



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND  
Ehituse ja arhitektuuri instituut

**LINNA SADEMEVEESÜSTEEMIDE  
ÜLEUJUTUSRISKI LEEVENDAMISMEETMETE  
PLANEERIMINE**

**PLANNING OF FLOOD RISK MITIGATION MEASURES  
FOR URBAN RAINWATER SYSTEMS**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Anna Krasnikova

Üliõpilaskood 177643 EAKI

Juhendaja: Ivar Annus, professor

# AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....." ..... 20.....

Autor: Anna Krasnikova

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." ..... 20.....

Juhendaja: Ivar Annus

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....." .....20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina Anna Krasnikova (sünnikuupäev 25.05.1998)

Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „**Linna sademeveesüsteemide üleujutusrisiki leevendamismeetmete planeerimine**“,

mille juhendaja on Ivar Annus,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

1. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

2. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

---

22.05.2022

---

<sup>1</sup> Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

**Ehituse ja arhitektuuri instituut**  
**LÕPUTÖÖ ÜLESANNE**

**Üliõpilane:** Anna Krasnikova, 177643 EAKI  
**Õppekava, peeriala:** EAKI02/17 – Hoonete sisekliima ja veetehnika veetehnika  
**Juhendaja:** professor, Ivar Annus, 6202557

**Lõputöö teema:**

**Linna sademeveesüsteemide üleujutusriski leevendamismeetmete planeerimine**

Planning of flood risk mitigation measures for urban rainwater systems

**Lõputöö põhieesmärgid:**

1. Uurida linna sademeveesüsteemide üleujutusriski leevendamismeetmeid
2. Koostada sobivate looduslähedaste leevendusmeetmete valiku meetodika
3. Katsetada meetodika toimivust hüdraulilise mudeli abil

**Lõputöö etapid ja ajakava:**

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjandusolustiku ülevaade	31.01.22
2.	Metoodika välja töötamine, mudelsimulatsioon	01.04.22
3.	Analüüs, lõputöö vormistamine	13.05.22

**Töö keel:** Eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 23 mai 2022

**Üliõpilane:** ..... ".....".....20.....a  
/allkiri/

**Juhendaja:** ..... ".....".....20.....a  
/allkiri/

**Konsultant:** ..... ".....".....20.....a  
/allkiri/

**Programmijuht:** ..... ".....".....20.....a  
/allkiri/

# SISUKORD

SISSEJUHATUS .....	7
1 KIRJANDUS- JA OLUSTIKU ÜLEVAADE .....	8
1.1 Kliima muutused.....	8
1.1.1 Kliimamuutuste mõju.....	8
1.1.2 Sademed Eestis .....	9
1.2 Üleujutusriski leevendamine maailmas ja Euroopa piirkonnas .....	10
1.2.1 Euroopa .....	11
1.2.2 Eesti .....	13
2 LAHENDUSED .....	15
2.1 Säätvad sademevee süsteemid .....	15
2.1.1 Taristud .....	15
2.1.2 Säätvate sademevee süsteemide ülevaade.....	15
2.1.3 Tark linn .....	16
2.2 Eesti kliimasse sobivad looduslähedased lahendused .....	17
2.2.1 Lahendused tekkeallika juures .....	18
2.2.2 Viibeaga pikendavad lahendused .....	19
2.2.3 Saastest puhastavad lahendused.....	21
2.2.4 Standardsed lahendused .....	25
2.2.5 Maatriks hinnangutega.....	26
2.2.6 Olemasolevad lahendused ja miks need ei tööta.....	28
3 METOODIKA .....	31
3.1 Üleujutusriskiga alade kaardistamine .....	31
3.2 Üleujutuse tekkepõhjuse analüüs.....	32
3.3 Leevendusmeetme valik .....	33
3.3.1 Looduslähedaste meetmete rakendamise võimalikus .....	33
3.3.2 Looduslähedaste meetmete sisu .....	34
3.3.3 Sademevee kanalisatsiooni eesvool .....	35
4 METOODIKA RAKENDUS .....	38
4.1 EPA SWMM 5.1 .....	38
4.1.1 Tarkvara kasutusvaldkond ja võimalused .....	38
4.1.2 Arvutusmeetodid.....	39
4.1.3 LID (Low Impact Development) elemendid .....	39
4.2 Pilootala .....	40
4.2.1 Pilootala iseloomustus.....	41
4.2.2 Geoloogia.....	42
4.2.3 Pilootala mudel ja selle eesmärk .....	43
4.2.4 Arvutusvihmad.....	44

4.3 Pilootala murekohad.....	46
4.4 Võimalikud lahendused.....	48
4.4.1 Parklad .....	48
4.4.2 Pargialad.....	49
4.5 Metoodika rakendamine.....	49
4.5.1 Raudteejaama parkla torustiku kalde taastamine .....	50
4.5.2 Kreutzwaldi ja Kalda tänavate ristmik, Ernst Enno mälestusmärk .....	52
4.5.3 Haapsalu kaubamaja parkla lahendused.....	56
KOKKUVÕTE .....	61
SUMMARY.....	62
KASUTATUD KIRJANDUS .....	63
LISAD .....	67

# SISSEJUHATUS

Käesoleva magistritöö eesmärk on välja töötada meetodika, millega saab tõhusalt planeerida linnakeskkonnas üleujutusriskiga aladel ennetamismeetmeid uputuste vältimiseks. Globaalsest soojenemisest põhjustatud kliimamuutused väljenduvad Eestis eelkõige suurenevate sademeveehulkade, soojemate talvede ja tõusva meretaseme näol. Sellest tingituna suureneb üleujutuse oht linnades. Üks viis, kuidas tekkinud olukorraga kohaneda, on rakendada linnaplaneeringu meetmeid, mis on mitmekesised ning toetavad alade jätkusuutliku arengut.

Linnades põhjustab üleujutusi sademevesi, mille vooluhulgad valingvihmade ajal on suuremad olemasolevate süsteemide dimensioneerimiseks kasutatud vooluhulkadest. Kohtades, kus torustik ei suuda vastu võtta paele voolavat sademevett, tõuseb vesi restkaevude kaudu pinnale, tekitades üleujutusi madalamates kohtades.

Üleujutusrisiki leevendamiseks on võimalik rakendada nii aktiivseid kui passiivseid meetmeid. Selle magistritöö raames pakutakse Haapsalu linna pilootala näitel optimaalsemaid lahendusi ning katsetatakse neid mudelis, kasutades linna sademeveesüsteemi digitaalset kaksikut. Eesmärgiks on luua meetodika uurimisala leevendusmeetmete planeerimiseks.

Haapsalu linna sademeveetorustiku mudel (digitaalne kaksik), mida käesoleva lõputöö raames kasutatakse on eelnevalt loodud NOAH projekti raames. Mudel sisaldab linna sademevee äravoolusüsteemi torustikke, kraave ning imbväljakuid. Mudeli arvutustulemusi kasutatakse üleujutusriskiga alade tuvastamiseks. Olemasolevat mudelit kaasajastatakse seoses uuenenud sademevee arvutusallustega standardis EVS 848:2021 [2]. Mudeli täiendamiseks ja tulemuste valideerimiseks kasutatakse EPA SWMM 5.1 (EPA Storm Water Management Model) ja ARCMAP 10.6 tarkvarasid.

Käesolev töö on jaotatud neljaks peatükiks. Esimeses peatükis antakse ülevaade kliimamuutustest ja selle põhjustest. Teises kirjeldatakse ning analüüsitakse olemasolevaid lahendusi ning Eesti kliimasse sobivaid sademeveelahendusi. Kolmandas peatükis kirjeldatakse üleujutusriskide leevendusmeetmete valimise meetodikat. Viimase peatüki keskmes on juhtumiuuring, mis analüüsib konkreetse piirkonna kohta koostatud simulatsioonimudeli põhjal koostatud erinevate stsenaariumide tulemusi.

Võtmesõnad: sademevesi, üleujutusrisk, planeerimine, mudelsimulatsioon, magistritöö

# 1 KIRJANDUS- JA OLUSTIKU ÜLEVAADE

## 1.1 Kliimamuutused

Kliimamuutuste mõju on juba tuntav üleilmselt. Töösturevolutsiooni-eelsest perioodist on maailma keskmine temperatuur kasvanud 0,8 °C ning see kasv jätkub. Mandri-Euroopa keskmine temperatuur kasv on viimase 10 aasta jooksul olnud 1,3 °C ehk Euroopas on soojenemine kiirem kui mujal maailmas. Temperatuuritõusuga kaasnevad ka muutused sademete hulgas, intensiivsuses ja jaotuses, mis omakorda mõjutab meretaset ning suurendab ranniku- ja kaldaerosiooni ohtu [3].

### 1.1.1 Kliimamuutuste mõju

Eesti kliimastenaariumite kohaselt on oodata suuri muutusi temperatuuri ja sademete režiimis ning nendega kaasnevaid torme, üleujutusi ja põua perioode. Muutuvad ka jää- ja lumikatte kestuse perioodid ning mere- ja siseveekogude tase. Sagenevad talvised ja varakevadised üleujutused, mis põhjustavad majandusliku ja sotsiaalset kahju, ning koormavad üle olemasolevaid sademevee kanalisatsioonivõrke [4].

Erinevad stsenaariumitega prognoositakse ekstreemsete ilmastikunähtuste sagenemist. Võimalike stsenaariumitega peab arvestama üldplaneeringuid koostades ja nende aluseks olevaid projekteerimistingimusi ja lähteülesandeid väljastades. Tulenevalt kliimamuutusest on vajalik ka kaasajastada või välja vahetada olemasolevaid süsteeme, mis ei ole tänapäeva sademete vastuvõtmiseks piisavad.

### Mõju linnakeskkonnale

Elukeskkonda mõjutavad lisaks kliimamuutustele tegurid nagu poliit-majanduslikud ja sotsiaalsed suundumused. Keerulise ülesehituse ja korraldusega keskkonnad nagu seda on linnad, ei ole võimelised kiiresti uute oludega kohanema. Laienev linnamaastik ja uue taristu rajamine tihti võimendab kaasnevaid riske. Muutuv kliima tekitab uusi väljakutseid linnakeskkonnas – kuumasaared, halvenev õhukvaliteet, jalakäijate termiline mugavus mis mõjutavad rahvatervist. Kvaliteetsed planeeringud on üks viisidest alandamiseks nimetatud riske ning vahend tagamaks linnakeskkonna vastupidavus kliimamuutuse mõjule. Arvestades planeeringutes teostatud riskianalüüside ja keskkonnamõju hindamise tulemustega on võimalik maandada üleujutustest, tormidest ning kuumalainetest tulenevaid riske. [3] [5]

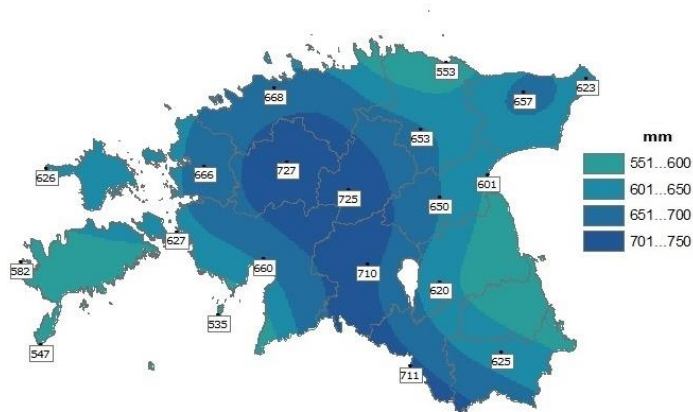


## 1.1.2 Sademed Eestis

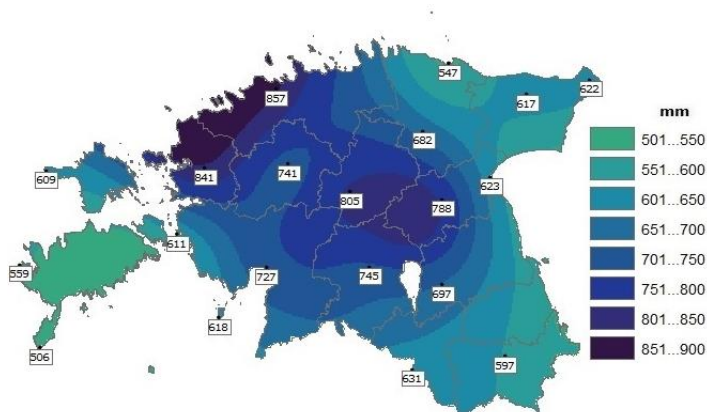
### Statistika, prognoosid

Eesti puhul võib lugeda sademeriikkaks olukorda, kui ööpäevased sademed ületavad 10 mm. Sellisel juhul muutub parasniiskeks mulla ülakiht, märg muld aga vesiseks. See võimaldab tekkida üleujutustel ka veekogudeta aladel, sest pinnas ei suuda rohkem sademed vastu võtta [6].

Allolevad pildid kirjeldavad viimaste aastakümnete jooksul toimunud sademete hulga muutust. Harjumaa puhul on sademete vahemik tõusnud 651-700 mm pealt 851-900 mm peale. 200 mm võrra suurenenud sademete kogus paneb proovile linnade olemasolevad sademeveesüsteemid, mis toob esile vajaduse üle vaadata lähenemist sademevee äravoolu korraldamise lahendustele ning senistele projekteerimistavadele.



Joonis 1 Aasta sademete summa norm (1961-1990) [7]



Joonis 2 Aasta sademete summa norm 2020 [7]

## Tuleviku sademed

Kliimastsenaariumite kohaselt on oodata enim kasvu sademetes kevadel ja suvel. Äärmuslike sademete (üle 30 mm päevas) juhtumite arv suureneb, kuid kuna nende esinemise tõenäosus on väike suuremal osal aastast, on see oluline suviti. Põhja-Euroopa piirkonna tulevikuprognoside kohaselt on oodata maailma keskmisest kõrgemat temperatuuritõusu, lume- ja jääkatte vähenemist, sagenevaid talvetorme ja suurenenud jõgede vooluhulkasid.

Muutusi esineb ka hooajalistes sademetes: suvine sademete hulk võib väheneda kuni 10%, talvine aga kasvada kuni 80%. Seega on tulemas enam rannikualade üleujutusi ning erosiooni. Nende nähtuste sagenemine tõenäoliselt suurendab looduskatastroofide ulatust, mis põhjustavad majanduslikke kahjusid, terviseprobleeme ja surmajuhtumeid. Eesti läänerannikul asendub pikaajaline suhteline merelanguse trend tõusutrendiga, mis võib tähendada sajandi lõpus keskmise meretaseme tõusu 20-60 cm [3].

## 1.2 Üleujutusrisiki leevendamine maailmas ja Euroopa piirkonnas

Linnapiirkondade laienemine avaldab püsivat mõju keskkonnale ja inimeste sotsio-ökonoomsele järjele. Linnamaade laienemise ennetav juhtimine läbi arukate planeeringute võimaldab luua võrdsust edendavaid ja säästlikke linnamaastikuid [8]. Linnastumisega tekkisid alad, kus hoonestuse ja rajatud teede tõttu pole võimalik liigvett loomulikult ära juhtida ning on vajadus kasutada sademevee kanalisatsiooni ja drenaažisüsteeme. Linnapiirkondade vähenenud taimestik, ehitamisest põhjustatud pinnase tihenemine ning suur kõvakattega pindade osakaal vähendavad märkimisväärselt sademevee imendumist [9].



Joonis 3 Sademevee äravool looduslikus (A) ja linnastunud keskkonnas (B) protsentides [10]

Üks tõsisemaid linnastumise tagajärgi on üleujutusrisi suurenemine. Linnaplaneerijad ja vee-ettevõtted maandavad üleujutusriske, tugevdades linna vastupanuvõimet üleujutustele, kusjuures insenerid panevad rõhku üleujutusvastastele infrastruktuuridele [11].

### **1.2.1 Euroopa**

Euroopas reguleerib üleujutusriskide käsitlemist Euroopa parlamendi ja nõukogu direktiiv 2007/60/EÜ, mis reguleerib üleujutusrisi hindamist ja maandamist. Direktiiv näeb ette üleujutusrisi maandamise kavade koostamist. Kuna üleujutuste põhjused ja tagajärjed erinevad riigiti ja piirkonniti, on vajalik arvestada piirkondade eripäradega ning pakkuda individuaalseid lahendusi lähtuvalt vajadustest ja prioriteetidest [12].

Euroopa Liidu asulareovee puhastamise direktiivi (91/271/EEC) I lisas on öeldud, et ühisvoolse kanalisatsiooni valingvihmadest põhjustatud ülevoolude reostavat mõju eelvooludele tuleks vähendada. Siiski on ühisvoolsete kanalisatsioonisüsteemi ülevoolude olemasolu on hädavajalik, kuna on majanduslikult ebaotstarbekas rajada kanalisatsioonisüstei ja puhastusseadmeid selliselt, et kogu vesi oleks valingvihmade korral puhastatud [13]

### **Euroopa linnade strateegiad**

Vastavalt Euroopa direktiividele ja jätkusuutliku arengu põhimõtetele on algatatud hulgaliselt projekte üle Euroopa, mille eesmärgiks on linnade sademeveesüsteemide vastupanuvõime suurendamine sagenenud valingvihmadele. Järgnevatel jaotistes on toodud mõned näited eesrindlikumatest linnadest.

### **Berliin, Saksamaa**

Berliin võttis kasutusele kombineeritud sademeveekäitluse süsteemi ehk sademevee äravool on tagatud nii kanalisatsioonitorustiku kaudu kui ka rohetaristu rakendamisega (rohekatused, vihmaaiad). Uued linnaosad ehitatakse „käsna“ omadustega – piiratakse sademevee äravoolu ning käsitletakse seda rakendatava ressursina ja ehitatakse vett läbilaskvaid katendeid [14].

Alustatud oli ka mitme ulatusliku projektiga, mis aitavad tagada vee kvaliteedi nõuetele ja linnaruumis vee ära kasutada. Flussbad Berlin (eesti keeles *jõe ujula*) on linnaarengu programm, mis on loodud eesmärgiga soodustada ajaloolise Berliini kesklinna läbiva veetee lõigu tulevikku suunatud kasutamist. Selle umbes 1,9-kilomeetrine pikkuse ala, mida tuntakse Spree kanali nime all, plaan hõlmab biotoobimaastiku ja jõevee

loodusliku filtreerimise osa loomist [15]. Selline taristu edendab ka linna „kliimat“ – parem õhukvaliteet ning vähenenud kuumasaared [16].



Pilt 1 Friedrichsgracht, Berliin (2006) [17]



Pilt 2 Friedrichsgracht. Flussbad Berlin projekti kavand (2019) [18]

## **Kopenhaagen, Taani**

Sarnane projekt on ellu viidud ka Kopenhaagenis, kus infrastruktuuri muudatustega tõsteti sadama-alal veekvaliteeti ning loodi atraktiivse sotsiaalelu- ja kultuurikeskus [19]. Kopenhaagenis koostati sujuvamaks kohanemiseks muutuvate ilmaoludega kohanemiskava, milles kirjeldatakse lühikeses ja pikas perspektiivis linna väljakutseid

seoses kliimamuutusest tulenevate väljakutsetega. Selgitatakse välja lahendused, mis praeguste teadmiste põhjal kõige sobivamad lahendused. Strateegia eesmärgid on õigeaegne reageerimine muutustele, investeeringud on vajalikud ning toetavad rohetaristu arengut, otsuseid tehakse põhjalikke analüüside ja andmete põhjal, toimub koostöö võimalikult erinevate osapooltega eri tasanditel.

Kava toob välja viis võtmetegurit, millega eelkõige arvestatakse:

- Paindlik kohandamine

Kopenhaagen kohandab oma strateegiaid vastavalt kliimastsenaariumi põhitrendide järgi, kuna liiga kaugeleulatavatele prognoosidele tugineda pole otstarbekas.

- Seosed teiste planeeringutega

Linnaarengu pikaajaline planeerimine on tihedalt seotud kliimaga kohanemisega ning võimalikult paljude valdkondade läbi tegutsemine ja kaasamine tagab töötavad lahenduse ja jätkusuutliku tulemuse.

- Kõrge tehniline tase

Uuringute ja analüüside kõrge kvaliteediga tagatakse, et investeeringud on optimaalsed nii majanduslikult kui ka seotud eesmärki saavutamiseks.

- Kliimaga kohandatud atraktiivne linnakeskkond

Linnaruumi parendamiseks võetakse kasutusele rohe- ja sinitaristu elemendid kasutusele, lisandväärtuse pakkumine.

- Koostöö riiklikul ja rahvusvahelisel tasanditel

Kogemuste ja teadmiste jagamine, võimalikke huvigruppide arvamuste ja vajadustega arvestamine ning tegevuste koordineerimine sujuva kohanemisprotsessi tagamiseks.

## **1.2.2 Eesti**

### **Eesti kliimamuutuste kohanemise programmid**

Eestis riigis on välja töötatud strateegiadokument „Kliimamuutuste mõjuga kohanemise arengukava aastani 2030“, mille eesmärgiks on regionaalsel ja kohalikul tasandil suurendada valmidust ja võimet ilmaolustiku muutustega kohaneda. Käsitletakse kõige haavatavamaid valdkondi ning võimalikke meetmeid toimetulekuks tulevikus. [3]

Kohalikul tasandil reguleerivad meetme vajalikust linnade ja piirkondade arengukavad. Tallinna sademevee strateegia aastani 2030 käsitleb erinevaid meetmeid, et vältida sademetest tingitud üleujutusi, mis koosnevad olemasolevate süsteemide (pumbajaamad, suletud ülevoolud, kraavid jne) taastamisest ja kontrollist, lahkvoole kanalisatsioonivõrgu laiendamisest, tippvooluhulkade piiramisest [13].

Linnatänavatel võivad tekitada üleujutusi ka omavalitsusega kooskõlastamata kinnistuomanike tegevused, mis takistavad sademeveeäravoolu [20].

