaatori kasutuseks tuleks täiendavalt rajada pinnastamm. Soovitav on rajada pinnastamm mööda olemasoleva osaliselt lagunenud tammi trajektoori (asukoht on nähtav reljeefis).

Tammi mõõtmete osas peab arvestama, et Vagula järv ei voolaks üle kallaste ning ei tekiks ühendust Vahejõega peamisest väljavoolust lõunasse jääva kraavi kaudu (joonis 7.3). Kriitiline veetase on 71,5 m, seega tamm peaks kinni pidama veetaseme kõrgust 71 m. See aspekt määrab ära tammi pikkuse, mis on ca 400 m. Tammi kulgemine on näidatud joonisel 7.4 (kõrguskaardil) ja joonisel 7.5 (ortofotol) koos üleujutatud aladega.

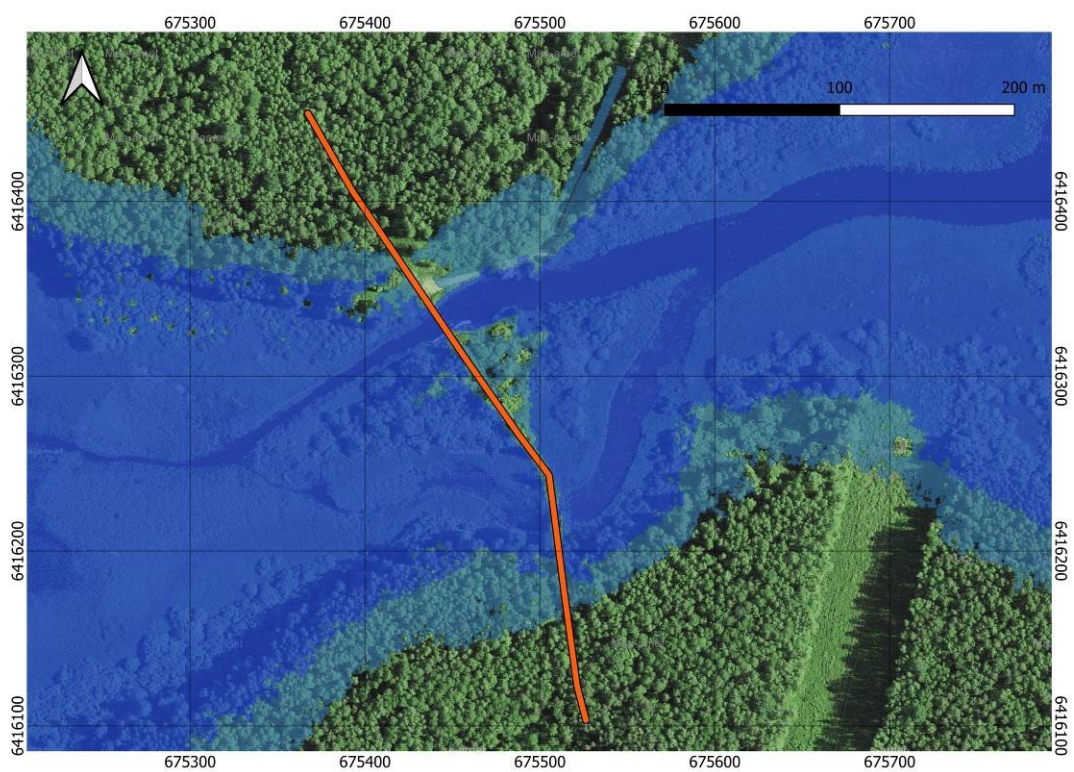
Kokkuvõttes on soovitatud meetmeks ehitada Vagula väljavoolule paisregulaator ja tamm. Nimetatud eelistatud lahendusele on koostatud eelprojekt. Tulevikus soovitame uurida Järvere kalatiikide kasutamise võimalikkust suvise suurvee mahutamiseks.



Joonis 7.3. Reljeef Vagula järve väljavoolust lõunas.



Joonis 7.4. Tammi asukoht digitaalsel kõrguskaardil.



Joonis 7.5. Tammi asukoht ortofotol ja ülejutatud ala.

7.3 Alternatiivsete lahenduste maksumused

Eelnevates peatükkides on lähemalt kirjeldatud alternatiivsete tehniliste lahenduste eeldatavat mõju üleujutuste leevendamisele. Uuringu raames hinnati ka erinevate tehniliste lahenduste eeldatavat maksumust. Tehniliste lahenduste orienteeruvad maksumused on koondatult esitatud alljärgnevas tabelis.

Tabel 7.1. Tehniliste lahenduste maksumuse hinnang

Nr	Meede	Lahendusvariant	Maksumus, EUR
1	Paidra paisu eemaldamine		<i>Kulusid pole võimalik hinnata (vt märkus 1)</i>
2	Süvendamine	Tsoonis A, 0,5 m võrra	398 050
		Tsoonis B, 0,5 m võrra	304 950
		Tsoonis C, 0,5 m võrra	694 450
		Tsoonis D, 0,5 m võrra	2 865 200
		Tsoonides ABCD, 0,5 m võrra	4 256 000
		Tsoonis A, 1 m võrra	797 050
		Tsoonis B, 1 m võrra	610 850
		Tsoonis C, 1 m võrra	1 389 850
		Tsoonis D, 1 m võrra	5 731 350
		Tsoonides ABCD, 1 m võrra	8 512 950
3	Taimestiku eemaldamine	Tsoonis A	52 710
		Tsoonis B	43 890
		Tsoonis C	80 790
		Tsoonis D	286 440
		Tsoonides ABCD	418 200
4	Paisregulaator Vagula järve väljavoolul		226 670

Märkused ja arvutustes kasutatud eeldused:

1. Paidra paisu eemaldamine tähendab tehniliselt selle väljavoolu avamist. Selle tegevusega ei kaasne otseseid töökuluseid. Meede nõuab läbirääkimisi paisu omanikega ning maksumus võib olla seotud muude kaasnevate kõrvalkuludega.
2. Süvendustööde maksumuseks on arvestatud 9,50 EUR kuupmeetri kohta. Maksumus hõlmab projekteerimist, tööde ettevalmistust/lõpetamist (seadmete transport jm), süvendustöid ja eemaldatud materjali käitlemist¹¹.
3. Taimestiku eemaldamise töömaht on arvestatud madalamaks (4,50 EUR kuupmeetri kohta) ehk võrdsustatud ca 10 cm süvendustöödega. Lisandub tööde ettevalmistamise (seadmete transport jm) kulu 15 000 EUR.
4. Paisregulaator Vagula järve väljavoolul – maksumuse hinnang on antud vastavalt eelprojektile.

¹¹ Kaasnevate kulude ülevaate saamisel kasutati abivahendina: https://assets.publishing.service.gov.uk/media/6034ed6ee90e0766047734a9/Cost_estimation_for_channel_management.pdf (UK) ja <https://semspub.epa.gov/work/10/100008032.pdf> (US)

7.4 Eelistatud lahenduse eelprojekt

Vagula järve väljavoolule soovitatud rajatava tammi eelprojekt on esitatud aruande elektroonilise lisana. Eelprojekt sisaldab põhijooniseid ning materjalide ja kulude arvestust.

8 ÜLEUJUTUSTE LEEVENDAMISE KAVA

8.1 Veetaseme reguleerimine

See alapeatükk kirjeldab Vagula järve väljavoolu paisregulaatori tööd ning selle modelleeritud mõju. Paisregulaatori kasutamise eesmärk on vältida kõrgete veetasemete kujunemist regulaatorist allavoolu, mida saab teha järgmiste võtetega:

- Vee kogumine Vagula järves vihmast tingitud üleujutuste perioodil.
- Vagula järvest rohkema vee välja laskmine väiksema vooluhulgaga perioodidel.

Regulaatorist allavoolu jääva veetaseme jaoks kasutati Liitva kanali veetaset, mis kirjeldab kogu süsteemi – Tamula järv, Vahejõgi, Vanajõgi Kirumpää sillani.

Eesmärk on saavutada regulaatori kasutamine selliselt, et see võimaldab vooluhulka jaotada aastaringselt nii, et:

- Regulaatorist allavoolu püsib veetase allpool eesmärgiks seatud veetaset (sihtveetaset).
- Vagula järve veetase püsib alla 71 m.

8.1.1 Üleujutus esinemistõenäosusega üks kord 10 aasta jooksul

Eesmärk on olla kaitstud tõenäosusega üks kord 10 aasta jooksul toimuvate üleujutuste eest.