### **Standardid**

Standard EVS 848:2021 Väliskanalisatsioonivõrk reguleerib hoonevälist ühiskanalisatsioonivõrku, sellega on määratud nõuded kanalisatsioonivõrgu planeerimise, projekteerimise, ehitamise, käitamise ning toodud välja tegevused nõuete täitmiseks. Standardis on käsitletud sademevee ärajuhtimist ning esitatud käitlemisviisid:

- Sademevee kogumine ja taaskasutamine;
- Sademevee täielik või osaline immutamine tekkekohas;
- Sademeveest vabanemine, kasutades looduslähedasi lahendusi;
- Sademevee äravoolu aeglustamine, viibeaja pikendamine enne selle ära juhtimist;
- Sademevee juhtimine torustikku;
- Valingvihmadest põhjustatud sademevee üleujutuste vältimise ja vähendamise võimalused. [2]

Standard käsitleb ka sademeveest tingitud üleujutusi ning samme nende vältimiseks:

- Määratleda riskiga piirkonnad ja alad;
- Linnalistes piirkondades sademevesi teadlikult ümbersuunamine, üleujutuskohtade teadlik määramine;
- Vee juhtimine torustikes IT-lahenduste abil ümberjuhtimiseks/kinnihoidmiseks;
- Elektroonilised liiklumsmärgis üleujutuspiirkonnast liikluse ümber suunamiseks;
- Uuselamupiirkondades vooluhulga ühtlustamiseks puhveralade eelistamine;
- Võimaluse korral eelistada sademevee käitlemise lahendusi sademevee tekkekohas.

Standardi uuenenud versioon (EVS 848:2021) arvestab kliimamuutuste mõjuga ning kaasajastatud on arvutusvihmade koostamise meetoodika [21].

## 2 LAHENDUSED

### 2.1 Säästvad sademevee süsteemid

#### 2.1.1 Taristu

Linnakeskkonna sademevee taristut liigitatakse nende põhimõtete järgi. Kolm põhigruppi on hall, sinine, roheline.

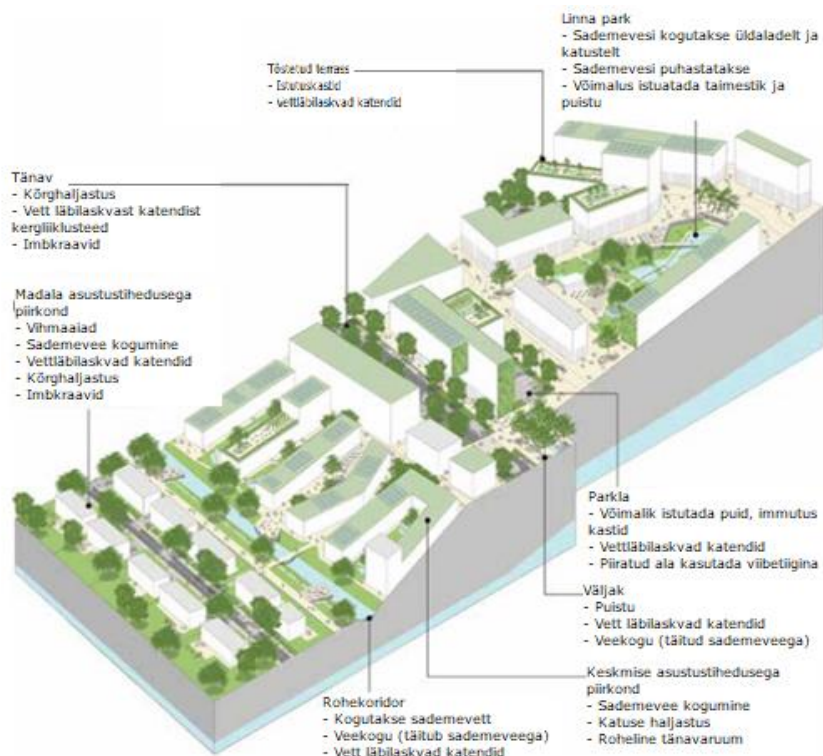
Hall infrastruktuur on füüsilised süsteemid ja rajatised, mis aitavad tehiskeskonna süsteemidel toime tulle ilma muutlikkuse ja kliimamuutustega. Nende hulka kuuluvad tammid, erinevad rajatised jõgede ja ranniku üleujutuste kaitseks, sademevee ärajuhtimise süsteemid nagu sademekanalisatsioon, torud ja kogumismahutid. Tehnilised lähenemisviisid suures osas asendavad looduslike süsteemide funktsioone. Sellised taristud on olulised vahendid biofüüsikaliste ohtude ja kliimast tingitud äärmuslike ilmasündmustega kohanemiseks, kuid nende puudulik paindlikus ei pruugi kaitsta asustatud alasid. Süsteemide toimivuse ammendumine võib põhjustada katastroofilisi tagajärgi. Võrreldes looduslike lahendustega nõuab hall taristu vähem ruumi ja seda on võimalik jälgida ja kontrollida. [22].

Roheline ja sinine infrastruktuur põhineb peamiselt terviklikel ja toimivatel ökosüsteemidele rakendamisele. Neis lahendustes kasutatakse vähe või üldse mitte tehnoloogilist sekkumist. Roheline taristu koosneb biofüüsikalistest süsteemidest nagu korallrahud, rannikuäärsed soolad, liivarannad ja luited looduses ning inimtekkelises keskkonnas metsad, pargid, tänavapuud. Käsitletakse ka looduspõhiseid lahendusi (rohekatused, imbkraavid jne), mis vähendavad üleujutusi tekkekohas, majanduslikku kahju ja ebamugavust keskmise või sagedase taastumisperioodiga vihmade puhul. On oluline, et need väikesemahulised rajatised ei avalda suurt mõju katastroofiliste vihmasadude ning kaasnevate nähtustega, nagu jõe üleujutus, mereäärne üleujutus, mis kujutavad suurimat ohtu linna infrastruktuurile ja elanikkonnale. Seega on vaja mitmetasandilist lähenemist, et kohaneda muutuvate sademete dünaamikaga, mis keskenduks nii kohalike lahenduste paigaldamisele ning üleujutusosaladel ennetusmeetmete planeeringule, mis moodustavad tervikliku ja multifunktsionaalse linna sademevee äravoolusüsteemi [23] [22].

#### 2.1.2 Säästvate sademevee süsteemide ülevaade

Säästvate sademevee süsteemide (ingl.k SuDS ehk *sustainable urban drainage systems*) põhiülesandeks on pikendada sademete kokkuvooluaega ning hajutada või

immutada neid tekkekohas või selle lähedal, kasutades selleks lahendusi, mis jäljendavad looduslike protsesse. Lahenduste alla kuuluvad immutusribasid, vett läbilaskvaid katendid, rohekatused ning sademevee kogumis- ja taaskasutamissüsteemid [24].



Joonis 4 Võimalikud looduslähedased lahendused linna keskkonnas [25]

Looduspõhised lahendused (ingl.k NbS ehk *nature based solutions*) on loodusest inspireeritud lahendused. Need on kuluefektiivsed ja pakuvad samaaegselt keskkondlikku, sotsiaalset ja majanduslikku kasu ning aitavad suurendada linna vastupanuvõimet ekstreemsete ilmastikuoludele [26].

### 2.1.3 Tark linn

Tark linn (ingl k *Smart City*) on linnakeskkonna haldamise kontseptsioon, mille eesmärgiks on saavutada jätkusuutlikkus ja parandada elukvaliteeti, põhinedes asutuste, kogukondade ja innovatsiooni koostoimele olemasoleva infrastruktuuriga [27]. Rakendades IKT lahendusi (info- ja kommunikatsioonitehnoloogia) nagu asjade internet (ingl k *IoT – Internet of things*) on võimalik panna kogu linn töötama ühtse süsteemina. Targa linna tehnoloogia puhul on oluline märkida, et põhifookus on seni olnud transpordil ning meelelahutusel, kuigi lahendamist ootavad ka kriitilised väljakutsed nagu üleujutusriskiga võitlevad linnapiirkonnad. Automatiseeritud



sademeveesüsteem on võimeline kohanduma muutuvate sademehulkade ja välisteguritega [28].

### **Andurid**

Üha enam linnu maailmas kasutavad andureid oma rohetaristus, et hinnata nende efektiivsust erinevate ilmasündmuste puhul ning jälgida hooldusvajadust. Andurid koguvad infot näiteks sademete hulga ja pinnase niiskuse kohta. Nende andemete põhjal on võimalik analüüsida lahenduse sobivust ning valida parim variant taristu väljaehitamiseks. Lisaks eelpool väljatoodule võimaldab andurite paigaldus tagasisidet süsteemi toimimisest reaajas ning laseb vastavalt olukorrale rakendada muudatusi süsteemis [29], [30].

## **2.2 Eesti kliimasse sobivad looduslähedased lahendused**

Tallinna linna strateegias aastani 2030 on eristatud 3 tüüpi elamualasid – uuselamute piirkonnad, olemasolevad väikeelamute piirkonnad ning olemasolevad korruselamute piirkonnad. Uuselamute puhul on vajalik detailplaneeringu staadiumis pakkuda sademe-, pinnase- ja pinnavee ärajuhtimise lahendusi. Protsessi pärsib materjalide puudumine, mis selgitaks arendajale võimalikke lahendusi ja kehtivaid nõudeid.

Olemasolevates elamupiirkondades on hoogu võtmas remondi- ja renoveerimistööd, mille käigus lisandub kõvakattega pindasid. Kõvakattega pindade osakaalu kasv vähendab sademevee kokkuvooluaega kanalisatsiooni ning suurendab maksimaalseid vooluhulki. See omakorda ammendab olemasolevate sademeveetorustike vastuvõtuvõime ning oleks vaja ehitada suurema läbimõõduka torustikke [13].

Eesti kliimasse sobivad lahendused on koondatud teatmikusse, mis on valminud projekti „Jätkusuutlike ja kliima muutustele vastupidavate linnaliste sademeveesüsteemide arendamine omavalitsustes – LIFE UrbanStorm“ raames [31]. Teatmik liigitab looduslähedaseid lahendusi nende põhifunktsioonide järgi – esmane käitlemine tekkeallika juures, viibeaja suurendamine, sademevee saastest puhastamine. Efektiivseks sademeveekäitluseks saab kasutada ka enimlevinuid seadmeid, nagu liivafiltrid, püüdurid ja torustik [10].

Uuringu andmetel on Eesti sademevee süsteemide suurimaks probleemiks setted, seega tasub eelistada lahendusi, mis eemaldavad heljumi sademeveest. Avaveeliste tehismärgalale sobiva koha leidmiseks on Tartu Ülikooli ökoloogia ja maateaduste instituudi geograafia osakonnas välja töötatud GIS-il põhinev metoodika, mille järgi saab hinnata maastiku potentsiaali avaveelise tehismärgala rajamiseks. Metoodika

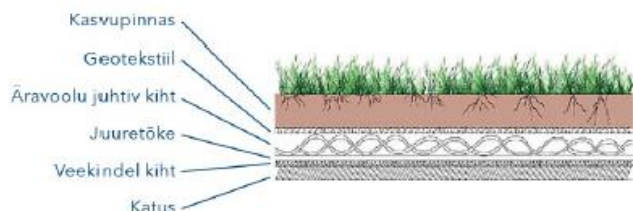
kohaselt on ainult 25% Eesti riigi pindalast sobiv märgala rajamiseks. Metoodika jätab välja tehismärgaladeks ebasobivad alad nagu kaitsealad ja asustusega kaetud alad, seega tehismärgaladeks ei saa kavandada linnakeskkonda [32].

### 2.2.1 Lahendused tekkeallika juures

Esmase käitlemise lahendused on efektiivsed kergemate sademete puhul (5-10 mm), suuremate sademete puhul täidavad pigem viibeaja pikendamise eesmärgi [33].

#### Rohekatus, haljaskatus

Rohekatus on katusekonstruktsioon, mis on osaliselt või täielikult kaetud taimkattega. Edasi jagunevad rohekatused kasvupinnase kihi järgi intensiivseteks (20-60 cm) ja ekstensiivseteks (5-15 cm) katusteks.

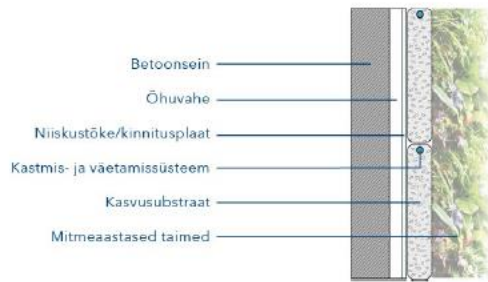


Joonis 5 Rohekatuse ristlõige [10]

Selline lahendus on efektiivne tiheasustus aladel, kuna ei vaja täiendavalt maad ning on võimalik kasutada täiendava aia ja/või puhkealana. Lisaks, parandab linnaruumi esteetilist poolt ning vähendab soojussaare efekti tänavatel. Hoone halduse poolest on ka väiksem energiakulu kütmisel ja jahutamisel [10] [34]. Talvistel oludel peab ette nägema muu sademevee äravoolu viisi juhul, kui pinnasekiht on jäätunud.

#### Rohesein, haljassein, vertikaalhaljastus

Rohesein on taimedega kaetud tarind, kus taimede kasvuks on sein konstruktsioonile paigaldatud väikesed konteinerid või kasvualad.



Joonis 6 Roheseina ristlõige [10]

Mitmed uuringud tõestavad ka taimkatte efektiivsust keskkonna jahutusel. 850 m<sup>2</sup> roheseina jahutusefekt kuunal päeval on võrdväärne üle 80 jahutusseadme tulemusel 8 tunni jooksul ning toodab piisavalt hapnikku 40 inimese jaoks päevas. [34]

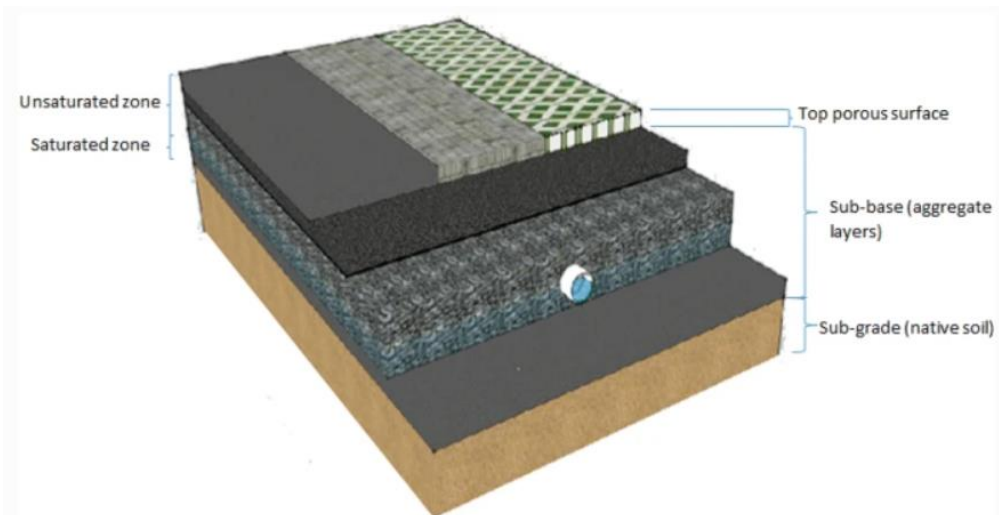
### **Sademevee kogumine ja kasutamine**

Sademevee kogumismahutit on mõistlik kasutada piirkondades, kus selle ärajuhtimine on piiratud või maksustatud ja kus on vajadus kokku kogutava vee kasutamiseks (nt. kastmiseks, WC-loputuspaak). Eelistan tuuakse välja trassivee kokkuhoidu, kuid võib tekkida vajadus lisaseadmete nagu pumpade ja filtrite.

## **2.2.2 Viibeaega pikendavad lahendused**

### **Vett läbilaskvad katendid**

Ssuure veejuhtivusega katendid võimaldavad sademeveel nõrguda endast läbi pinnasesse või võimaldab koguda vett drenaazisüsteemi ja juhitda ära. Vett läbilaskev pinnakate alandab sademevee äravooluhulka, vähendades teiste sademevee infrastruktuuri elementide kasutamise vajadust. Selliseid katendeid saab kasutada kergliiklusteedes ja parklates. Kõige levinumad katendid on sillutiskivid ja/või murukivid. Eesti kliimas peab arvestama asjaoluga, et kevad-talvisel perioodil temperatuuride kõikumisest tingitud pinna sulamine ja jäätumine võib lõhkuda poorseid katendeid.



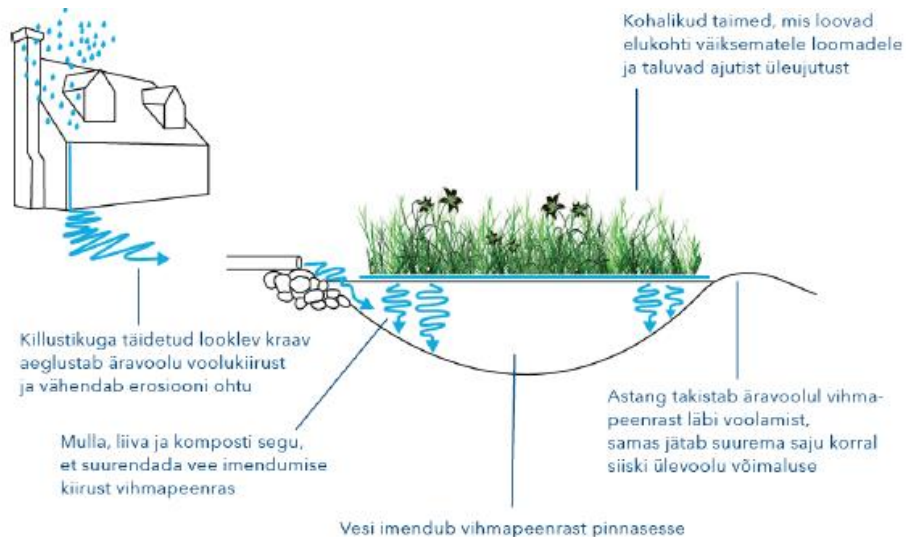
Joonis 7 Vett läbilaskva katendi lõike näide [35]

### Vihmapienar

Vihmapienrad on haljastatud süvendid, mis peavad kinni ja puhastavad vee saastest taimede abil. Nii kasvukastides kui ka vihmapienrates on soovitatav kasutada kohalikke taimeliike, mis taluvad ajutist üleujutust. Selliseid haljasalaseid on võimalik rakendada ka väiksematel aladel linnaruumis, näiteks tänavakurvidel või kiiruse aeglustajana sõiduteel.



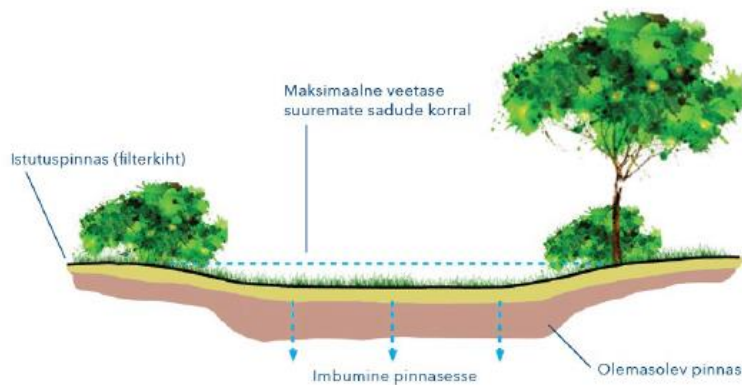
Joonis 8 Vihmapienar tänaval [36]



Joonis 9 Vihmaiaia tööpõhimõte [10]

## Viibetiik

Haljastatud reljeefi madalam ala, mis on enamuse ajast kuiv (kuivtiik) ning täitub veega tugevate vihmasadude ning nende järel. Toimub imbumine pinnasesse ning aurustumine veepinnalt ja taimedelt. Tiik on kasutatav kuivana näiteks puhkealana.



Joonis 10 Viibetiigi ristlõige [10]

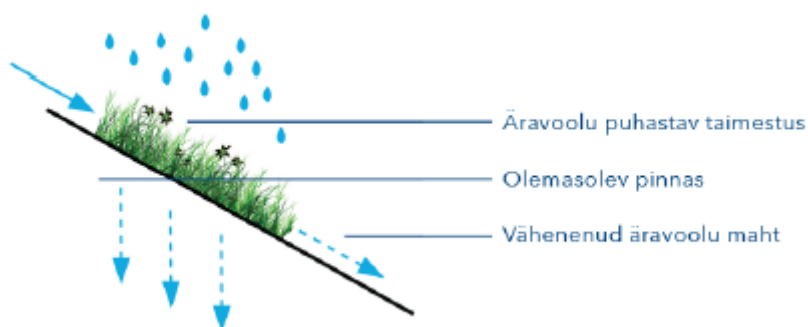
## 2.2.3 Saastest puhastavad lahendused

### Täisdreen

Täisdreen on poorse materjaliga täidetud süvend, mille alumises osas asub dreanaažitoru. Võimaldab sademevett filtreerida, töötab ajutise mahutina, kuid tasub. Täisdreeni tasub juhtida eelpuhastatud, näiteks puhverriba või settemahuti läbinud vee juhtimist.

## Puhverriba, haljasriba

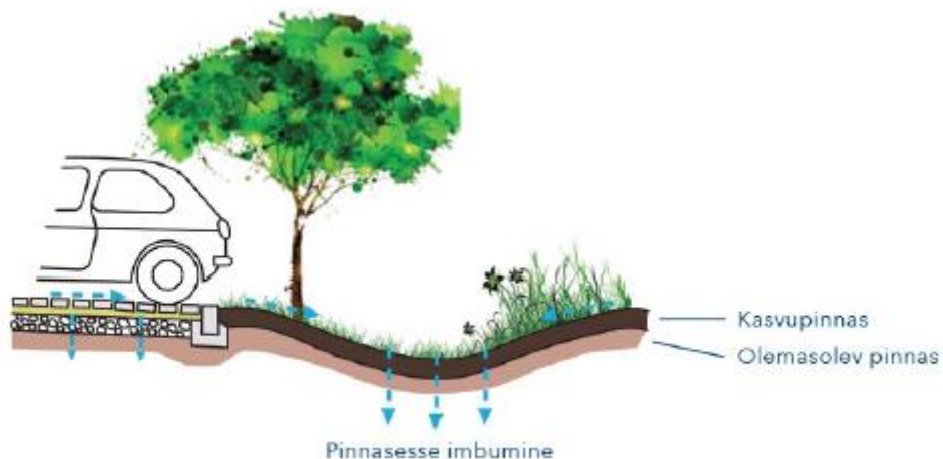
Üle 2,5m laiune kaldega haljasala, mis immutab sademevett, vähendab kokkuvooluaega ning puhastab vee saastest.