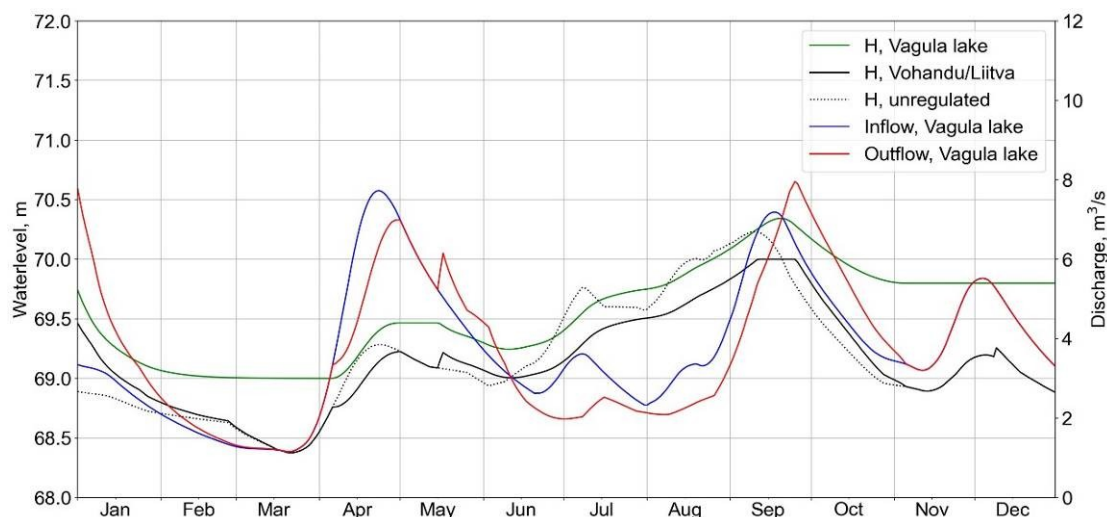
Mudelil on kasutatud järgnevaid eeldusi regulaatori töö optimeerimiseks:

- Mudelis loodi ühe aasta pikkune aegrida Vagula järve sissevoolu kohta, mis vastab 10 aastase perioodi suvisele koguvooluhulgale.
-
- Iga päeva kohta aastas kasutati vooluhulga ja Liitva kanali veetaseme vahelist seost. Selle seose loomiseks kasutati 2021. a suve seiretulemuste interpoleerimist.

Joonisel 8.1 on välja toodud aegread üks kord 10 aasta jooksul esineva üleujutuse stsenaariumi kohta (samad värvid on kasutusel ka teistel järgnevatel joonistel):

1. Tumesinine joon on Vagula järve sissevool. Sellel on kaks maksimumi – kevadise lumesulamise aegne suurvesi ning hilissuvine vihmaperiood septembri keskel.
2. Katkendlik roheline joon on Liitva kanali veetase ilma leevendavate meetmete rakendamiseta.
3. Roheline joon on Vagula järve veetase (reguleeritud olukord). Veetaset tuleb hoida alla 71 m, mis on tammiga kaitstud veetase.

4. Punane joon on regulaatori abil Vagula järvest välja juhitud vooluhulk.
5. Must joon on reguleeritud veetase Liitva kanalis. Eesmärk on hoida seda alla sihtveetaset (70 m joonisel 8.1) ning ühtlasi vähendada suviseid kõrgeid veetasemeid ja nende kestvust.

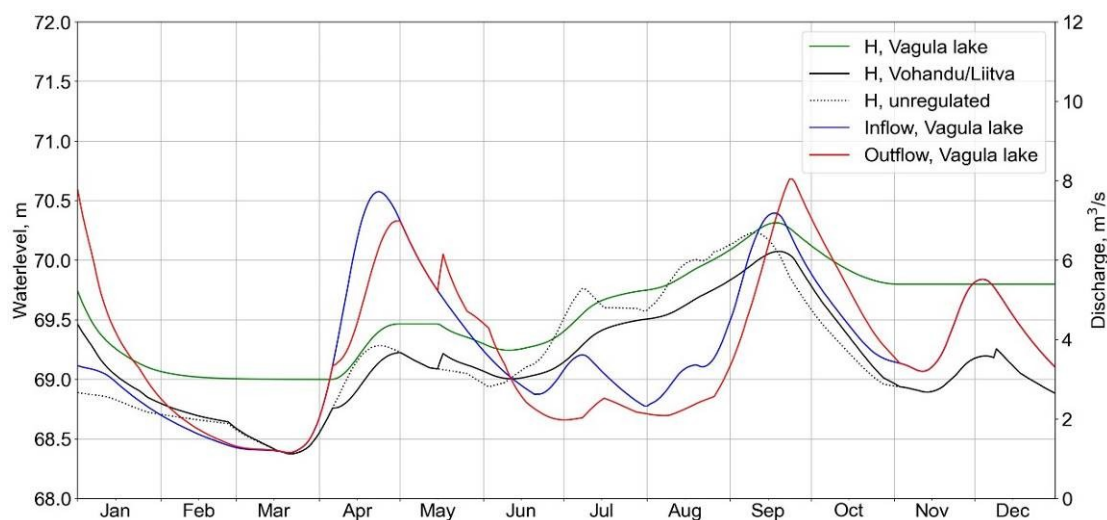


Joonis 8.1. Sissevoolu ja väljavoolu graafikud ning veetasemed Vagula järves ja Võhandu (Liitva) kanalis. Stsenarium: üleujutus esinemistõenäosusega üks kord 10 aasta jooksul. Sihtveetase Võhandu (Liitva) kanalis – 70.0 m.

Regulaatori aastane töörežiim näeb sellise stsenaariumi korral (sihtveetase 70 m) välja järgmine:

- Talvekuudel (jaanuar-märts) saab valmistuda ette lume sulamiseks ning hoida Vagula järve veetaset umbes 69 m juures.
- Lume sulamise perioodil (aprill) tekkiva tulvavee mõju saab leevendada vee kogumisega Vagula järve. Vagula järve veetaseme sihtväärtus on aprillis 69.5 m.
- Peale kevadist suurvett, taimestiku vabal ajal (mai keskpaigast kuni juuni keskpaigani) langetatakse Vagula järves veetaset, et tekitada varu suvise suurvee jaoks.
- Suvel (juuni keskpaigast kuni septembri keskpaigani) kogutakse vesi järkjärgult Vagula järve, et vältida egetatsiooniperioodi üleujutusi. Selle strateegia rakendamisel jõuab veetase sihttasemeni (70 m) septembri alguses (reguleerimata olukorras tõuseks veetase sinnani augusti alguses) ning seda ei ületataks. Suvine veetase oleks ca 50 cm madalam, võrreldes baasstsenaariumiga ehk regulaatori mittekasutamisega.
- Üleliigse vee võib Vagula järvest välja juhtida pärast taimestiku kadu (septembri lõpust novembri alguseni). Vagula järve veetase ei ületa kunagi 70.4 m, seega on vee hoiustamiseks piisavalt varu.

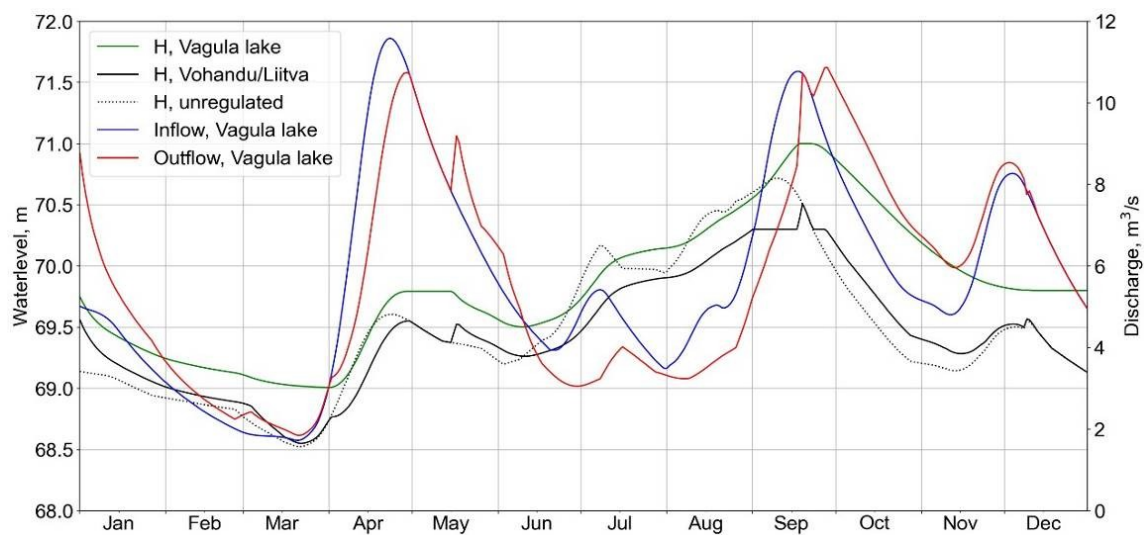
Sama lähenemist kasutades ei jõutaks kunagi ka kõrgema sihtveetasemeni – 70.3 m (vt Joonis 8.2).