Joonis 11 Haljasriba tööpõhimõte [10]

## Viibekraav, nõva

Madal haljasala sademeeve kogumiseks ja immutamiseks. Koosneb erinevatest filterkihtidest. Sobivad kergliiklus- ja sõiduteede ning parklate kuivendamiseks. Lauged nõlvad vähendavad vee voolukiirust ja ühtlustavad selle äravoolu.



Joonis 12 Nõva ristlõige vee liikumissuundadega [10]

## Tiik

Alalise veetäitega veekogu või liigniiske ala. Võib olla nii tehisk kui looduslik. Tiigid aitavad maandada üleujutusohtu, puhastavad vett, rikastavad linnaruumi ja toetavad elurikkust.

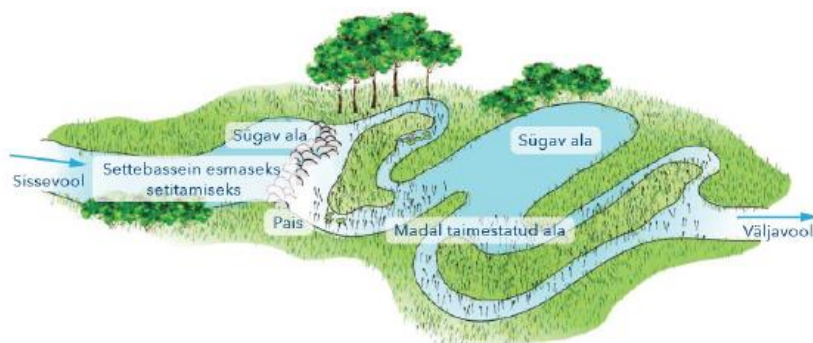
## Tehismärgala

Tehismärgalad on kunstlikult loodud märgala-ökosüsteemid sademevee (ja ka reovee) puhastamiseks. Tehismärgala peab säästlikus sademeveesüsteemis olema alati viimane element, vastasel juhul on suureks ohuks märgala liigne mudastumine. Märgalad eemaldavad sademeveest setteid, raskmetalle ja lahustunud toitaineid. Lisaks vee puhastamisele on need ka atraktiivsed maastikuelemendid.

Tehismärgalaid on kahte tüüpi:

Avaveeline tehismärgala – madal veetaimedega (nt pilliroog, hundinui) täidetud tiik, mis sobib vähem saastunud sademevee puhastamiseks näiteks elamupiirkondades.

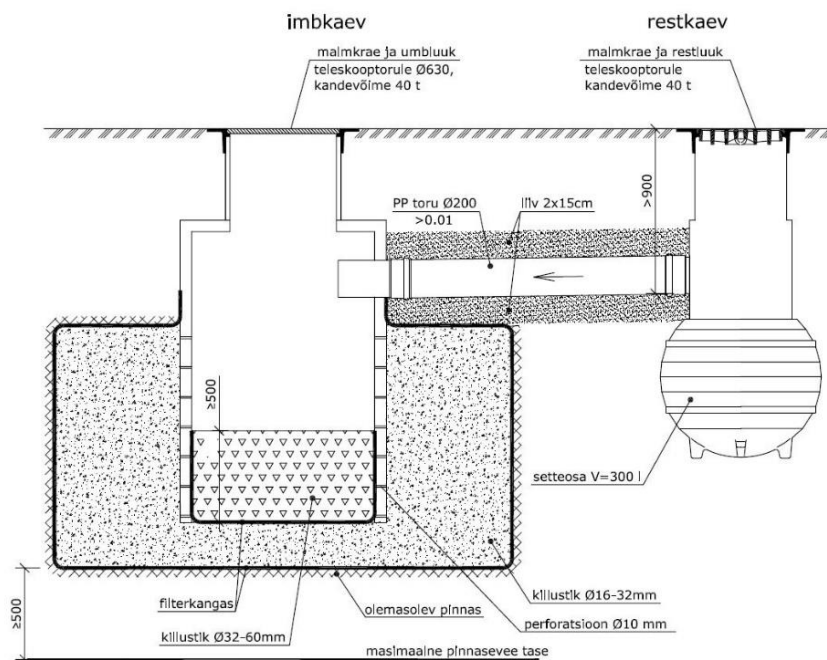
Taimestik-pinnasfilter – ca 1 meetri sügavune vettapidava kihiga eraldatud ja filtermaterjaliga (järe liiv, killustik vms) täidetud süvend, kus kasvab harilik pilliroog.



Joonis 13 Märgala [10]

## Imbkaev

Imbkaev on vett läbilaskva materjaliga (nt killustik või immutusplokk) täidetud maa-alune mahuti, kuhu sademevesi kogutakse ning läbi mille lastakse sel pinnasesse imbuda. Imbkaeve rakendades puhastatakse äravoolavat vett ning taastoodetakse põhjavett. Imbkaeve saab kasutada üldkasutatavatel aladel nagu mänguväljakud, puhkealad, samuti ka parklate all või teeservades.



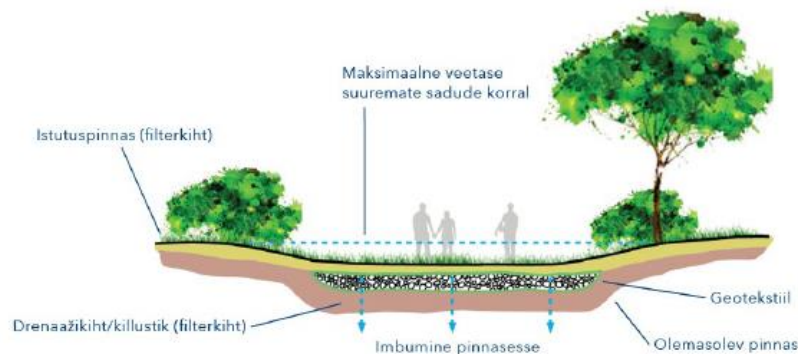
Joonis 14 Imbkaevu põhimõtteline skeem [37]

### Imbkraav

Imbkraav on kaevikulaadne kruusa või muu läbilaskva materjaliga täidetud süvend, mida kasutatakse ajutise sademeveepuhvrina ning mille kaudu immutatakse vett pinnasesse. Vajadusel paigaldatakse kraavi ka drenaažitoru. Töövõime tagamiseks vajab regulaarset hooldust, et vältida ummistumist.

### Imbväljak

Imbväljak ehk immutusala kasutatakse sademevee pinnasesse immutamiseks ning vee puhastamiseks. Võimalusel tasub imbväljakule rajada ülevool liigvee ärajuhtimiseks järgnevasse süsteemi komponenti.



Joonis 15 Imbväljak [10]



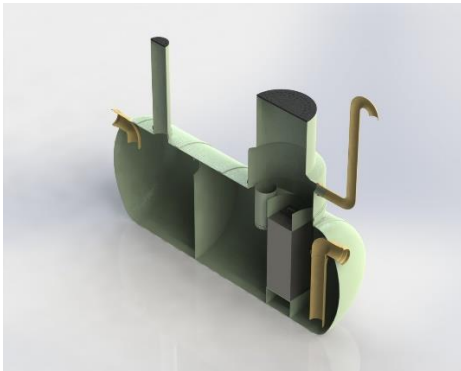
## 2.2.4 Standardised lahendused

### Liivafilter

Liivafilter on puhastusseade, milles filtermaterjaline kasutatakse liiva. Liivafilter võimaldab kõrvaldada vees sisalduvad erinevad setted ja heljumi ning vähendada vee hägusust.

### Liiva-muda- ja õlipüüdur

Liiva-mudapüüdurid eraldavad sisenevast veest liiva ja muda. Õlipüüdurid on ette nähtud õliprodukte sisaldava reovee ja sademevee puhastamiseks parklates, sõiduteedel ning sarnastes tekkekohtades.



Joonis 16 I-klassi õli- ja liivapüüdur [38]

### Torustik

Torustikuga suunatakse kogutud vesi kaevudesse või eesvoolu. Torustiku kasutamise eelisteks on lihtsad arvutusmeetodid, kuid vastavalt uutele standarditele peab arvestama ka kasvavat vooluhulka, mis muudab torustiku läbimõõtu ja vajalikku puhvermahtu suuremaks.



Joonis 17 Sademevee torustik [39] (Allikas: Pipelife)

## 2.2.5 Maatriks hinnangutega

Esialgse loodislähedase lahenduse valikuks on loodud maatriks (vt. Tael 1). Maatriks koondab Eestisse sobivaid lahendusi ja toob välja eeliseid ja põhiomadusi. Maatriks on täiendatud peatükis 3 kirjeldatud metoodika levendusmeetmete jaotusega.

Maatriksi legend:

Kõrge võimekus, põhiomadus	•
Võimalusi on, sõltub kujundusest	○
kord aastas	a
kord kuus	k
vastavalt vajadusele	v
2 korda aastas	2k-a
kord viie aasta	5a
kvartal	kv

Eelvol	Sademeveelahendus	Ruumivajadus	Hooldusvajadus		Sobivus erinevate funktsioonide jaoks käitlusahelas			Eelised										Sotsiaalne ja keskkondlik kasu
			Süsteem tervikuna	Sette eemaldamine/korrastamine	Tekkeallika lahendus	Asukohta lahendus	Piirkonna lahendus	Tippetke äravool alalt	Äravoolu maht		Vooluhulga kontroll		Infiltratsioon	Sademevee kogumine	Vee kvaliteedi prandamine	Meeldivus		
									Väiksem vihmajärg	Suur vihmajärg	Edasitoimetamine	Viivitamine						
Immutamine	Kombineeritud	Imbkraav	V/K	k	2k-a	•	•		•	•		o	•	•		•		
		Imbkaev	V	k	5a	•			•	•	o			•		o		
		Tiik	S	k/2k-a	k/v		•	•	•				•	o	•	•	•	•
		Märgala	S	k/2k-a	k/v		•	•	•				•	o	•	•	•	•
	Veekogu	Viibetiik	V/K	k	v	•	•		•	•	•		•	•		•	•	•
		Puhverriba	V/K	k/2k-a	k/v	•				•		o	o	o		•	o	o
		Nõva	K	k/2k-a	k/v	•	•		•	•		•	•	o			o	o
		Imbväljak	S	a	k		•	•	•	•	•	•	•	•		•	o	o
Lahkvooline	Vihmapiin/Kasvukast	V/K	v	v	•	•		•	•			•	•		o	•	•	
	Täidisreen	V/K	2k-a	k	•	o		•	o		•	•			•			
	Standardsed lahendused	Vett läbilaskvad katendid	V	v	v	•	o		•	•	•		•	•	o	•	o	o
		Liivafilter	V	a	k/v		•	o								•		
		Püüdurid	V	a	kv											•		
		Sademeveetorustik	V	kv	k/v		•					•	•					

Tabel 1 Eestise sobivate looduslähedaste lahenduste maatriks. Mugandatud allikatest [25] [10]

## **2.2.6 Olemasolevad lahendused ja miks need ei tööta**

### **Olemasolevad süsteemid**

Olemasolevad sademeveesüsteemid on ülesehitatud kasutades aegunud arvutusmudeleid ja -andmeid, seega torustikud ei ole projekteeritud vastu võtma tänapäeva sademeid. Süsteemid on ülesehitatud staatiliselt, kuigi protsess on dünaamiline algusest lõpuni. Muutuvad sademeveekogused ja sademete mustrid koormavad torustikke üle ning tekitavad uputusi [40].

Põhjused, miks olemasolevad süsteemid ei toimi, võivad olla tingitud ka projekteerimis- või paigaldusvigadest – väljaehitatud torustik või kraavisüsteem ei sobi ala vertikaalplaneeringuga. Kõrguste vahe tõttu võib vee voolusuund olla vertikaali suunale vastupidi. Süsteemi ärajuhtimisvõimet vähendab ka süsteemi seisukord - ummistunud või kinnikasvanud süsteemiosad võivad tekitada uputusi. Veel ühe põhjusena saab välja tuua kinnistuomanike isetegevust, kus likvideeritakse truupe ja kraave alternatiivset lahendust rajamata [41].

### **Arendajad, omanikud, omavalitsus**

Arendajatel ja maaomanikel puudub huvi ja motivatsioon vee viibeaja suurendamiseks ja tekkepõhiseks käitlemiseks, kuna sademevee ärajuhtimine ja puhastamine pole Eestis suures osas maksustatud ning kanalisatsioonitorustikku juhtimine on soodne ja lihtne [24].

EVKIS ettekanne „...“ [42], toob välja, et piirkonna arendustöödel unustatakse, et vee ärajuhtimise süsteem on tervik, mille ühe ala omaduste muutmine võib põhjustada üleujutusi süsteemi teises osas. Lahendused on üksikjuhtumeid parandavad mitte terviklikud. Vett mitteläbilaskvate katendite suur osakaal on üks põhjustest, miks sademeveesüsteemid ei suuda vastu võtta suurenenuid vooluhulkasid.

### **Projekteerijad, ülikoolid**

Mitmed Eesti ülikoolid õpetavad veemajanduslikke ja ruumiloome õppekavasid, kuid just sademeveemajanduse ja SuDS-i võimaliku kasutamise seotud teemasid õpitaval erialadel (nt tsiviilehitus, vee- ja keskkonnatehnika, linnaplaneerimise ja arhitektuuri programmid) käsitletakse vähe [43]. Seega on koostöö nende ülikoolidega kohalike SuDS-spetsialistide võrgustiku suurendamisel hädavajalik, et luua tingimused, mis soodustaksid SuDS-i kasutuselevõttu.

Omavalitsuste ja arendajate arvates on sillutatud ja vett mitteläbilaskvate katendite ülalpidamine odavam kui läbilaskvate oma. Seda seisukohta ei toeta mingid elutsükli analüüsid ning looduslähedaste lahenduste lisandväärtusi (jahedam ja puhtam õhk, vee pikem kokkuvooluaeg jne) ei ole tavaliselt arvestatud alternatiivide kaalumisel. Valmisplaanide ja NBS-i tehniliste standardite puudumine muudab nende arendamise eraldi tegevuseks, mis tõstab projekti kulusid ja lükkab nende rakendamist oluliselt edasi [44].

Läbilaskvate (liivateed, sillutis, murukivi) katendite säilitamine on enim relevantne miljööväärtuslike ja muinsuskaitse all olevate objektide taastamisel. Väljakute puhul ei lisatud läbilaskvaid katendeid, vaid mitteläbilaskvate osakaal isegi suurenes 10-15% võrra (Pihkva ja Mahilou linnade analüüs) [44].

Sarnane saatus oli ka Eesti 100 raames toimunud projektis „Hea avalik ruum“ osalenud linnadel. Üks paikadest, mis projekti käigus uue ilme sai, oli Võru keskväljak. Rohelise puistuga kaetud 7000 m<sup>2</sup> platsist on alles 300 m<sup>2</sup> haljastusest. Ülejäänud pindala on kaetud sillutiskividega, mille äravoolutegur EVS 848:2021 Väliskanalisatsioonivõrk järgi, on sama mis asfalkattel (0,8) ning tundub suurem kui murukattel (0,2). Lisaks, ei paku uus väljak lisandväärtust elupaigana ning tekitab kuumasaare efekti suvel.



Joonis 18 Võru keskväljak enne (vasakul) ja pärast (paremal) uuenduskuuri

Säästvad sademeveelahendused pole veel leidnud laialdast kasutust. Üks sagemini esinenud põhjuseid selleks on teadmatus ja skeptilisus lahenduste efektiivsuses, kuna praeguste süsteemide tööpõhimõtte on selge, aga säästvate oma on mõnevõrra umbmäärasem.

Seal, kus valitsusüksuste võimekus on madal, kuna tegevusraamistik ei toeta vajalikku koostööd või üksikud osapooled ei ole koostööks valmis, muutub lünkade tekkimine vastutuses lihtsaks. Iga kaasatud asutus astub protsessi individuaalsete eesmärkidega ja

järgib enam-vähem oma tegevuskava. Kui koostöötingimused ei ole soodsad, on ühise tegevuskava saavutamine palju keerulisem. Ühiste eesmärkideta on rohetaristu projektid peaaegu kindlasti hukule määratud [45].

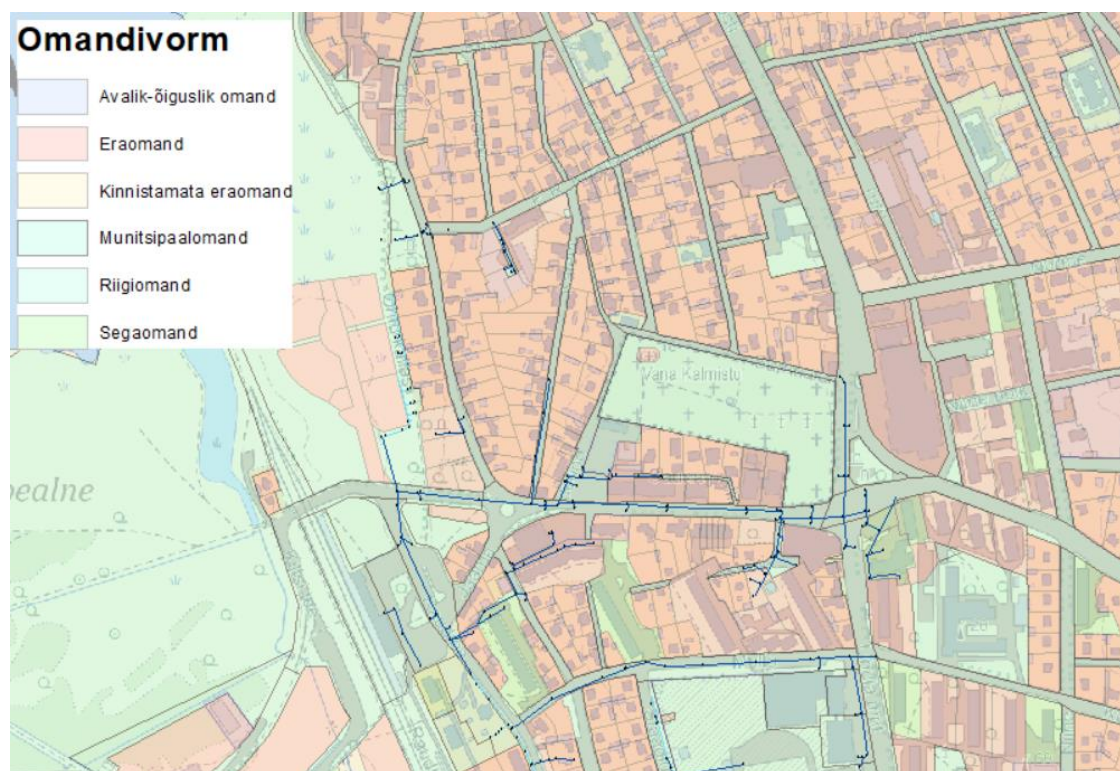
Sujuva ülemineku ja loodusläheduste süsteemide integreerimiseks olemasolevate lahendustega on vaja tõsta teadlikkust osapoolte vahel (vastutavad asutused, elanikkonnad, ehitajad, projekteerijad). Omavalitsuste tasanditel oleks võimalik toetada finantsiliselt pilootprojektide läbiviimist, mis saaksid tõestada NBS-ide efektiivsust ning tõstaksid ka teadlikkust. Pilootprojektide põhjal saab tekitada ka näidislahendused, mida edaspidises töös kasutusele võtta süsteemide ülesehitamisel või rekonstrueerimisel, nii ei peaks kohalikud projekteerijad jalgratast leiutama, vaid saaksid konkreetse lahenduse koheselt töösse panna [43].

## 3 METOODIKA

Antud peatükkis tehakse ülevaade võimalikust metoodikast, mille abil saab tõhusalt valida kõrge üleujutusriskiga aladele sobivaimaid ehituslikke ja looduslähedasi leevendusmeetmeid.

### 3.1 Üleujutusriskiga alade kaardistamine

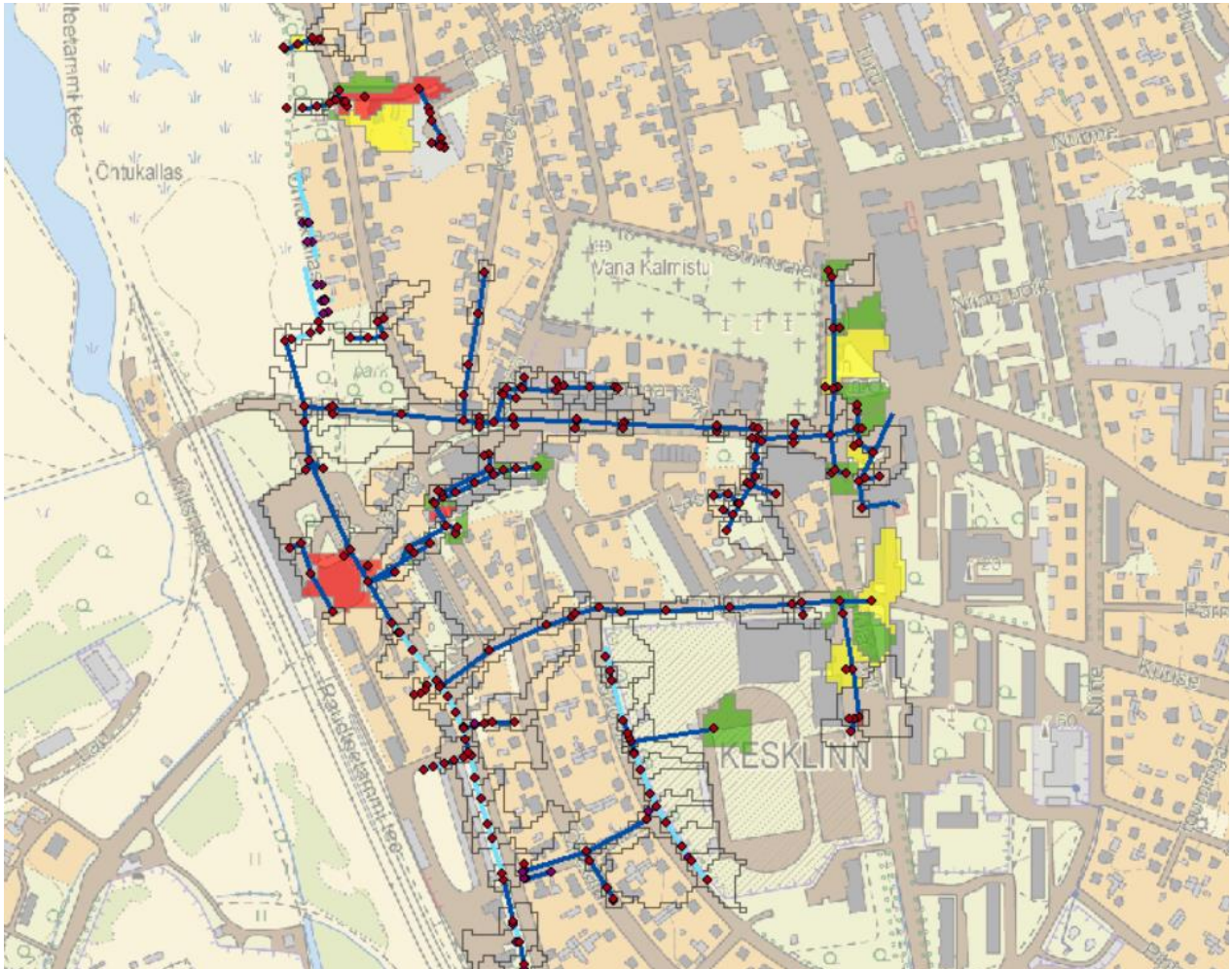
Hüdrauliline mudel koostati kasutades SWMM tarkvara. Mudel koosneb sademeveesüsteemi elementidest nagu torustik, kraavid, kaevud ja valgalad. Valgalad koostati kaevupõhiselt. Käesolev pilootala hüdrauliline mudel on seotud geoinfosüsteemi (edaspidi GIS) tarkvaras ArcMap loodud kaardiga. Kaart annab ülevaate pilootala olemusest ja koosseisust – lisatud maakasutuse ja katastriüksuste kihid. GIS andmetel põhjal on võimalik otsustada, kas valitud valgaladel või nende läheduses on eeldused looduslähedase leevendusmeetmete rakendamiseks, kuna on võimalik otsustada kinnistute omandivormi ja pindala põhjal.



Joonis 19 Pilootala katastriüksuste omandivorm

SWMM tarkvara arvutab simulatsiooni käigus üleujutuse mahu ( $m^3$ ) kaevudes (vt Lisa 1), mis kirjeldab üleujutuse mõju. Need tulemused kantakse üle GIS rakendusse uue kihina. Visualiseerimiseks on valitud „valgusfoori“ süsteem, kus:

- Punane – kõrge üleujutusriskiga ala
- Kollane – keskmise üleujutusriskiga ala
- Roheline – madala üleujutusriskiga ala



Joonis 20 Üleujutusriskiga alad. 2-Aastase korduvusega vihm

### 3.2 Üleujutuse tekkepõhjuse analüüs

Järgmise etapina on vajalik selgitada, mis on võimalikud põhjused tekkinud olukorra taga.

#### Projekteerimine, paigaldus

Vastavalt kliimaandmetele ja prognoosidele on selge, et sademeveehulgad on suurenenud ning varasematel aastatel ehitatud infrastruktuur ei ole võimeline ekstreemsetes olukordades kogunevat vett ära mahutada. Sellele viitab ka tipphetkedel täistäitel töötav torustik (vt. Joonis 26), kuigi EVS 848:2021 standardi järgi dimensioneeritakse torustik 0,8 täituvusega.



Järgmine punkt, mis võimaldab suurendab torustiku läbilaskevõimet on kalle. Minimaalne kalle tagab vee äravoolu ning aitab vältida ummistusi. Vale kaldega paigaldatud toru takistab vee liikumist planeeritud suunas.

Puuduliku projekteerimise või vigase paigalduse puhul on vajalik analüüsida, kas looduslähedased lahendused toovad soovitud efekti või probleem on siiski olemasolevas lahenduses.

### **Geoloogia ja topograafia**

Tuleb kontrollida maapinna loodusliku kallet, olemasolevaid eesvoole ja veekogusid ning selgitada, kuidas need sademeveesüsteemi toimimist mõjutavad. Liiga järsk maapinna kalle vähendab vee kokkuvooluaega, mis võib põhjustada sademeveesüsteemi ülekoormamist teatud kohtades või põhjustada ajutiste üleujutuste teket maapinnal.

### **Olemasolev infrastruktuur**

Olemasolev süsteem võib olla amortiseerunud, kraavide puhul näiteks kinnikasvanud ja hooldamata. Füüsilised takistused kraavides ja torustikes pärsivad vee äravoolu. Lekkivad torud võivad tekitada reostust.

## **3.3 Leevendusmeetme valik**

Maatriksi abil (vt. peatükk 2.2.5) on võimalik teha esialgne valik, arvestades piirkonna geoloogiat ning muid parameetreid.

### **3.3.1 Looduslähedaste meetmete rakendamise võimalikus**

Olenevalt üleujutuse tekitanud teguritest peab valima sobiva meetme selle lahendamiseks. Juhul kui üleujutus on tingitud projekteerimise või paigalduse vea tagajärjel, peab eelkõige lahendama tekkinud vea, muul juhul ei pruugi SuDS-ide rakendamisest kasu olla.

Looduslähedaste meetmete valiku puhul peab arvestama:

- Ala geoloogilise ehituse ja topograafiaga;
- Olemasoleva sademeveesüsteemiga;
- Ala otstarbe ja omandivormiga.

### **Geoloogia ja topograafia**

Mitmete looduslähedaste lahenduste tööpõhimõtte on vee immutamine või ajutine mahutamine, mille efektiivsus oleneb ala geoloogilisest ehitusest. Geoloogiliste andmete põhjal saab määrata lahenduse rakendamise võimalikkuse ja ulatuse.

Immutamise võimalikust määrab eelkõige põhjavee tase, mille kõrgus võib piirkonniti erineda. Põhjavee tase määrab, mis sügavusel on võimalik lahendusi rajada ning pinnase

vee vastuvõtmise mahtu. Vee immutamise kiirust mõjutavad pinnase tüüp ja veejuhtivus ehk filtratsioonimoodul  $K$ , mis näitab vee liikumise kiirust pinnases (cm/s). Immutamiseks on sobiv pinnas, mille infiltratsioonimoodul on suurem kui 0,0001 cm/s. Sobiva mooduliga pinnasetäited on näiteks liiv ( $K=0,005$  cm/s) ja kruus ( $K=1,0$  cm/s).

Maapinna looduslik kalle ja olemasolevad eesvoolud viitavad ka võimalikele kohtadele, kus saab rakendada looduslähedasi lahendusi – madalamates paikades, kuhu sadevesi kokku voolab saab rajada viiberajatis [25].

### **Olemasolev sademeveesüsteem**

Sademeveesüsteemi hüdraulilise mudeli abil saab määrata, mis süsteemi osad on võimelised vastu võtma suurenevaid sademevee koguseid ning millised osad vajavad ümberkorraldamist ja uuendamist.

Sademeveesüsteemi maa-aluse osa laiendamisel ei pruugi olla ruumi muude trasside juures. Sügavamale majanduslikult otstarbekas lahendus. Kõvakattega tänavad, kust koguneb valdav osa linna sademeveest, on võimalik lahendada puhverribadega, mis aeglustaksid vee kokkuvoolu ja vähendaksid tippvooluhulkasid.

### **Ala otstarbe ja omandivorm**

Looduslähedaste meetmete rakendamisel on oluline arvestada keskkonnaga, kuhu neid planeeritakse. Linnaruumis esineb alasid, mis on sobivad omandivormi poolest (riigi-, munitsipaalomand), kuid otstarbe ei luba alal muudatusi teha (näiteks muinsuskaitse alused objektid, kalmistud).

Suurt pindala hõivavad looduslähedased lahendused nagu viibetiigid ja vihmaaiad on mõistlik luua aladele, kus nad rikastaksid keskkonda ning pakuksid lisandväärtust. Tühermaast saaks luua pargi veekoguga, mis oleks ka elupaigaks erinevatele liikidele. Parklates on võimalik korraldada „kontrollitud üleujutus“, mis tähendaks parkla pinnal vee kogumist lubatud tasemeni (ei sega jalakäijate ega autode liikumist) kuni saab vee sademeveesüsteemi suunata. Sellist lahendust ei saa rakendada tänavatel ja teedel, kus liikumine on intensiivsem. Sama kehtib ka pargi alade kohta, mis on eelkõige kasutusel hea ilmaga.

#### **3.3.2 Looduslähedaste meetmete sisu**

Looduslähedused meetmed on jaotatud peatükis 2 järgnevalt:

- Lahendused tekkeallika juures
- Viibeaega pikendavad lahendused
- Saastest puhastavad lahendused
- Standardsed lahendused

Linnaruumi sademeveest põhjustatud üleujutust leevendavad eelkõige viibeaega pikendavad lahendused ning standardsed lahendused. Tegelikuses ei ole võimalik ühte meetodid eraldi kasutada, seega on võimalik kombineerida SuDS-id traditsiooniliste lahendustega.

### **Lahendused tekkeallika juures**

Käesolevas töös sellele meetmele ei panustata, kuna rohekatuste rajamine olemasolevatele hoonete ei too suurt efekti üksikute hoonete puhul ning terve linna katuste katmine ei tundu realistlik.

### **Viibeaega pikendavad lahendused**

Viibeaega pikendavad lahendused sobivad tiheasustusaladele, kus ruumi kasutus peab olema võimalikult funktsionaalne. Vett läbilaskev katend sobib parklatesse, eluhoonete vahelisele alale ja kergliiklustena – nii säilib infrastruktuuri esialgne funktsioon. Kasvukasti või vihmapeenraga saab korraldada tänavaliiklust.

### **Saastest puhastavad lahendused**

Saastest puhastavad lahendused koondavad lahendusi, mis oma tehnilise lahenduse poolest soodustavad sademevee pinnasesse immutamist. Need variandid on võimalik kasutada eelpuhastina või vee ärajuhtimiseks.

### **Standardsed lahendused**

Standardse lahenduste alla koonduvad traditsioonilised sademeveesüsteemi osad nagu kaevud, torustik ja puhastusseadmed. Traditsioonilise lahendusi saab kombineerida looduslähedaste lahendustega optimaalse linna sademeveesüsteemi loomiseks.

#### **3.3.3 Sademevee kanalisatsiooni eesvool**

Olenevalt ala iseloomust, tehnilistest tingimustest ja omavalitsuste arengukavast peab lähtuma ka sademevee kanalisatsiooni eesvoolu. Kanalisatsiooni eesvool määrab ka eelpuhastuse vajadust.

#### **Piirkonnas on lahkvoolne kanalisatsioon**

Lahkvoolse süsteemi olemasolu puhul on võimalik osa sademeveest sinna suunata. Standardne lahendus tähendab kogu sademetena pinnale langenud vee koondamise ja kanalisatsioonisüsteemi juhtimist. Looduslähedaste meetmete rakendamine vähendab otse sademevee kanalisatsiooni suunatud vee osakaalu, mille tulemusel olemasolev infrastruktuur oleks vähem ülekoormatud.

### **Piirkonnas on olemasolev veekogu**

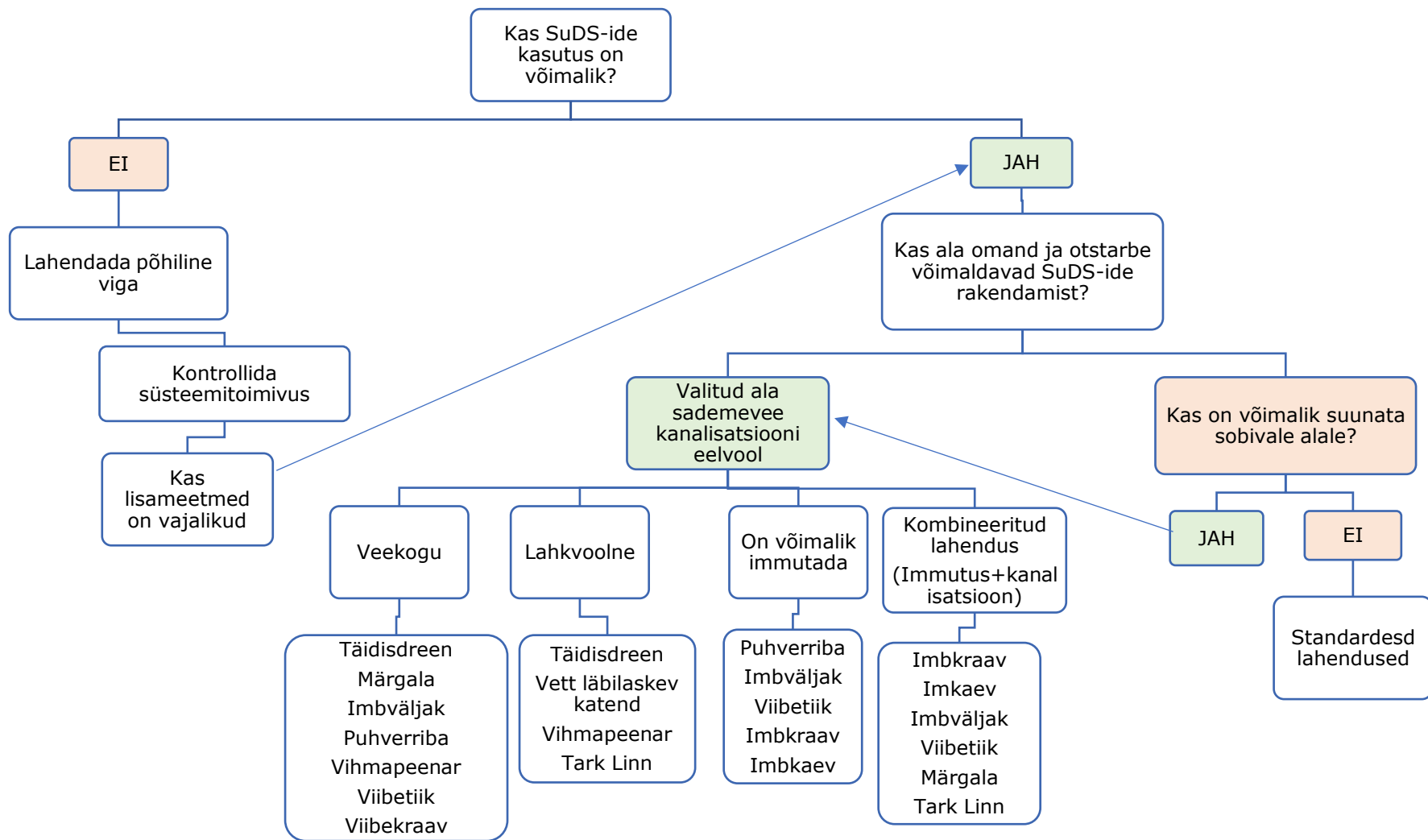
Veekogude läheduses asuvate aladelt vee kanaliseerimist võib korraldada veekogudesse, juhul kui sademevesi on läbinud eelpuhasti. Eelpuhastina toimivad hästi täidisdreen, imbväljak, puhverriba, vihmapeenar ja viibetiik, mis puhastavad sademevee saastest ja aeglustab selle voolukiirust.

### **Piirkonna geoloogia võimaldab sademevett immutada**

Mõnel juhul on võimalik vesi täielikult immutada pinnasesse või imbkaevuga teha seda järk-järgult. Olenevalt sademete hulgast ja asukohast sobivad selleks: puhverriba, imbväljak, viibetiik, imbkraav ja imbkaev.

### **Kombineeritud lahendus**

Linna kitsastes oludes võib tekkida olukordasid, kus ideaalset kohta mõne meetmete rakendamiseks ei leidu. Erinevate meetmete kombineerimisel on võimalik luua efektiivne süsteem, mis ala üleujutusrisiki tõhusalt leevendab. Alal on võimalik osaliselt sademevett immutada ja ülejäänud kanalisatsioonisüsteemi suunata.



Joonis 21 Looduslähedaste meetmete valiku metodika

## 4 METOODIKA RAKENDUS

Lõputöös on kasutatud Haapsalu linna NOAH projekti [31] pilootala sademeveesüsteemi mudelit, et kaardistada üleujutusriskiga alad, analüüsida olemasoleva süsteemi kitsaskohti ning katsetada võimalikke lahendusi probleemide ennetamiseks.

Mudel on koostatud tarkvaraga EPA SWMM 5.1 (The EPA Storm Water Management Model). Pilootala mudel koosneb süsteemi moodustavatest valgaladest, torustikest ja kraavidest ning neid ühendavatest kaevudest. Valgaladel on määratletud ka pinnakatted (kõvakatte, haljasala).

### 4.1 EPA SWMM 5.1

EPA SWMM 5.1 on Ameerika Ühendriikide keskkonakaitseagentuuri (Environmental Protection Agency ehk EPA) poolt arendatud tarkvara, mis võimaldab teostada dünaamilist simulatsiooni erinevate vihmade kohta eelkõige linnaruumis. Tarkvara arvutab vooluhulkasid ja vee kvaliteeti ning kuvab neid süsteemi valitud ajahetkel igas süsteemi osas. [46]

#### 4.1.1 Tarkvara kasutusvaldkond ja võimalused

SWMM kasutab linnapiirkondade äravoolude arvutamiseks mitmeid hüdroloogilise protsesse nagu ajas muutuvad vihmad, aurustumine, lume teke ja sulamine, infiltratsioon ja sademevee nõrgumine põhjavette, sademevee kogumine ning viivitamine erinevate looduslähedaste meetmete abil.

Alates tarkvara loomisest on SWMM-i kasutatud tuhandetes kanalisatsiooni ja sademevee uuringutes kogu maailmas. Tüüpilised rakendused on järgmised:

- Drenaažisüsteemi komponentide kavandamine ja mõõtmine üleujutuste kontrollimiseks;
- Mahutite/reservuaaride suurus ja nende lisaväärtus üleujutuste kontrollimiseks ja vee kvaliteedi kaitseks;
- Üleujutuste ja looduslike äravoolude kaardistamine;
- Ühiskanalisatsiooni ülevoolu vähendamise kontrollistrateegiate väljatöötamine;
- Sissevoolu ja infiltratsiooni mõju hindamine reoveekanaliseerimise ülevoolule;
- Hinnata reostuse levikut ja mõju. [46]

## 4.1.2 Arvutusmeetodid

### Infiltratsioon

SWMM tarkavaras on erinevaid meetodeid infiltratsiooni arvutamiseks. Antud mudelis kasutatakse Hortoni arvutusmeetodit. Hortoni meetod põhineb seaduspäral, et infiltratsioon väheneb eksponentsiaalselt esialgsest maksimummäärast miinimummäärani pikaajalise vihma kestel. Selle arvutuse jaoks on vaja teada maksimaalset ja minimaalset infiltratsiooni kiirust, koefitsienti mis väljendab infiltratsiooni kiiruse vähenemist ajas ja aega, millega veega küllastunud pinnas kuivab täielikult ära [46].

### Vooluhulk

EPA SWMM mudeltarkvara arvestab arvutustes torude vooluhulga (Q), ristlõike (A), hüdraulilise raadiuse (R) ja toru pikkuse rõhukao (S) vahel kehtivat seost.

$$\text{Darcy-Weisbachi võrrand: } Q = \sqrt{\frac{8g}{f}} AR^{1/2} S^{1/2}, \text{ kus} \quad (4.1)$$

Q – vooluhulk

g – raskuskiirendus

f – toru Darcy-Weisbachi kareduskoefitsient

R – hüdrauliline raadius

S – rõhukadu toru pikkusühikule

Hüdrauliline raadius (R) arvutatakse järgmise valemiga:

$$R = \frac{A}{P}, \text{ kus} \quad (4.2)$$

A – ristlõike pindala

P – ristlõike märgperimeeter (pikkusühikus väljendatud ristlõike osa, mis on vedelikuga kokkupuutes)

### Laine arvutusmeetod (ingl k Flow Routing)

SWMM-is on valikus statsionaarse, kinemaatilise ning dünaamilise voolu arvutamine. Antud mudel kasutab dünaamilist arvutusmeetodit, mis lahendab Saint Venant-i vooluvõrrandit ning annab teoreetilisel arvutamisel täpseima tulemuse. See meetod arvutab ka tagasivoolu torudes [46].

## 4.1.3 LID (Low Impact Development) elemendid

SWMM tarkvara võimaldab modelleerida 8 tüüpi looduslähedasi lahendusi:

- Vihmaaiad/Kasvukastid;
  - Killustikuga
  - Killustikuta
- Haljaskatused;
- Imbkraav;
- Vett läbilaskvad katendid;
- Nõva;
- Veekogumisseadmed;
- Katuselt kogutud sademevee suunamine pinnasesse (ingl k Rooftop Disconnection).

Antud mudelis käsitletakse esimest kuut võimalust. EPA SWMM võimaldab defineerida lahendusi kihtide kaupa koos nende parameetritega. Kirjeldatavad kihid on toodud Tabelis 1.