Joonis 8.2. Sissevoolu ja väljavoolu graafikud ning veetasemed Vagula järves ja Võhandu (Liitva) kanalis. Stsenarium: üleujutus esinemistõenäosusega üks kord 10 aasta jooksul. Sihtveetase Võhandu (Liitva) kanalis – 70.3 m.

8.1.2 Aasta 2010

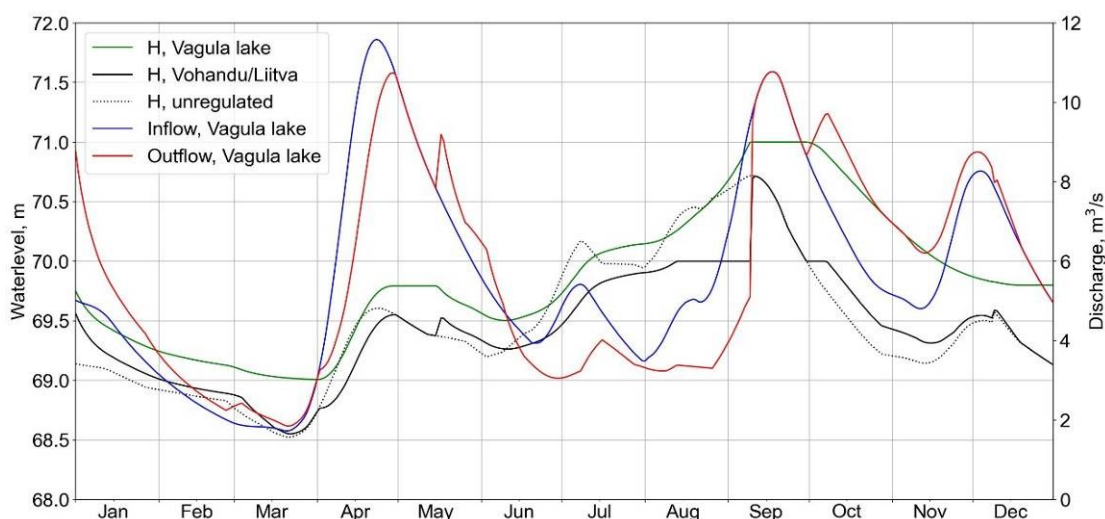
Ajaperioodil, mille kohta Võru linna sademete andmereal on kättesaadavad, on ühel aastal (2010) olnud suurem sademete hulk kui kasutatud 10 aasta stsenaariumis.



Joonis 8.3. Sissevoolu ja väljavoolu graafikud ja veetasemed Vagula järves and Võhandu (Liitva) kanalis. Stsenarium: aasta 2010. Sihtveetase Võhandu (Liitva) kanalis – 70.3 m.

Alljärgnevalt on kirjeldatud regulaatori aastane töörežiim 2010. aasta olukorras, kasutades sihtveetaset 70.3 m:

- Talvekuudel (jaanuar-märts) tuleb valmistuda ette lume sulamiseks. Lume sulamise perioodil (aprill) tekkiva tulvavee mõju leevendatakse vee kogumisega Vagula järve. Peale kevadist suurvett, taimestiku vabal ajal (mai keskpaigast kuni juuni keskpaigani) langetatakse Vagula järves veetaset, et tekitada varu suvise suurvee jaoks.
- Suvel (alates juuni keskpaigast) koguneks vesi järk-järgult Vagula järve. 2010. aastal oli suvine keskmine vooluhulk $4 \text{ m}^3/\text{s}$ (10-aastase stsenaariumi korral on see $3 \text{ m}^3/\text{s}$). Seetõttu saavutatakse sihtveetase 70.3 m varem - 2. septembriks. Vett on võimalik Vagula järve koguda kuni 18. septembrini, mil see jõuab maksimaalse veetasemeni (71 m). Selles olukorras tuleb võimaldada vee väljavool ning regulaatorist allavoolu on sihtveetase 5 päeva ületatud. Maksimaalne veetase Liitva kanalis on 70.51 m, mis on selgelt parem kui reguleerimata olukorras.
- Üleliigse vee võib Vagula järvest välja juhtida pärast taimestiku kadu (septembri lõpust detsembri alguseni).