Lahendus	Pind	Pinnakate	Mullakiht	Täitekiht	Dreenaži toru	Dreenmatt
Vihmaaed	x		x	x	o	
Haljaskatus	x					x
Imbkraav	x			x	o	
Vett läbilaskvad katendid	x	x	o	x	o	
Veekogumisseadmed				x	x	

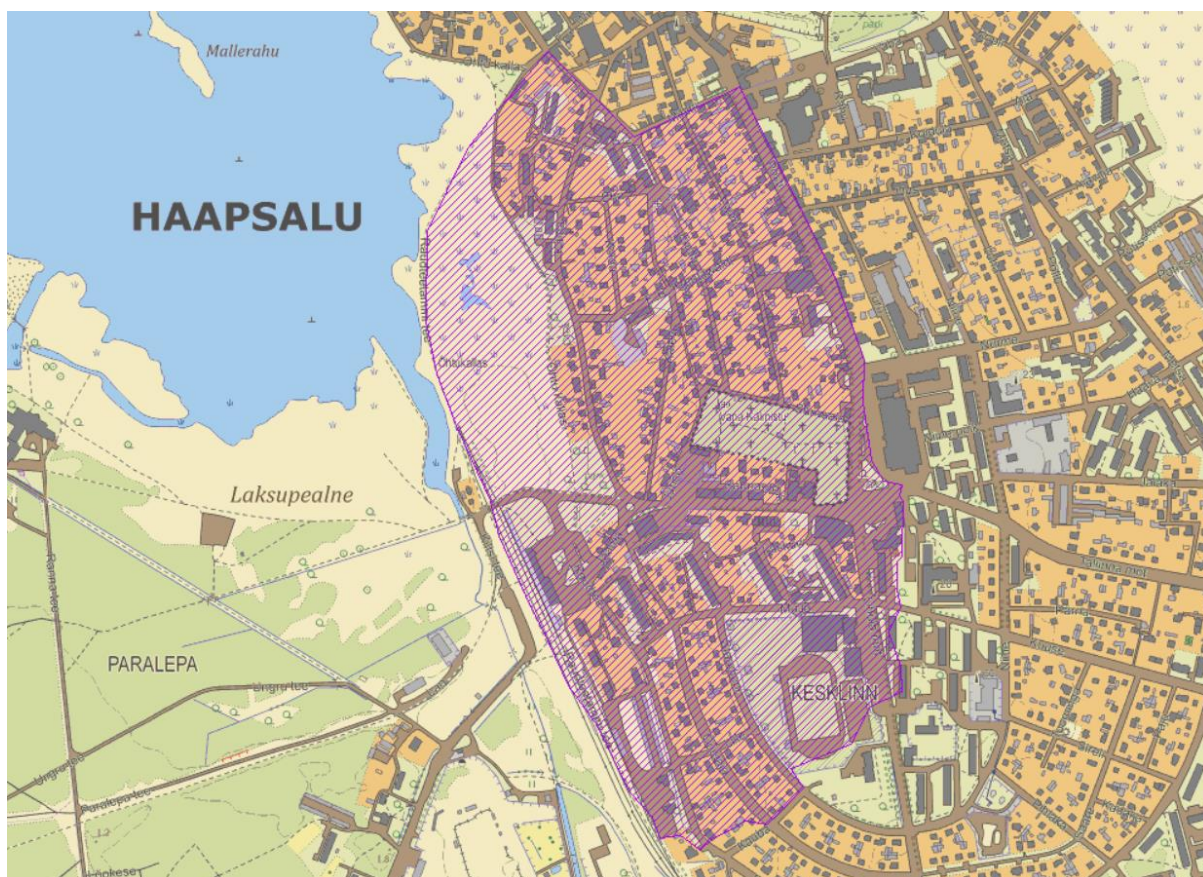
Tabel 2 Mudelis defineeritavad väärtused. X- kohustuslik, O-soovituslik [46]

## 4.2 Pilootala

Järgmine peatükk annab ülevaate pilootala põhiandmetest ja olemasolevast sademeveesüsteemist ning sellega seotud teguritest nagu ala geoloogia ja topograafia. Kaardistatakse üleujutsriskiga alad ning pakutakse sobivad lahendused üleujutuste leevendamiseks.



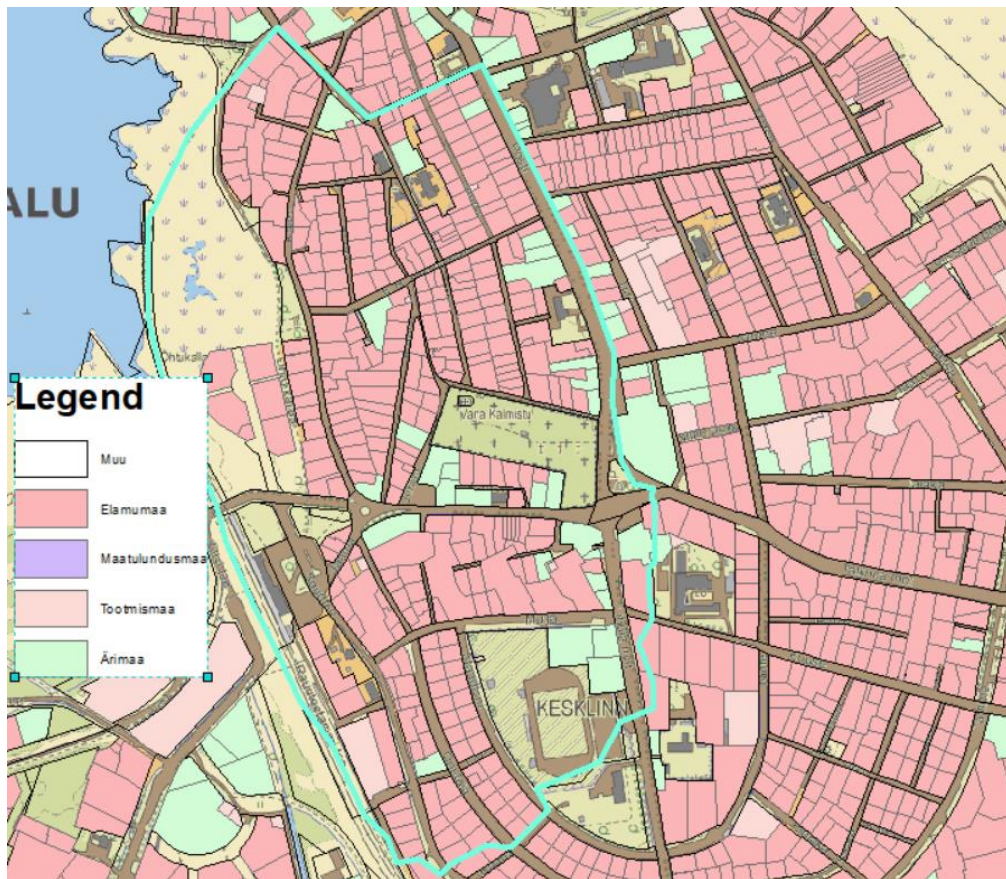
## 4.2.1 Pilootala iseloomustus



Joonis 22 Haapsalu kaart. Pilootala on viirutatud. (Autori joonis, aluskaart: Maa-amet, 2022)

Enamus Haapsalu linna sademeveetorstikke on rajatud 20-40 aastat tagasi. Kaasaegseteks võib pidada Karja-Kalda-Lahe-Wiedemanni tänava ning Jaama ja Mulla tänavate torustikku. Linnas on säilinud ka lahtisi kraave. Staadioni ja Õpetaja tn piirkonnas on endised tänavate äärsed lahtised kraavid, mis olid drenaaživee eelvooludeks, elanike poolt suletud torudesse, seejuures pole tagatud torustike nõutekohased kalded ja väljavoolud. Sellistes kohtades tekivad nii kevadel lumesulamise kui ka suvilisel sademeterikkal perioodil probleeme liigveega. Kraavide, truupide, ojade ja drenaažide regulaarne hoolduskorraldus linnas on puudulik [47].

Ala kaardistab Õhtu kaldale suubuvat valgala, mis piirdub Posti tn-Lihula mnt, Linnastaadioni ja Õhtu kaldaga. Valgala pindala on umbes 70 ha, mille piiresse jääb pea 430 katastriüksust, enamus eraomandis elamumaad. Suure osa hõivavad ka linnastaadion ja Haapsalu Vana kalmistu (vt. Joonis 23).



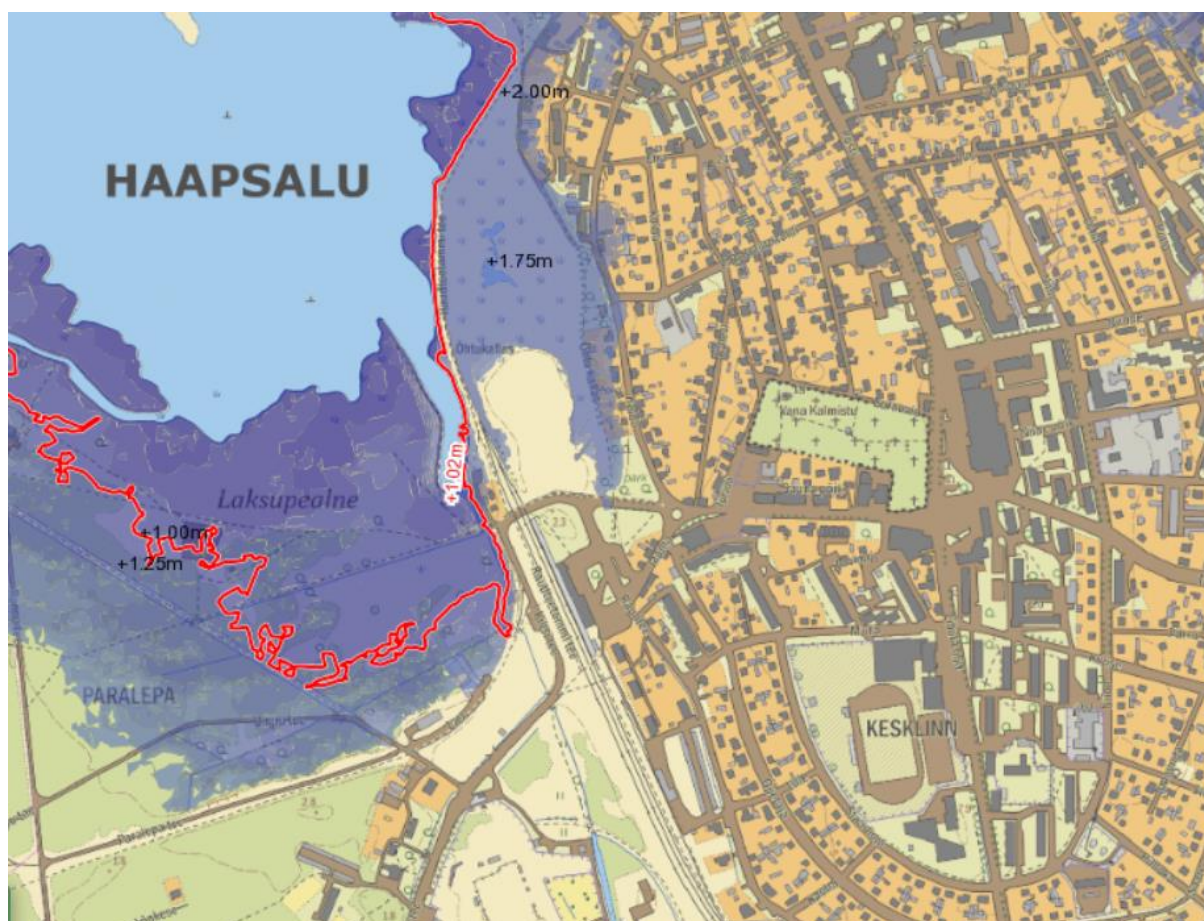
Joonis 23 Haapsalu pilootala katastriüksuste jaotus (Autori kaart, andmete allikas: Maa-amet 2022)

#### 4.2.2 Geoloogia

Haapsalu pinnakatte paksus varieerub 1 meetrist kuni 25 meetrini. Koostiselt ja genesilt on pinnakate mitmekesine. Pinnakattes esineb viimase jääaja moreeni ja erinevaid setteid. Geoloogilised tingimused on pilootala lõikes varieeruvad. Posti tn piirkonna pinnakatteks on erinevate terasuurusega liivad ja kruus, aluspõhi on 10-20 meetri sügavusel maapinnast ning pinnasevesi jääb 4-6 meetri sügavusele maapinnast. Selline pinnakate on sobilik immutamiseks, kuna veetase on piisavalt madalal ning pinnakate omadused lubavad veel imbuda – pinnaste infiltratsioonimoodul jääb vahemikku 0,005-1 cm/s (vastavalt liiv-kruus). Keerulisem olukord on rannikul, mis valdavalt koosneb savipinnastest ning liivast. Pinnaveetase on aastaringselt kõrge – 0,5-1,5 m sügavusel maapinnast. Rannikul on infiltratsioonimoodulid oluliselt väiksemad 0,00002-0,005 (vastavalt savi-liiv). [48]

Vastavalt eeltoodud andmetele, on pilootalal võimalik rakendada immutamisel põhinevaid looduslähedasi meetmeid piirkonnas, mis on rannikust võimalikult eemal. Mereäärses piirkonnas tasub pöörata tähelepanu tiigi või viibetiigi rajamisele, mis oleks kuiva ilma korral puhkealana kasutatav.

Rannalähedases vööndis esineb ajutisi üleujutusi, kuna maksimaalsed veetasemed ulatuvad 2.0 meetrini merepinnast (vt. Joonis 24). Geoloogiliste uuringute andmetel asub pinnavesi ulatuslikul alal maapinna lähedal või olenevalt reljeefist kuni 6 m sügavusel. See pinnavee horisont toitub sademetest ja on otseses hüdraulilises seoses merevee tasemega, seega veetase on merevee kõikumisest. Aastane pinnasevee taseme amplituud jääb 1.5 m piire. Pinnasevee taseme liikumise suund on analoogne reljeefi kallakusele. [47]



Joonis 24 Üleujutusala rannikul (Allikas: Maa-amet 2022)

#### 4.2.3 Pilootala mudel ja selle eesmärk

Sademeveesüsteemi hüdrauliline mudel oli loodud, et analüüsida sademevee süsteemi efektiivsust erinevates kliimastsenaariumites ning kaardistada sademeveest põhjustatud üleujutusriskiga alad. Mudeli abil saab leida ja katsetada sobivad lahendused üleujutuste vältimiseks. Käesoleva töö fookuses on looduslähedased lahendused.

Üleujutusriskiga alade kaardistamiseks on simulatsioonis kasutatud erinevaid vihmamudeleid (vt. 4.2.4 Arvutusvihmad). Eelkõige kasutati 5-aastase esinemissagedusega vihma. EVS 848:2021 Väliskanaliseerimisvõrk järgi väljendab 5-

aastane vihma kordussagedus keskmist riski sademeveest tingitud üleujutusest linnakeskustes ning ehitiste läheduses paiknevatel teedel ja väliruumides.

#### 4.2.4 Arvutusvihmad

##### EVS 848:2021 Väliskanalisatsioonivõrk

Arvutusvihmade intensiivsused olid arvatud Eesti standardi EVS 848:2021 Väliskanalisatsioonivõrk järgi [2].

Arvutusvihma intensiivsus  $q$  sõltub vihma kestusest. Seda arvutatakse valemiga:

$$q = \frac{aP^b}{t^c} \text{ (mm/h), kus} \quad (4.3)$$

$a, b, c$  – empiirilised tegurid, mis sõltuvad geograafilisest asukohast;

$t$  – arvutusvihma kestus minutites;

$P$  – arvutusvihma kordus aastates.

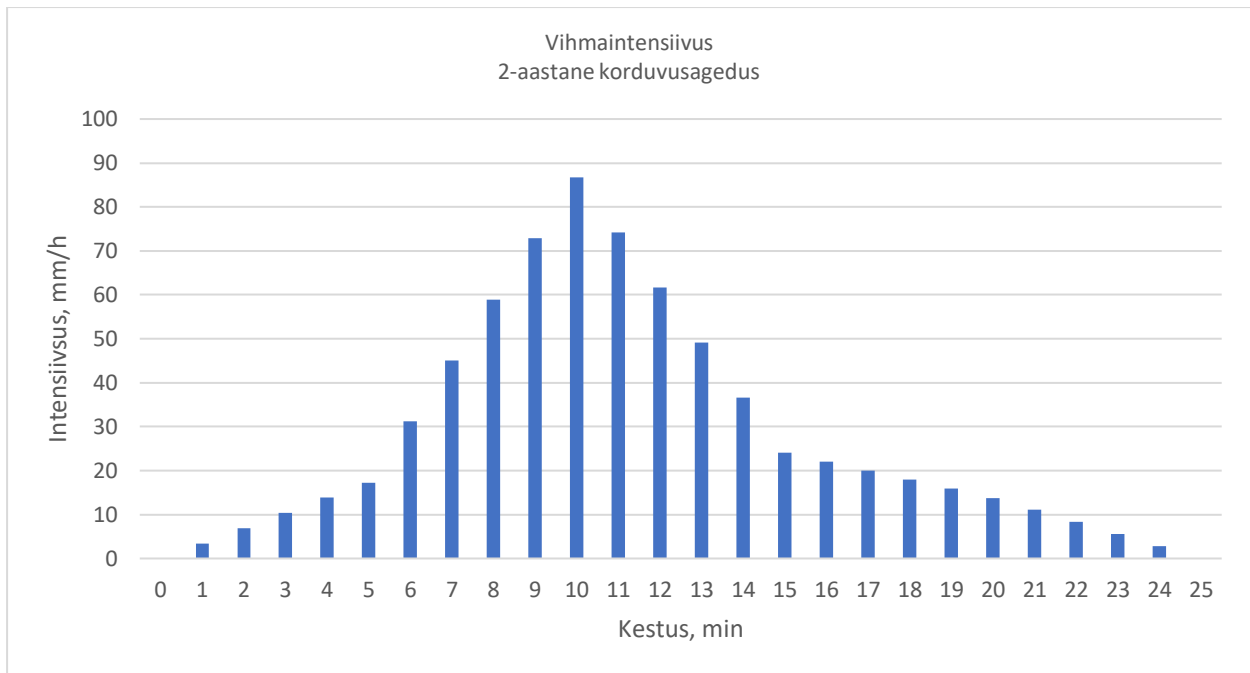
Linn	a	b	c
Haapsalu	194.8	0.331	0.645

Tabel 3 Empiirilised tegurid

Kasutatud on 20 minutilist vihma, esinemissagedusega 2, 5 ja 10 aastat. Mudeli tarbeks on koostatud hietograaf vahelduvate blokkide meetodiga (ingl k *alternating block method*) [49].

Aeg	EVS 2021		
	Vihma intensiivsus, mm/h		
min	2a korduvus	5a korduvus	10a korduvus
0	0	0	0
5	17.28	23.16	29.16
10	86.76	117.48	147.84
15	24.12	32.88	29.16
20	13.8	10.92	10.92
25	0	0	0

Tabel 4 20-minutilised arvutusvihmad



Joonis 25 2-aastase korduvusega vihma hietograaf

### Kliimastenaariumid

RCP (ingl k Representative Concentration Pathway), kirjeldab erinevaid inimtegevusest põhjustatud kasvuhoonegaaside emissioone ja kontsentratsioone. RCP4.5 ja RCP6 on mõõdukad stsenaariumid, mille puhul emissioonide tipp jääb 21. sajandi sisse ja kiirguslikud mõjud sajandi lõpuks on vastavalt 4.5 ja 6 W/m<sup>2</sup>. RCP8.5 eeldab, et kasvuhoonegaaside emissioon kasvab terve 21. sajandi vältel ja põhjustab sajandi lõpuks kiirgusliku mõju 8.5 W/m<sup>2</sup>. RCP4.5 stsenaariumi järgi on perioodil 2041–2070 aasta keskmine suhteline sademete hulk kasvab 10% võrra ja RCP8.5 põhjal 14% [4].

Kliimastenaariumitega sobivate vihmade modellemiseks kasutati EVS 848:2021 Väliskanalisatsioonivõrk järgi arvutatud väärtused ning korrutati vastavate koefitsientidega 1.25 RCP4.5 kohta ja 1.8 RCP8.5 kohta. Koefitsientide väärtused tulenevad uuringust, mis iseloomustavad lühemate korduvusagedustega vihmade intensiivsuse muutust [50].

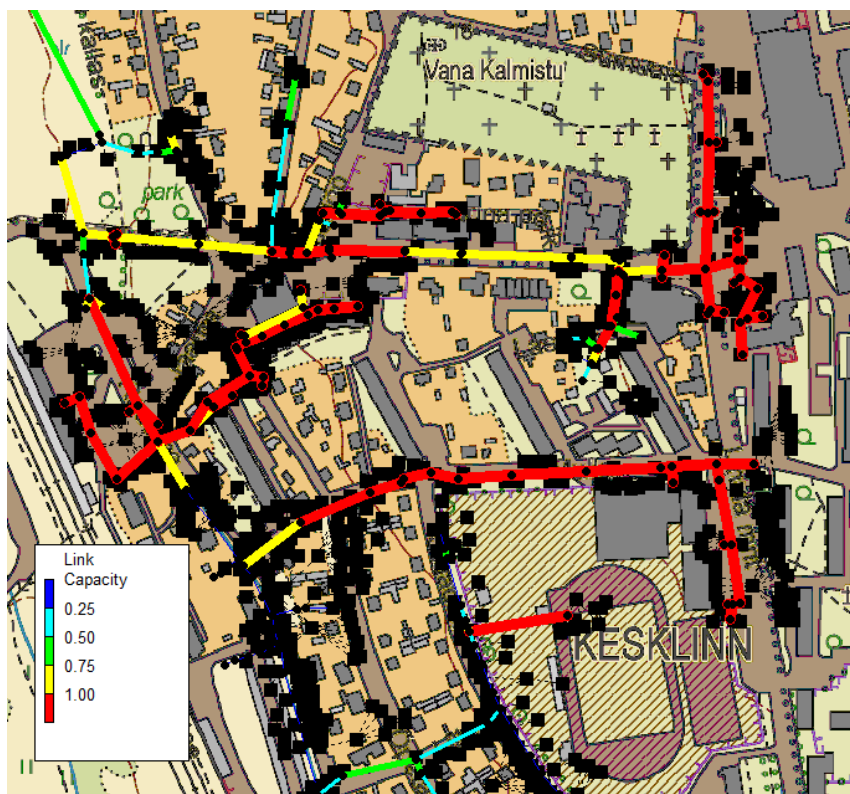
Sademeveesüsteem peab olema töövõimeline kogu elukaare vältel, mis on tavaliselt 50 aastat. Seega, tuleb sademeveesüsteeme projekteerides arvesse võtta kliimamuutuse mõju. Soovituslik on tuleviku sademeid arvestada, arvestades sademete kasvuks 4% kümnendi kohta [2].

Aeg	EVS 848:2021			Kliimastsenaarium					
	Vihma intensiivsus, mm/h			2a korduvus		5a korduvus		10a korduvus	
min	2a korduvus	5a korduvus	10a korduvus	RCP4.5, Mm/h	RCP8.5, mm/h	RCP4.5, mm/h	RCP8.5, mm/h	RCP4.5, mm/h	RCP8.5, mm/h
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	17.28	23.16	29.16	21.60	31.10	28.95	41.69	36.45	52.49
10	86.76	117.48	147.84	108.45	156.17	146.85	211.46	184.8	266.11
15	24.12	32.88	29.16	30.15	43.42	41.10	59.18	36.45	52.49
20	13.8	10.92	10.92	17.25	24.84	13.65	19.66	13.65	19.66
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabel 5 20-minutilised arvutusvihmad kliimastsenaariumitega

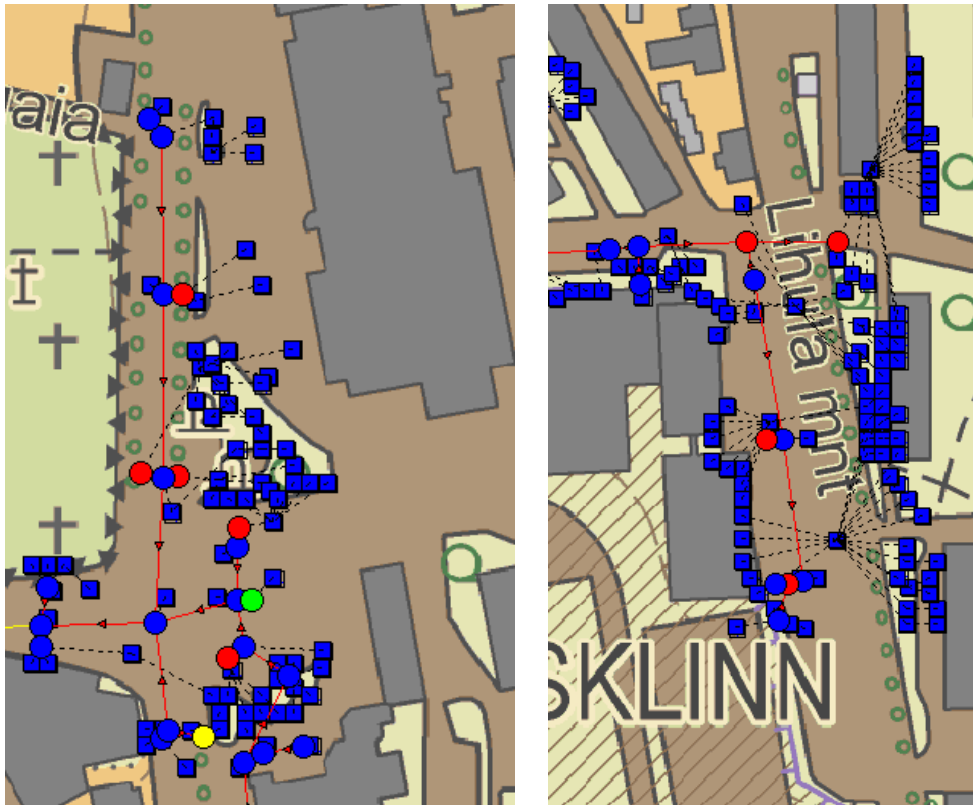
### 4.3 Pilootala murekohad

Arvutusvihmade rakendamisel näitavad mudeli arvutused, et üleujutusriskiga on linna sees alad, mis on tihedalt kaetud vett mitte läbilaskvate katenditega. Samuti on sademeveetorustik aladimensioneeritud, millele viitab torustiku ülekoormus:



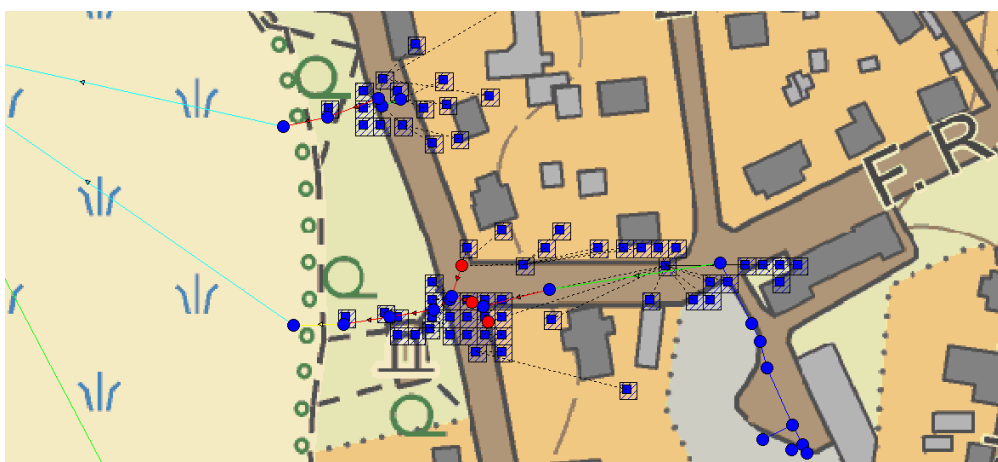
Joonis 26 Sademeveetorustiku täituvus tipphetkel. Skaala kirjeldab torustiku täidet tipphetkel.

Suurimad avalikult kasutatavad alad on parklad, need märgitakse esimese grupina – näiteks Raudteejaama parkla, Haapsalu Kaubamaja ja Staadioni parklad. Parklad on rajatud vett mitteläbilaskvatest katenditest, mis põhjustab suure äravoolu vastavatel valgaladelt.



Joonis 27 Vasakul Haapsalu kaubamaja parkla, paremal Staadioni parkla. Punased jooned tähistavad täistäitel (100%) olevaid torusid, punased täpid tähistavad üle ujutatud kaeve.

Teise grupina saab välja tuua Õhtu kalda ja F.R. Kreutzwaldi tänava piirkonda, mis jääb ka üleujutusalaselle (vt. Joonis 26). Selles pilootala osas on valdava osakaaluga eraomand, seega enamuse sademevee äravoolu lahendatakse kinnistusiseselt. Järelikult kogunevad veed on pärinevalt tänavatelt.



Joonis 28 Üleujutused

## **4.4 Võimalikud lahendused**

### **4.4.1 Parklad**

Parklate puhul on mitmeid lahendusi, mis võimaldaksid aeglustada äravoolu, immutada osa sademeest ning luua meeldiv keskkond.

#### **Vett läbilaskvad katendid**

Rajada parklad kasutades erinevaid teekatendeid. Enamus parkla pindalast moodustavad autode parkimiskohad – need alad võimalusel rajada vett läbilaskvatest katenditest (murukivi, drenasfalt), mis võimaldavad veel pinnasesse imbuda.

Parklakatendeid võrdlev magistritöö [51], toob välja, et ehitusmaksumuse, hoolduse ja keskkonnamõju poolest, on murukivist kate eelistatuim. Lisaks, ei vaja selline lahendus restkaevude süsteemi rajamist küll aga võib lisanduda vajadus drenaažisüsteemiks või ühendamiseks eelpuhastitega.

#### **Vihmaaed, -peenar, nõva**

Luu eraldusribadele haljastus, kuhu on võimalik suunata liigvesi sõiduteelt. Vihmapeenar loob kena roheline visuaali sillutatud või asfalteeritud teede vahele, mis palaval suvepäevadel aitab vähendada kuumasaare efekti. Parkla saab ka lisandväärtuse varju kujul, kui haljastuse osas valitakse kõrghaljastus.

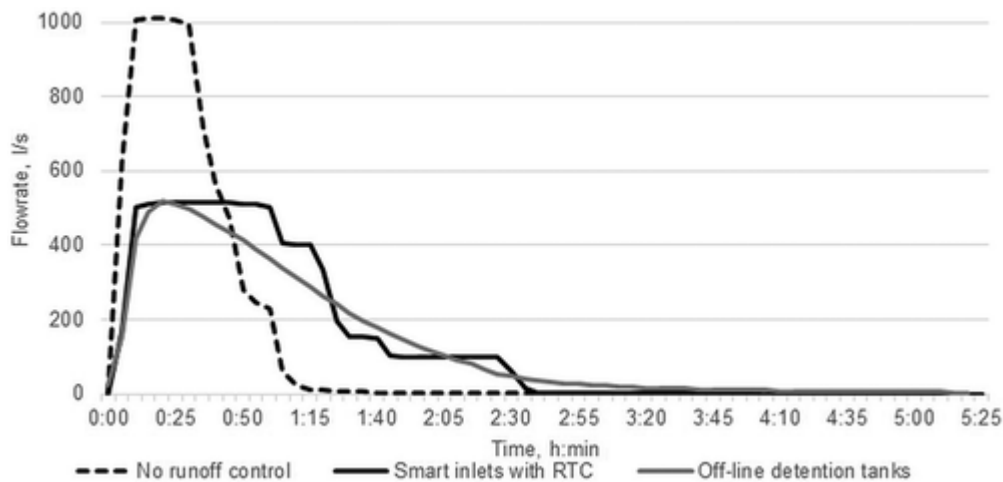
Parkla kuivendamiseks sobib hästi ka nõva, selle ülesehitus võimaldab vett nii immutada kui ka koguda ja edasi juhtida. Suurimaks eelistest võib tuua ehituskulude vähendamise, kuna kaob vajadust ulatuslikeks kaevetöödeks.

#### **Targa linna lahendused**

Parklate ülesehitus põhineb ideel, et sademevesi on vaja võimalikult kiiresti koguda ning eelvoolu kaevudesse suunata. Parkla sademeveesüsteemi tööd saab optimeerida erinevate targa linna lahendustega. Reaalajas juhitud süsteemide abil on võimalik lasta süsteemi täpselt nii palju vett, kui süsteem suudab vastu võtta.

Nutikas restkaevude lahendus reguleerib resti avade suurust, reguleerides sisenevat vooluhulka. Kaevukaant juhib algoritm, mis arvestab mitut parameetrit ja sulgeb kaevukaant vastavalt olukorrale. Nutika kaevu lahendus laseb veel ära voolata järk järgult tekitamata ülevoolamist kaevudest.





Joonis 29 Parkla äravoolu jaotus nutika kaevukaanega [52]

#### 4.4.2 Pargialad

Ühiskasutatavaid alasid on võimalik kujundada arvestades ka maastiku omapära ning võimaldab panna selle süsteemina tööle.

#### Viibetiik, viibekraavid

Võimaldab ajutiselt vett hoiustada aladel, kus immutamine pole võimalik (näiteks Ernst Enno mälestusmärgi ala), ent edaspidi võimalik suunata merre. Oluline on tagada kraavide erosioonikindlus, kui valingvihmade ajal võivad voolukiirused suuremad olla.

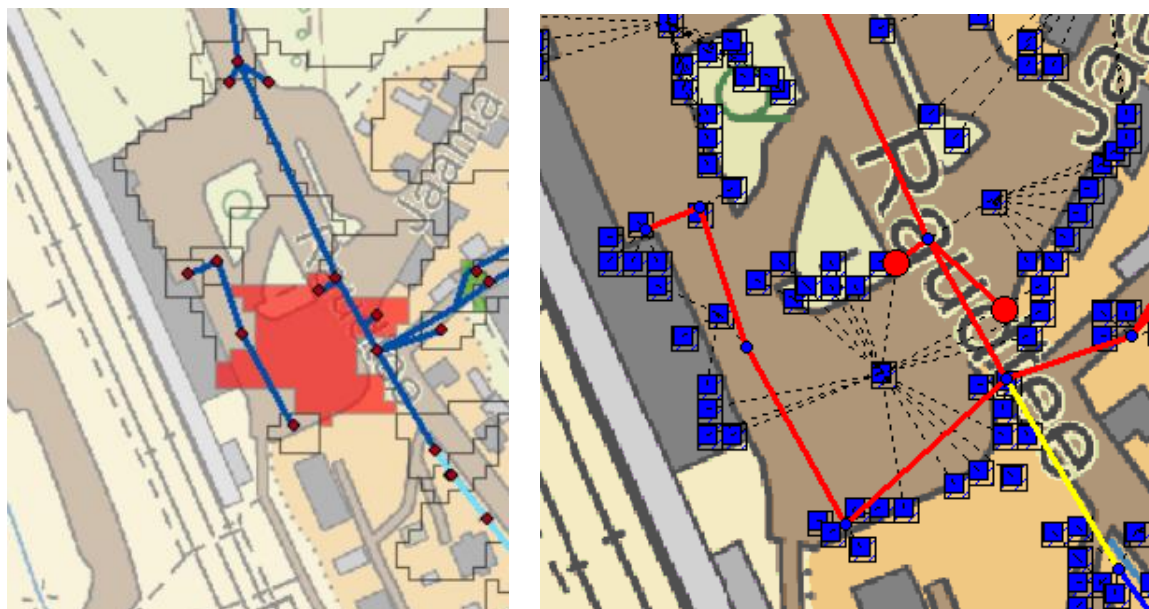
Sellise süsteemi puhul, kus on oluline maastiku lahenduse säilitamine ja hooldus, ning optimaalse vooluhulga tagamine, on mõistlik see protsess automatiseerida kontrollsüsteemi abil. Reaalajas juhitav süsteem kontrolliks viibetiiki ja -kraavidesse sisenevaid vooluhulkasid ning vajadusel käivitab ka ülevoolu tiigist. [53]

### 4.5 Metoodika rakendamine

Järgnevalt on ära toodud ülevaade võimalikest lahendustes peatükis 4.3 väljatoodud aladele. Lähenemine järgib peatükis 3 välja pakutud metoodikat. Valitud lahenduse toimivust ja efektiivsust katsetatakse pilootala mudelis. Esialgse meetme mõju analüüsi on võimalik teostada hüdraulilise mudeli abil, et hinnata esialgse probleemi lahenduse efekti ning leevendusmeetmete koosmõju süsteemile kui tervikule.

### 4.5.1 Raudteejaama parkla torustiku kalde taastamine

Ajaloolise raudteejaama ees on pea 0.6 ha suurune ala, kattest on suurem osa asfalteeritud. Ala on kasutusel parklana ja piirdub ühelt poolt jaama hoonega ning teiselt poolt Raudtee tänavaga. Ala eesvooluks on Raudtee tänaval asuv sademevee kanalisatsiooni torustik de200, mis suubub Õhtukalda märgalale.

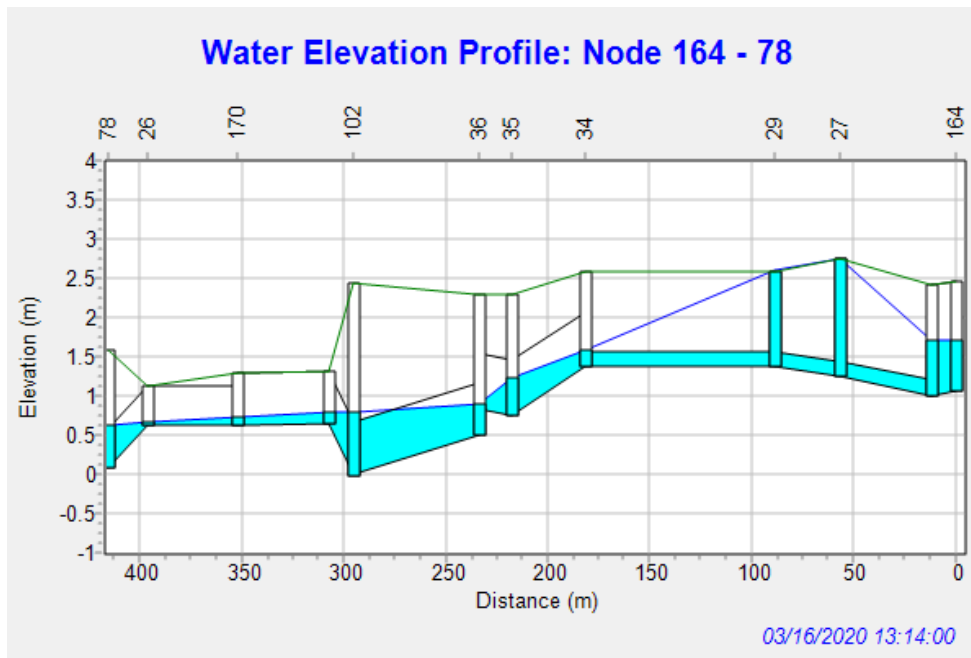


Joonis 30 Vasakul: üleujutusriskiga valgala (5a korduvusega vihm). Paremalt: uputavad kaevud (5a korduvusega vihm)

Raudtee tänava torustik on lisaks eelvooluks Õpetaja tänaval asuvate korterelamute sademeveetorustikule. Tipphetkel on liitumistorus vooluhulgaks 57 l/s. Liitumisele järgneva torustiku läbimõõt on DN200, mis vihmajärgi korral töötab enamuse ajast täistäitel – see viitab toru aladimensioneeritusele. Torulõik töötab antud vooluhulkadega (kuni 30 l/s) juhul kui oleks tagatud kalle 4-5 mm/m.

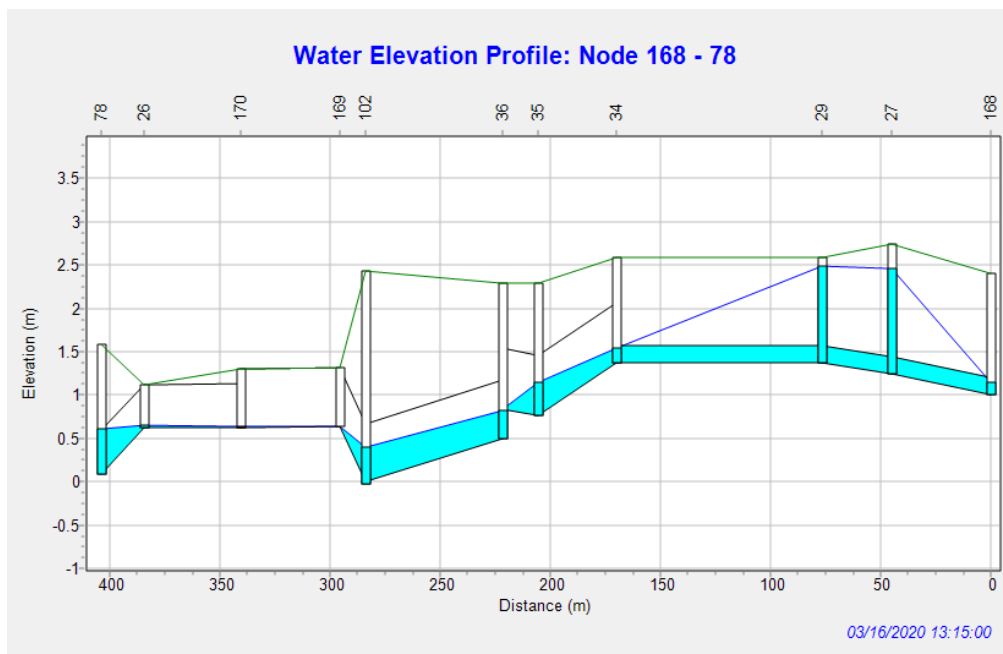
Raudtee tänava torustikku liitub Kauba tänavalt alguse saav kraav, mis kogub poole pilootala alla jääva ala sademeveed. Antud torustik kogub kogu kesklinna sademeveed.

Uurides eesvoolu pikiprofiili selgus, et üks torulõik (vt Joonis 31, lõik 34-168) on paigaldatud vale kaldega, mis ei võimalda veel isevoolselt edasi voolata. Sellise süsteemi lahendusega võib eeldada, et looduslähedased meetmed kindlasti vähendaksid üleujutusrisiki, kuid probleemi tuum on siis projekteerimise ja paigalduse vea tagajärjel tekkinud.



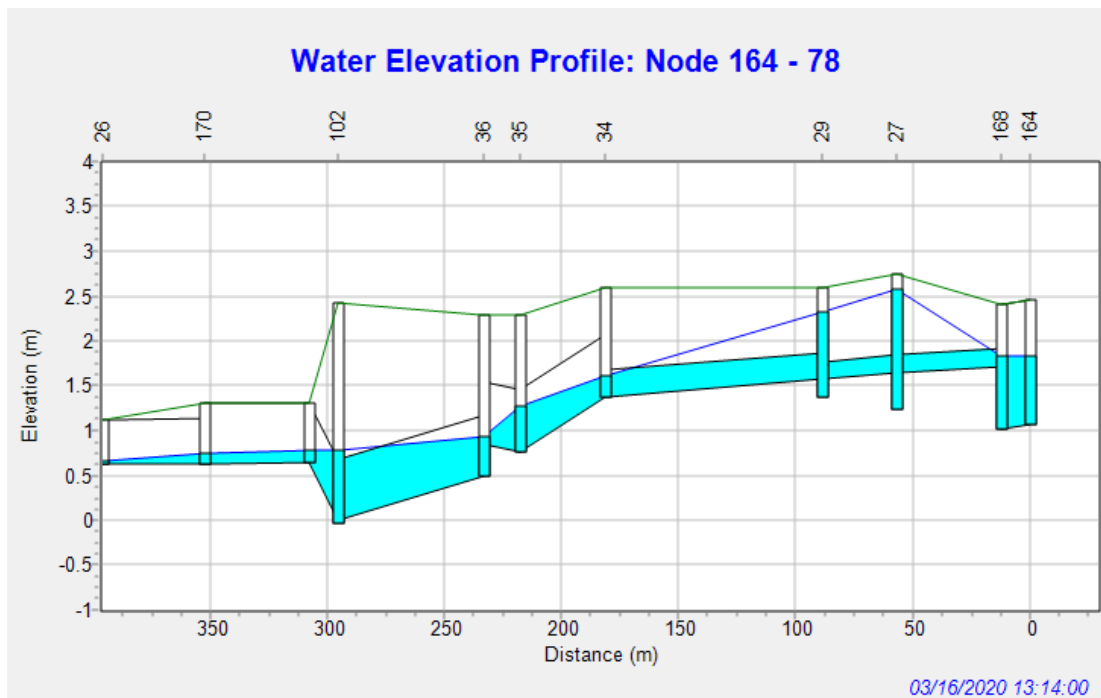
Joonis 31 Haapsalu raudteejaama äravoolu lõigu pikiprofiil (voolusuund paremalt vasakule). Lõigu 168-34 kalle on vales suunas.