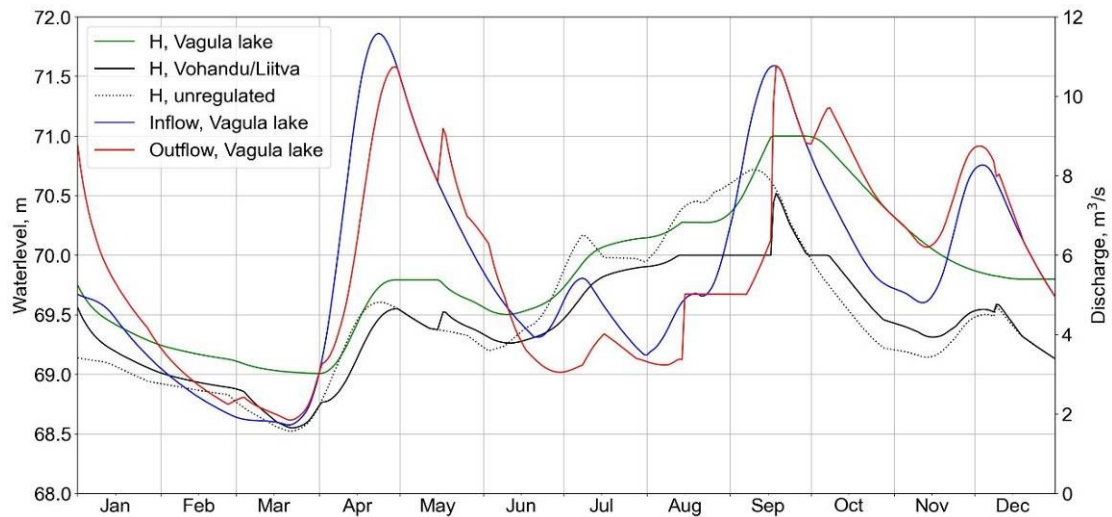
Joonis 8.4. Sissevoolu ja väljavoolu graafikud ja veetasemed Vagula järves and Võhandu (Liitva) kanalis. Stsenaarium: aasta 2010. Sihtveetase Võhandu (Liitva) kanalis – 70.0 m.

Kui seada sihtveetase veel madalamale (70 m, joonis 8.4), siis see saavutatakse 13. augustiks. Siis on edasine vee kogumine Vagula järve võimalik kuni 10. septembrini. Veetase järvest allavoolu oleks üle sihtveetaseme 3 nädalat ning selle maksimumiks oleks 70.71 m.

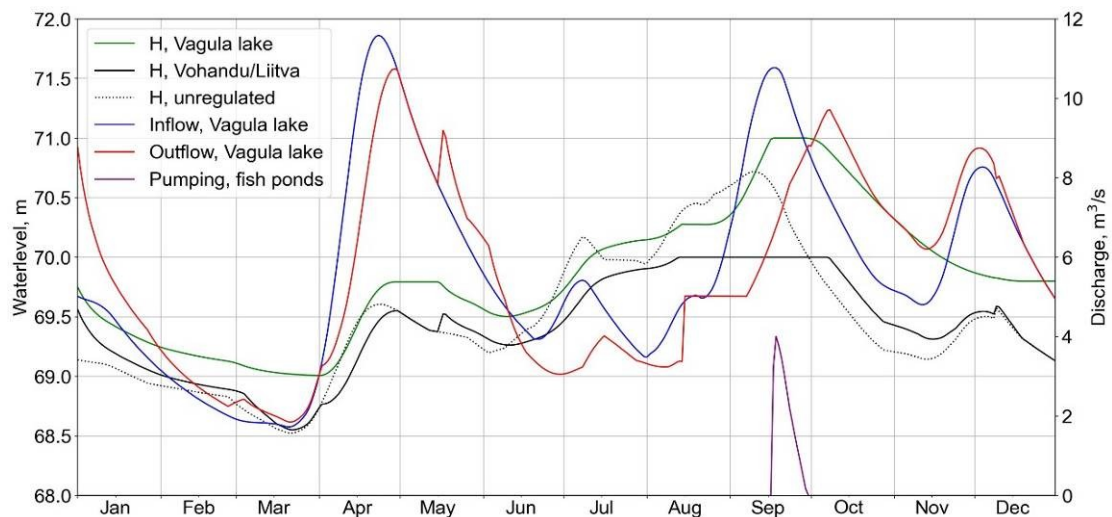
Järgnevalt on kirjeldatud võimalikke lisameetmeid, mida saab sellises olukorras rakendada.

1. **Paidra paisu avamine ja allavoolu paiknevatest jõelõikudest taimestiku eemaldamine** peale sihtveetaseme saavutamist (vt joonis 8.5). Selle meetmega võidakse vee Vagula järves hoidmiseks veel ühe nädala. Kriitiline veetase 71 m saavutatakse 17. septembril. Veetase järvest allavoolu oleks üle sihtveetaseme 13 päeva ja selle maksimum oleks 70.52 m.