Raudteejaama parkla ala kõvakatte osakaalu vähendamine aeglustaks vee kokkuvoolu kiirust ning võimaldaks osaliselt veel pinnasesse imbuda, vähendades koormust kanalisatsioonisüsteemile. Joonisel 32 on näha, et vett läbilaskva katendiga parkla ei tekitaks üleujutust läbi kaevude, kuid torustik ikkagi töötaks täistäiel.



Joonis 32 Mudel vihma tipphetkel. 30% parklast kaetud vett läbilaskva katendiga (5a korduvusega vihm)

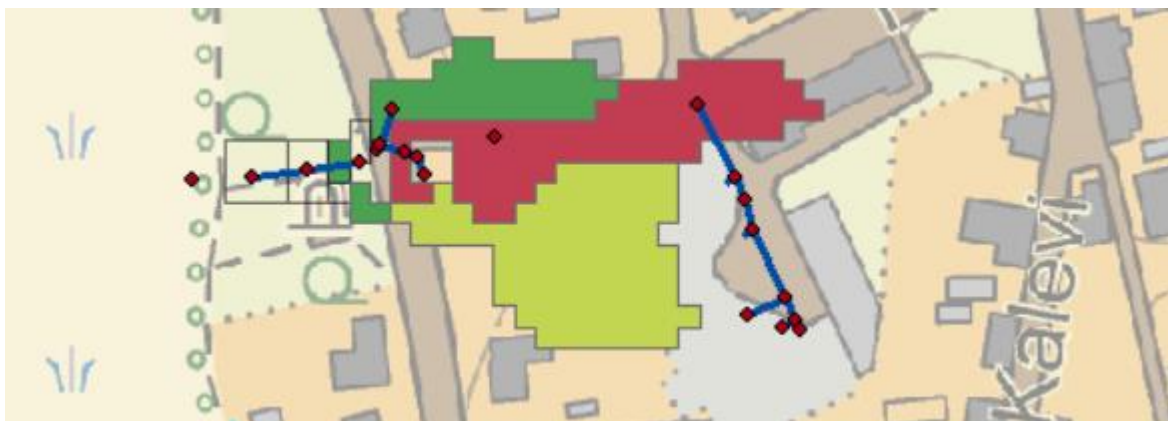
Lahenduseks on aladimensioneeritud torude väljavahetamine ja torustiku õige kalde tagamine. Lõigul 29-34 torustiku läbimõõt on asendatud DN300 toruga, mis suudab ~75 l/s tippvooluhulga ära juhtida.



Joonis 33 Parandatud lõigu 168-34 kalle. Raudtee tn torustik dimensioneeritud vastavalt sisenevale vooluhulgale (de300,  $i = 0,5$  mm/m). 5a vihm

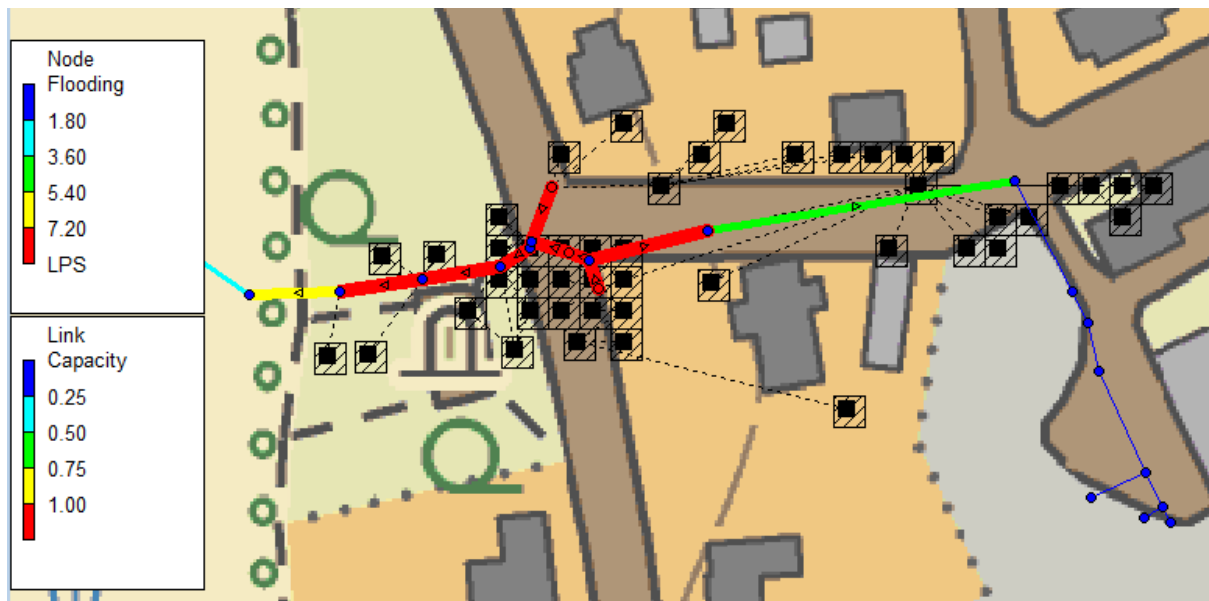
#### 4.5.2 Kreutzwaldi ja Kalda tänavate ristmik, Ernst Enno mälestusmärk

Kreutzwaldi tänaval asuvad enamasti eraelamud haljastatud kruntidega. Ristumisel Kalda tänavaga asub Ernst Ennole pühendatud mälestusmärk. Tänav on monumenti ümbritsevast haljasalast eraldatud kõrge äärekiviga. Kreutzwaldi tänaval puuduvad restkaevud, mis sademevett koguksid. Restkaevud on ristmikul ja pikki Kalda tänavat.



Joonis 34 Kreutzwaldi ja Kalda tänavate ristmik. Üleujutusriskiga valgalad (2a korduvusega vihm)

Kreutzwaldi tänavale langevad sademeveed liiguvad Kalda tänava suunas, kus nad juhitakse restkaevude kaudu märgalale. Kiire kokkuvoolu aeg ja piiratud äravoolu süsteemi mahutavus põhjustavad seal üleujutusi.

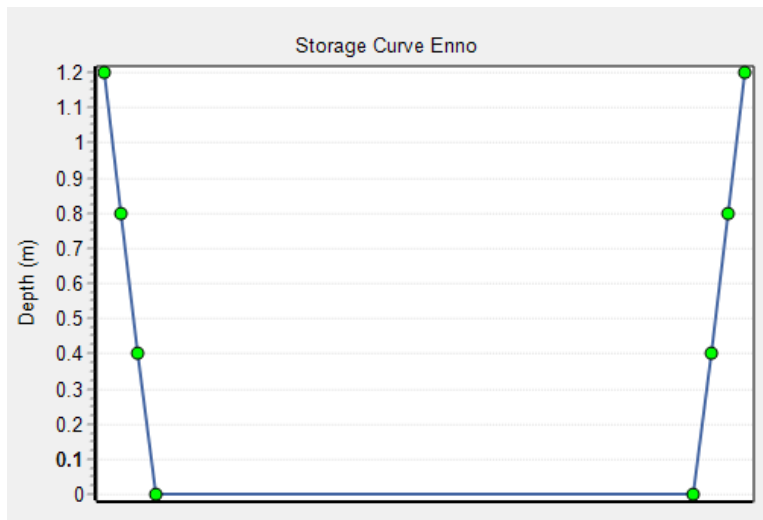


Joonis 35 Kreutzwaldi ja Kalda tn ristmik vihma tipphetkel. (5a korduvusega vihm)

Vaadeldava ala läheduses on munitsipaalomandis haljasalal asuv monument ning märgala. Monumenti ümbritsev ala on liigniiske, seega immutamine pole seal võimalik. Liigvesi ei valgu otse märgalale teetammide tõttu. Lahendus peab ajutiselt hoidma Kreutzwaldi ja Kalda tänavatelt ülevoolavat sademevett ning suunama seda järk järgult märgalale.

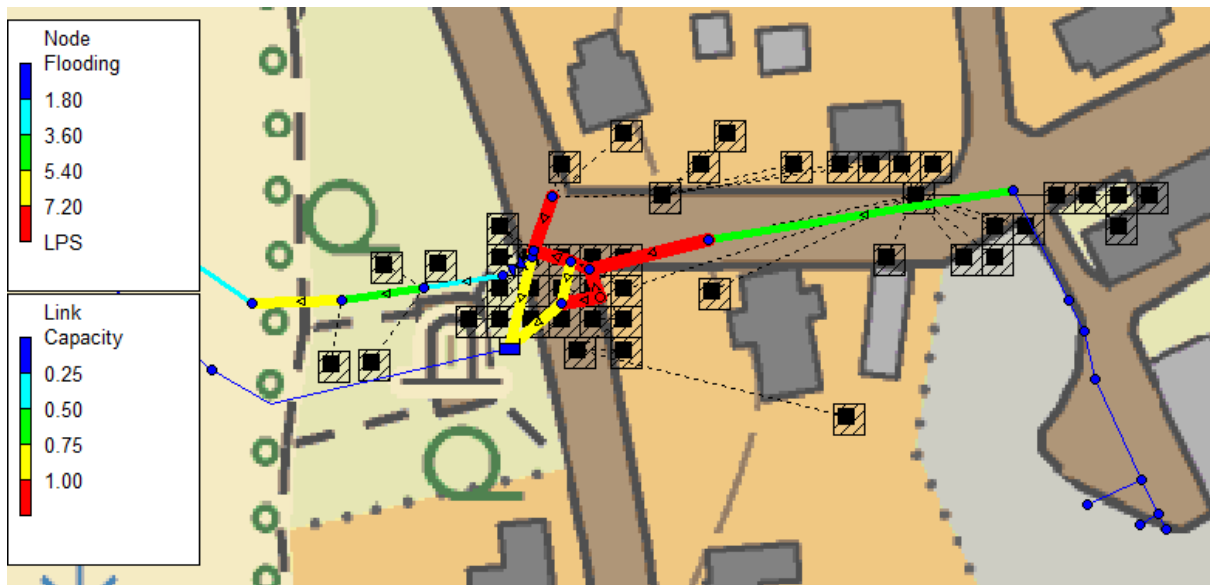
Lahenduse aluseks on võetud Murel Truu bakalaureuse töös [53] Ernst Enno monumendi ümbritseva haljasala maastikulahendus. Kalda tänava kanalisatsioonisüsteemist ülevoolavat vett suunatakse ümber haljasalale, kuhu on rajatud vihmaed või viibetiik ajutiseks vee hoiustamiseks. Sissevool on varustatud kontrollsüsteemiga ühendatud siibriga, mille abil saab reguleerida vooluhulka ning vajadusel sademevesi otse märgalale ümbersuunata pikema üleujutuse juhul. Kuivematel perioodidel suunatakse Kalda tänavalt kogutud vesi viibetiiki, et vältida põukahjustusi ja säilitada süsteemi efektiivsus.

Alale on rajatud viibetiik veepeegli pindalaga 100 m<sup>2</sup> ja sügavusega 1,2 m. Viibetiiki on suunatud Kalda tänava restkaevude ülevoolud ning osa tee pealt valguvast sademeveest. Viibetiigile on ette nähtud ülevool märgalale.

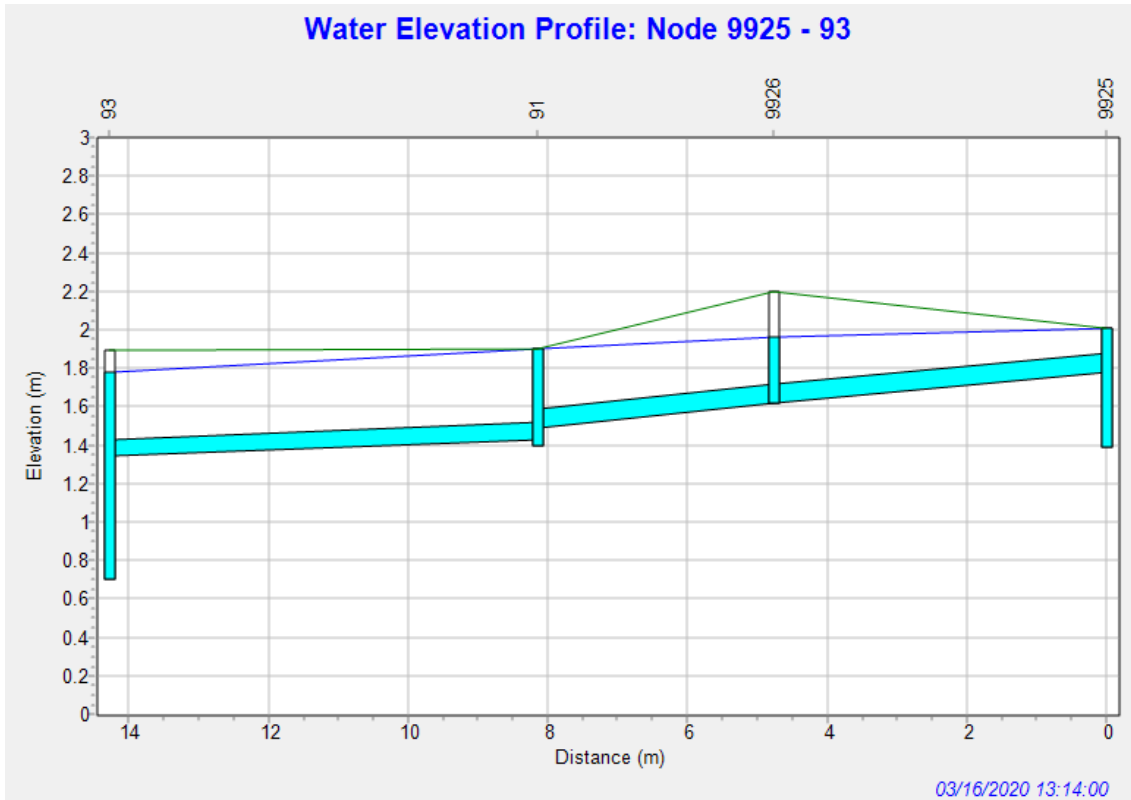


Joonis 36 Viibetiigi ristlõige

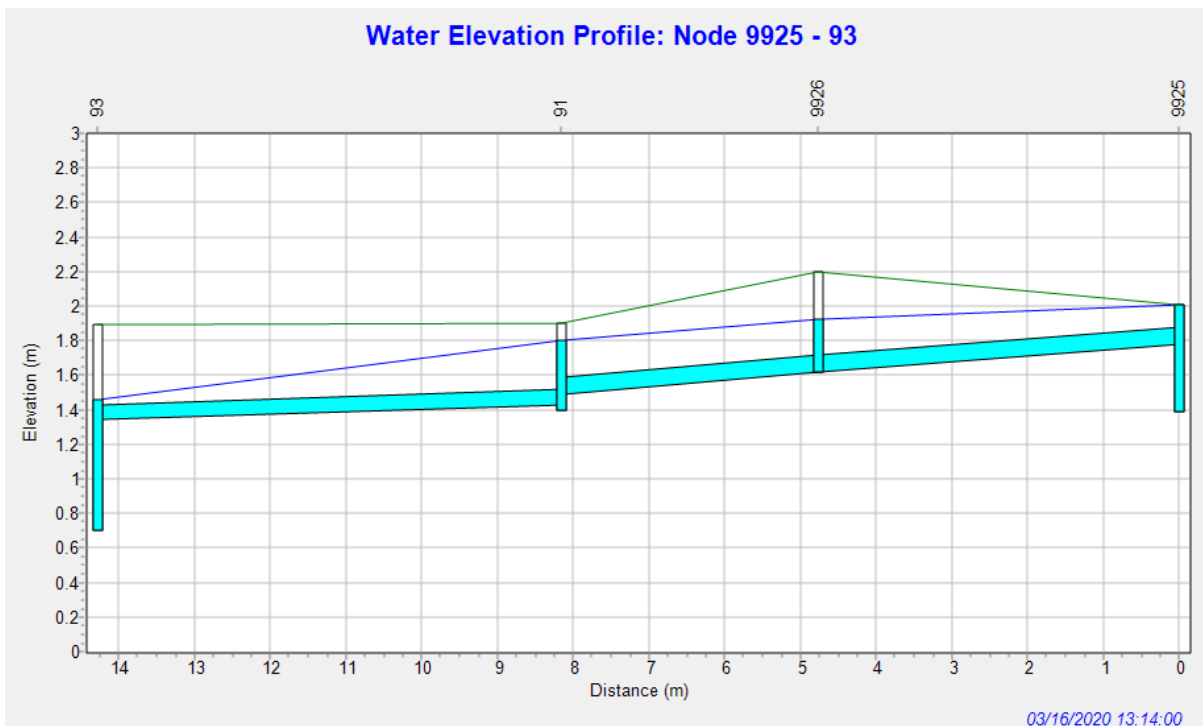
Lahendus leevendab üleujutusrisiki, kuid madalamad kaevud võivad vaatamata sellele uputada. Võrreldes olemasoleva olukorraga (vt. Joonis 35, 38) on vähenenud koormus ristmikul asuvatele kaevudele ning märgalale suubuvale kraavile. Sissevool kraavidesse on piiratud siibriga, seega on ka kraavi suunatud vooluhulk vähenenud .



Joonis 37 Kreuzwaldi ja Kalda tn ristmik. E. Enno monumendi alale rajatud viibetiik.



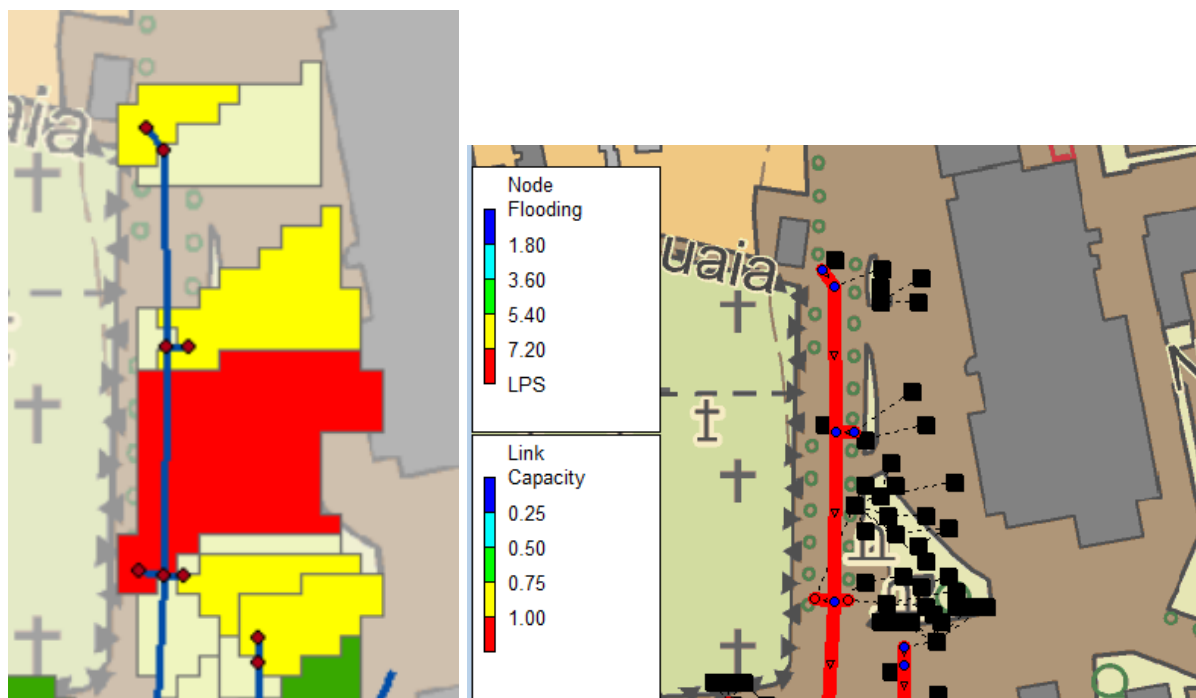
Joonis 38 Ristmikul asuvate kaevude profiil viibetiigita



Joonis 39 Ristmikul asuvate kaevude profiil viibetiigita

### 4.5.3 Haapsalu kaubamaja parkla lahendused

Kaubamaja ees asub 0,4 ha suurune asfalteeritud parkla, mille eelvooluks on Posti tänaval asuv DN300 sademeveekanalisisatsiooni torustik. Üle tee asub Vana Kalmistu, ristmikul Tallinna maanteega asub haljasala mälestusmärkidega maailmasõdades hukkunutele. Mudelis on kajastatud olukord enne Posti tänava remonti.



Joonis 40 Haapsalu kaubamaja üleujutusriskiga valgalad (Paremal:5a korduvusega vihm; vasakul: trass tipphetkel)

Kanalisisatsioonisüsteemi ülekoormamine on tingitud kõvakattega alade suurest osakaalust, mis põhjustab vee kiiret kokkuvooluaega, sademeveel puudub võimalus pinnasesse imbuda. Looduslähedaste meetmete eesmärk sellises olukorras oleks aeglustada sademevee äravoolu parklalt ja soodustada pinnasesse imbumist. Geoloogia uuringute järgi on ala koostis enamasti liivast ja killustikust, pinnaseveetase püsib 2,25 m sügavusel. [54]

Vaadeldav ala läheduses on haljasalaid, kuid nende otstarbe ei võimalda nende kasutamist. Looduslähedaste meetme rajamine nendele aladele on seega välistatud. Parkla all olev ala pakub piisavalt võimalusi rakendada meetmed, mis ei võtta ära kasulikku pinda samas võimaldavad veel pinnasesse imbuda. Teise võimalusena saab rakendada reaalajas kontrollitavate kaevukaante süsteemi (vt. alapeatükk 4.4.1 Parklad).