2. **Vee hoiustamine Järvere kalatiikides** (vt joonis 8.6). Joonisel on kujutatud vee tiikidesse pumpamise mõju, kui sellega alustatakse 17. septembril ehk pärast maksimaalse veetaseme saavutamist Vagula järves. Pumpamist oleks vaja teha 2 nädalat ja kalatiikidesse pumbatav vesi kasutaks 2/3 tiikide mahutavusest – 2.45 miljonit m³. Sihtveetaset Vagula järvest allavoolu ei ületataks.



Joonis 8.5. Sissevoolu ja väljavoolu graafikud ja veetasemed Vagula järves and Võhandu (Liitva) kanalis. Stsenaarium: aasta 2010, rakendatud on Paidra paisu avamine ja taimestiku eemaldamine. Sihtveetase Võhandu (Liitva) kanalis – 70.0 m.



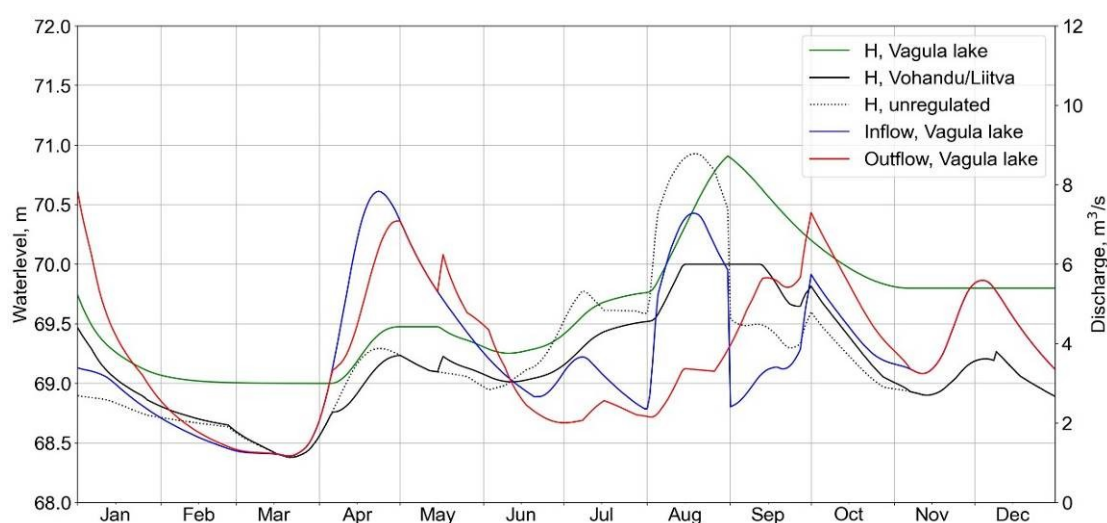
Joonis 8.6. Sissevoolu ja väljavoolu graafikud ja veetasemed Vagula järves and Võhandu (Liitva) kanalis. Stsenaarium: aasta 2010, rakendatud on Paidra paisu avamine, taimestiku eemaldamine ja vee pumpamine kalatiikidesse. Sihtveetase Võhandu (Liitva) kanalis – 70.0 m.

8.1.3 Üleujutus augustis, esinemistõenäosusega üks kord 10 aasta jooksul

Üleujutusohu stsenaariumi üks kord 10 aasta jooksul puhul on suurim sademete hulk septembris, mil veetaimestiku mõju hakkab vähenema. Seetõttu hinnati lisaks, kuidas näeks Vagula järve väljavoolu reguleerimine välja olukorras, kui kõige suurem sademete hulk langeb augustisse, mil taimestik on täies jõus.

Selleks loodi kunstlik hüdrograaf, milles augusti ja septembri sademete hulgad on vahetuses. Joonis 8.7 illustreerib olukorda sihtveetaseme 70 m juures.

Kuigi sihtveetase saavutatakse juba 12. augustil, ei ületata Vagula järves vee hoiustamise mahtu.



Joonis 8.7. Sissevoolu ja väljavoolu graafikud ja veetasemed Vagula järves and Võhandu (Liitva) kanalis. Stsenaarium: üleujutus esinemistõenäosusega üks kord 10 aasta jooksul kõige kõrgema veetasemega augustis. Sihtveetase Võhandu (Liitva) kanalis – 70,0 m.

8.1.4 Veetaseme reguleerimise stsenaariumite kokkuvõte

Kõikide stsenaariumite kokkuvõte on esitatud tabelis 8.1.

1. Liitva kanalis oli neli eesmärgiks seatud sihtveetaset – 69,8, 70,0 ja 70,3 m, (tulp „sihtveetase“).
2. Arvestati kolme voolurežiimi stsenaariumiga (tulp „stsenaarium“):
 - aasta 2010;
 - üleujutus esinemistõenäosusega üks kord 10 aasta jooksul;
 - üleujutus esinemistõenäosusega üks kord 10 aasta jooksul augustis/septembris.
3. Arvestati järgmiste täiendavate meetmete rakendamisega (tulp „täiendavad meetmed“):
 - “Paidra” – Paidra tammi eemaldamine.

- “Taimestik” – taimestiku eemaldamine jõesängist.
- “Pumpamine” – vee pumpamine Järvere kalatiikidesse.
- “Puuduvad”- täiendavaid meetmeid ei rakendata.

4. Tabeli 8.1 read vastavad voolurežiimi, sihtveetaseme ja täiendavate meetmete kombinatsioonile. Iga kombinatsiooni kohta on tabelis järgnevad näitajad:

- “Maksimaalne veetase”- maksimaalne veetase Liitva kanalis.
- “Pumbatud maht”- kalatiikidesse pumbatud veemaht (kui asjakohane).
- “Sihtveetaseme ületamise kuupäev”- kuupäev, millal ületatakse sihtveetase (kui ületatakse).
- “Päevad üle sihttaseme” – päevade arv, millal on sihtveetase ületatud (kui neid on).
- “Sihtveetaseme algus” - kuupäev, millal sihtveetase saavutatakse (kui saavutatakse).
- “Päevad sihttasemel” – päevade arv, millal veetase on sihtveetasemega võrdne (kui neid on).

Tabel 8.1. Kokkuvõtte modelleeritud veetaseme reguleerimise stsenaariumitest.

Stsenaarium	Täiendavad meetmed	Sihtveetase	Maksimaalne veetase	Pumbatud maht, m ³	kuupäevSihtveetaseme ületamise	Päevad üle sihttaseme	Sihtveetaseme algus	Päevad sihttasemel
2010	Puuduvad	69.80	70.72	0	04/09	32	14/07	62
2010	Paidra	69.80	70.69	0	04/09	32	14/07	62
2010	Paidra+taimestik	69.80	70.67	0	09/09	27	14/07	67
2010	Paidra+taimestik+ pumpamine	69.80	70.52	3690000	17/09	19	14/07	75
x10	Puuduvad	69.80	69.80	0		0	30/08	35
x10Aug	Puuduvad	69.80	70.47	0	30/08	2	11/08	44
x10Aug	Paidra	69.80	70.40	0	31/08	1	11/08	45
x10Aug	Paidra+taimestik	69.80	69.80	0		0	13/08	37
2010	Puuduvad	70.00	70.71	0	10/09	21	13/08	35
2010	Paidra	70.00	70.69	0	10/09	20	13/08	36
2010	Paidra+ taimestik	70.00	70.52	0	17/09	13	13/08	43
2010	Paidra+taimestik+ pumpamine	70.00	70.00	2455081		0	13/08	56
x10	Puuduvad	70.00	70.00	0		0	12/09	14
x10Aug	Puuduvad	70.00	70.00	0		0	15/08	29
x10Aug	Paidra	70.00	70.00	0		0	15/08	29
x10Aug	Paidra+ taimestik	70.00	70.00	0		0	19/08	19
2010	Puuduvad	70.30	70.51	0	18/09	5	02/09	21

Stsenaarium	Täiendavad meetmed	Sihtveetase	Maksimaalne veetase	Pumbatud maht, m ³	kuupäevSihtveetaseme ületamise	Päevad üle sihttaseme	Sihtveetaseme algus	Päevad sihttasemel
2010	Paidra	70.30	70.38	0	20/09	3	02/09	22
2010	Paidra+ taimestik	70.30	70.30	0		0	10/09	17
x10	Puuduvad	70.30	70.07	0		0		0
x10Aug	Puuduvad	70.30	70.30	0		0	22/08	10
x10Aug	Paidra	70.30	70.30	0		0	23/08	9
x10Aug	Paidra+taimestik	70.30	70.17	0		0		0

8.2 Üleujutuste leevendamise organisatoorne korraldus

Lisatud tööle eraldiseisva failina (8.2)