### Vett läbilaskev katend



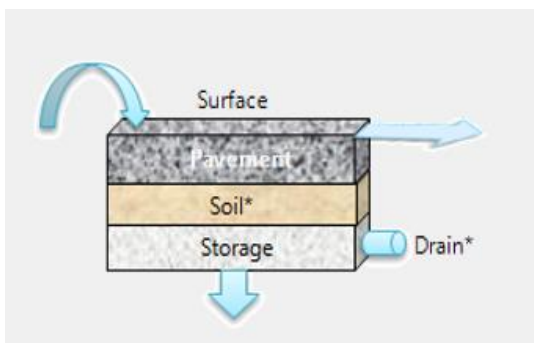
Vett läbilaskva katendiga on kaetud 1/2 parklast, mis vastab olemasolevale parkla kasutusele (1/2 sõidu- ja kõnnitee, 1/2 parkimiskohad).



Pilt 3 Haapsalu kaubamaja parkla. (Allikas: Maa-amet)

Dreenasfaldi ja murukivi katendi tüübi aluseks on võetud Maanteeameti poolt välja antud „Elastsete teekatendite projekteerimise juhend“ [55].

Mudelis kasutatud vett läbilaskva katendi parameetrid on kirjeldatud allolevas tabelis.

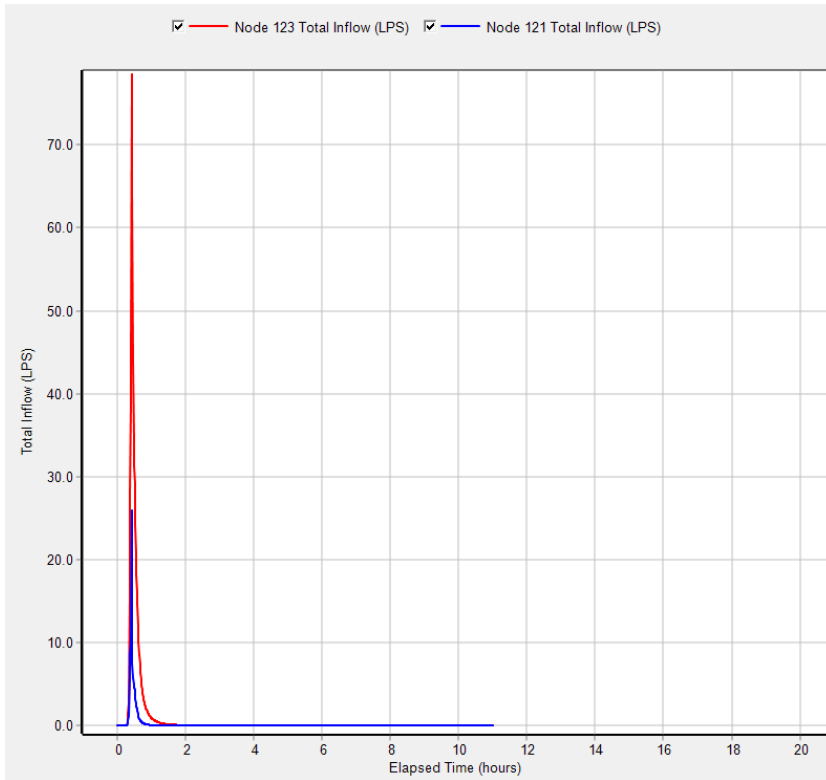


Joonis 41 SWMM LID kihtide jaotus

Pind		Pinnakate		Täitekiht		Täitekiht 2	
Ääre kõrgus, mm	0	Kihi paksus, mm	200	Kihi paksus, mm	200	Kihi paksus, mm	300
Taimkatte osakaal	0	Poorsus	0.15	Poorsus	0.5	Poorsus	0.4
Karedustegur (Manning)	0.014	Läbilaskvus, mm/t	200	Läbilaskvus, mm/t	0.5	Läbilaskvus, mm/t	0.5
Kalle, %	1						

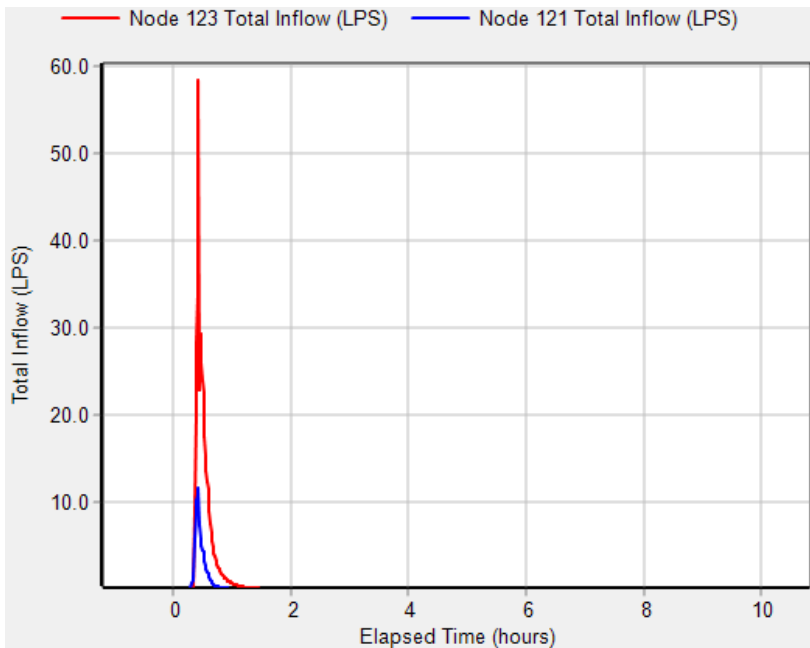
Tabel 6 Vett läbilaskva katendi parameetrid

Joonisel 31 on parkla valgalalt koguvate kaevudesse sisenevad vooluhulgad. Kaevu 123 voolhulk ulatub tipphetkel ~80 l/s 5-aastase korduvusega vihma puhul ning kaev 121 ~35 l/s. Selline sademevee kogus tekitab kaevudes üleujutuse.



Joonis 42 Kaevude 123 ja 121 vooluhulgad (l/s). 5a korduvusega vihm

Rakendades poolele parkla alale katendi, mis võimaldab veel pinnasesse imbuda, on võimalik tippvooluhulka vähendada ~20 l/s võrra (vt. Joonis 43). Sellega on ka ala üleujutusrisk maandatud.



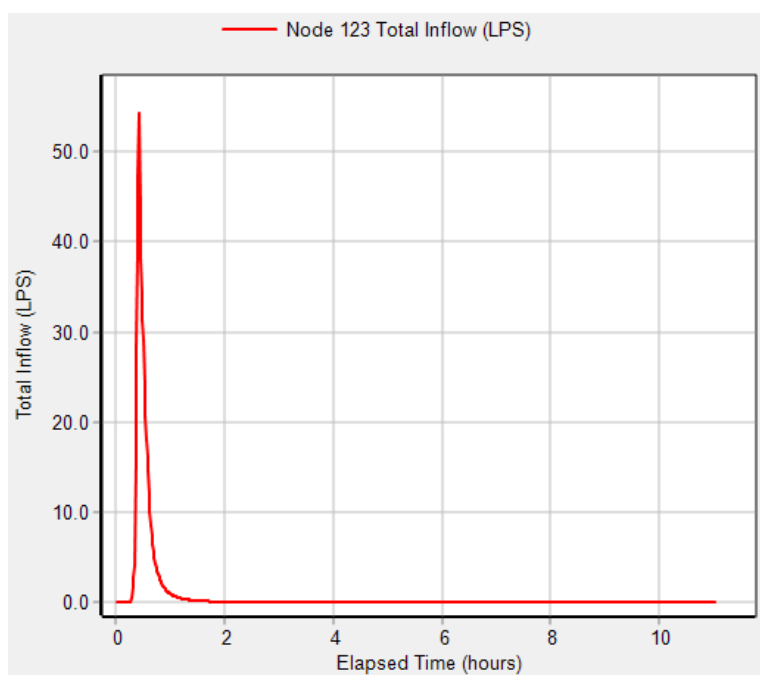
Joonis 43 Kaevude 123 ja 121 vooluhulgad (l/s). Parkla osaliselt kaetud vett läbilaskva katendiga.

## Targa linna lahendus

See lahendus põhineb alapeatükis 4.4.1 Parklad kirjeldatule põhimõttele. Kaevude 123 ja 125 väljunditele on paigaldatud siibrid, mis reguleerivad kaevust väljuva sademevee vooluhulka. Siiber on seadistatud sulguma, kui kaevu veetase saavutab etteantud taseme. Siiber avaneb tagasi, kui lubatud veetase on taastunud.

Kaevu 125 sügavus on 0,8 m, seega siiber pannakse kinni, kui on saavutatud veetase 0,6m. Kaevu 123 sügavus on 1,8 m, seega siiber pannakse kinni, kui on saavutatud veetase 1,0 m. Kõrgused on valitud, kuna kaevud 125 ja 123 on tegelikkuses restkaevud ning jäetud kõrgus võimaldaks jätkuvalt koguda Posti tänavalt kokku valguvaid sademeid. Alternatiivne kontrollmehhanismi võimalus oleks paigaldada vooluhulga andurid eelvoolu ning reguleerida süsteemi sisenevat vooluhulka parklast vastavalt sellele.

Võrreldes joonisel 42 ja joonisel 44 näidatud kaevude vooluhulkasid on näha, et kaevu läbiv vooluhulk väheneb pea 30 l/s võrra. Seetõttu väheneb ka koormus Posti tänaval asuvale eelvoolule. Parkla alale kogunenud vesi juhitakse ära vastavalt kaevus olevale veetasemele, nii välditakse ka edaspidist süsteemi ülekoormamist.



Joonis 44 Kaevu 123 vooluhulgad (l/s), kui kaev on siibriga juhitav

5-aastase korduvusega vihma puhul on parkla valgala kaevude üleujutus tekitava vee maht  $\sim 20 \text{ m}^3$  ja 10-aastse korduvusega  $\sim 32 \text{ m}^3$  (vt. Lisa 1). Parkla 0,4 ha alast on umbes 0,2 ha piiratud äärekiviga. Siibrikaevu lahenduse puhul arvutatakse välja ka veekiht, mis siibri sulgemise järel tekib.

5-aasatse korduvusega vihm:

$$\frac{20 \text{ m}^3}{2000 \text{ m}^2} = 0,01 \text{ m} = 1 \text{ cm}$$

10-aastase korduvusega vihm:

$$\frac{32 \text{ m}^3}{2000 \text{ m}^2} = 0,016 \text{ m} = 1,6 \text{ cm}$$

Selline lisanduv veekihi paksus, ei takista jalakäijate ja autode kulgemist parklast.

# KOKKUVÕTE

Põhja-Euroopa piirkonna tulevikuprognoside kohaselt on oodata maailma keskmisest kõrgemat temperatuuritõusu, lume- ja jääkate vähenemist, sagenevaid talvetorme ja suuremaid jõgede vooluhulkasid. Nende nähtuste sagenemine tõenäoliselt suurendab looduskatastroofide ulatust, mis põhjustavad majanduslikke kahjusid, terviseprobleeme ja surmasid. Linnapiirkondade laienemine toob kaasa taimestiku vähenemist ja ehitusest tingitud pinnase tihenemist, mis takistavad sademevee loomulikku äravoolu ja imbumist. Linnastumise ja kliimamuutustega on suurenenud ka üleujutusrisk linnakeskkonnas.

Käesolevas lõputöös uuriti looduslähedaste ja tarkade üleujutusrisiki leevendamismeetmete rakendamist ning pakuti välja metoodika, mis kirjeldab võimalikku planeerimisstrateegiat. Metoodika efektiivsuse kontrollimiseks kasutati NOAH projekti raames Haapsalu linna pilootala kohta koostatud hüdraulilist mudelit. Arvutusi viidi läbi uuendatud standardi EVS 848:2021 Väliskanalisatsioonivõrk sademevee arvutamise metoodikale tuginedes. Selgus, et pilootala olemasolev sademevee torustik ei ole võimeline perspektiivseid sademeid vastu võtma. Pilootalal kaardistati üleujutusriskiga valgalad ning vastavalt välja pakutud metoodikale valiti sobivad looduslähedased leevendusmeetmed.

Üleujutusriskiga alade analüüs tõi välja põhjused, miks olemasolev süsteem ei toimi ning uuris looduslähedaste meetmete rakendamise võimalikkust nendel aladel. Analüüsis lähtuti ala geoloogilisest ehitusest, omandivormist ja otstarbest. Kolmest probleemsest kohast sai looduslähedasi meetmeid kasutada kahel alal – kolmanda ala probleem seisnes torustiku vales kaldes ja aladimenesioneerituses. Alternatiivina looduslähedastele meetmetele rakendati parklas ka Targa Linna (ingl k Smart City) lahendust, mis ei vaja infrastruktuuri sisulist muudatust, vaid olemasoleva süsteemi osade funktsionaalsus muudetakse efektiivsemaks.

Looduslähedaste meetmete rakendamine täitis oma eesmärgi linnaruumis. Sademevee äravoolu kiirus aeglustus ja kogus vähenes, mis aitas kaasa koormuse vähendamisele olemasolevale süsteemile. Autor leiab, et looduslähedased üleujutusrisiki leevendusmeetmed on multifunktsionaalsed infrastruktuuri osad, mida võiks linnaplaneerimises rohkem arvesse võtta ning nende rakendamise võimalikkuse analüüsi projektide kohustuslikuks osaks teha.

## SUMMARY

According to forecasts for the future of the Northern European region, higher-than-world temperature rises are expected, meaning less snow and ice cover, more frequent winter storms, and higher river flows. The increase in these phenomena is likely to increase the scale of natural disasters, which cause economic damage, health problems and deaths. The expansion of urban areas is causing a decrease in vegetation, a compaction of the soil due to construction, which is preventing the natural drainage and absorption of rainwater. Urbanization and climate change have also increased the risk of urban flooding.

This dissertation investigated the implementation of possible sustainable urban drainage systems (SuDS) and smart flood risk mitigation measures and proposed a methodology that describes a possible planning strategy. To check the efficiency of the methodology, a hydraulic model prepared for the pilot area of the city of Haapsalu within the NOAH project was used. The calculations were performed according to the updated standard EVS 848: 2021 Sewerage network for rainwater calculation. It was found that the existing stormwater pipeline in the pilot area is not capable of receiving such rains. Flood risk areas in the pilot area were mapped and appropriate SuDS mitigation measures were selected in accordance with the proposed methodology.

The analysis of the flood risk areas revealed the reasons why the existing system is not working and whether it is possible to implement SuDS measures in these areas. The analysis was based on the geological structure, ownership, and purpose of the area. Of the three problem areas, near-natural measures could be used in two areas: the third problem was the wrong slope of the pipeline and the under dimensioned pipeline. As an alternative to nature-friendly measures, the Smart City solution was also implemented in the parking area, which does not require a substantial change in the infrastructure but makes the functionality of the parts of the existing system more efficient.

The implementation of SuDS fulfilled its purpose in urban space. The rate of stormwater runoff slowed down and the amount decreased, which helped to reduce the load on the existing system. The author considers that near-natural flood risk mitigation measures are multifunctional parts of infrastructure that should be taken into account more in urban planning and the analysis of the feasibility of their implementation must be a mandatory part of development projects.

## KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] M. Truu, I. Annus, J. Roosimägi, N. Kändler, A. Vassiljev ja K. Kaur, „Integrated Decision Support System for Pluvial Flood-Resilient Spatial Planning in Urban Areas,” *Water*, kd. 13, nr 23, 2021.
- [2] Eesti Standard, *EVS 848:2021 Väliskanalisatsioonivõrk*, 2021.
- [3] Keskkonnaministeerium, „Kliimamuutustega kohanemise arengukava aastani 2030,” 2017.
- [4] A. Luhamaa, A. Kallis, K. Mändla, A. Männik, T. Pedusaar ja K. Rosin, „Eesti tuleviku kliimastenaariumid aastani 2100,” Keskkonnaagentuur, Tallinn, 2014.
- [5] J. Fallmann ja S. Emeis, „How to bring urban and global climate studies together with urban planning and architecture?,” *Developments in the Built Environment*, kd. 4, 2020.
- [6] Keskkonnaagentuur, „Eesti ilma riskid - Suured sajud,” 2012. [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.ilmateenistus.ee/wp-content/uploads/2013/01/eesti\\_ilma\\_riskid\\_2012\\_suuredsajud.pdf](https://www.ilmateenistus.ee/wp-content/uploads/2013/01/eesti_ilma_riskid_2012_suuredsajud.pdf).
- [7] Riigi Ilmateenistus, „Kliimakaardid. Sademed,” 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ilmateenistus.ee/kliima/kliimakaardid/sademed/>. [Kasutatud 15 Detsember 2021].
- [8] G. B., M. Reba, B. Hales, E. Wentz ja K. Seto, „Trends in urban land expansion, density, and land transitions from 1970 to 2010: a global synthesis,” *Environmental Research Letters*, 20 Märts 2020.
- [9] E. Loigu, K. Pachel, V. Suurkask ja A. Kuusik, „Ülevaade sademevee (sh liigvee) äravoolu maksustamise alustest ja praktilistest rakendustest Euroopa Liidus ja mujal,” Tallinn, 2010.
- [10] M. Kuris, G. Mandre, V. Kuusemets ja A. Mik, „LOODUSLÄHEDASED SADEMEVEESÜSTEEMID: Eesti kliimasse sobivad sademeveelahendused,” 2021.
- [11] C. Vitale, S. Meijerink, F. D. Moccia ja P. Ache, „Urban flood resilience, a discursive-institutional analysis of planning practices in the Metropolitan City of Milan,” *Land Use Policy*, kd. 95, 2020.
- [12] „Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks,” EU Directive - Official Journal of the European Union, 2007.
- [13] Tallinna Linnavolikogu, „Tallinna sademevee strateegia aastani 2030,” 2012. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akti/isa/4090/3201/3041/2110123505.attachment.pdf#>. [Kasutatud 26 Detsember 2021].
- [14] International Water Association, „Water-Wise Cities - Berlin,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://iwa-network.org/city/berlin/>. [Kasutatud 9 jaanuar 2022].
- [15] Flussbad Berlin, „Frequent Asked Questions,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.flussbad-berlin.de/faq>. [Kasutatud 9 jaanuar 2022].
- [16] R. C. Brears, *Blue and Green Cities: The Role of Blue-Green Infrastructure in Managing Urban Water Resources*, London: Palgrave Macmillan, 2018.
- [17] A. Praefcke, *Friedrichsgracht Berlin (im Hintergrund die Jungfernbrücke)*, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Friedrichsgracht\\_Berlin.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Friedrichsgracht_Berlin.jpg).
- [18] Flussbad Berlin e.V., „Flussbad Berlin,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.flussbad-berlin.de/downloads>. [Kasutatud 9 jaanuar 2022].
- [19] J. Gonchar, „Continuing Education: Urban Swimming Holes,” *Architectural Record*, 1 august 2018. [Võrgumaterjal]. Available:

<https://www.architecturalrecord.com/articles/13561-continuing-education-urban-swimming-holes/>. [Kasutatud 9 jaanuar 2022].

- [20] „Piltuudis: Nõmmel Sihi tänaval pole vihma- ja sulaveel kuskile valguda,” ERR, mai 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.err.ee/744125/piltuudis-nommel-sihi-tanaval-pole-vihma-ja-sulaveel-kuskile-valguda>. [Kasutatud 09 jaanuar 2022].
- [21] T. Tamm, „Sademeveesüsteemide projekteerimise aluste kaasajastamine,” Eesti Maaülikool, Tartu, 2020.
- [22] Y. Depietri ja T. McPhearson, „Integrating the Grey, Green, and Blue in Cities: Nature-Based Solutions for Climate Change Adaptation and Risk Reduction,” *Nature-Based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas*, 2017.
- [23] T. D. Fletcher ja O. o. R. a. D. C. O. U. F. H. R. A. D. B. S. A. S. T. S. B. William Shuster United States Environmental Protection Agency, „SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage,” *Urban Water Journal*, kd. 12, nr 7, 2015.
- [24] Kobras AS, „Sademvee säästliku käitlemise põhimõtted Tartu linnas,” Tartu, 2018.
- [25] S. W. H. U.-C. S. I. T. S. R. A. R. K. B Woods Ballard, „The SuDS Manual,” CIRIA, London, 2015.
- [26] European Commission, „Nature-based solutions,” [Võrgumaterjal]. Available: [https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/research-area/environment/nature-based-solutions\\_en](https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/research-area/environment/nature-based-solutions_en). [Kasutatud 06 Jaanuar 2022].
- [27] M. Oberascher, W. Rauch ja R. Sitzenfrei, „Towards a smart water city: A comprehensive review of applications, data requirements, and communication technologies for integrated management,” *Sustainable Cities and Society*, kd. 76, 2022.
- [28] N. Kändler, „Decentralized Real-Time Control Platform for Urban Drainage Systems in Climate Proof Smart Cities,” Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2021.
- [29] C. Tiger, „Smart Cities: A Dirt Cheap IoT Solution for Philly’s Stormwater Infrastructure,” Bressler Group, 20 September 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.bresslergroup.com/blog/smart-cities-a-dirt-cheap-iot-solution-for-stormwater-infrastructure/>. [Kasutatud 14 jaanuar 2022].
- [30] J. Kinney, „Chicago Uses Sensors to Judge Green Infrastructure,” Next cItY, 15 detsember 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <https://nextcity.org/urbanist-news/chicago-sensors-green-infrastructure-study>. [Kasutatud 14 jaanuar 2022].
- [31] L. U. Storm. [Võrgumaterjal]. Available: <https://urbanstorm.viimsivald.ee/>.
- [32] Eestimaa Looduse Fond, „Tehismärgalad: Põllumees puhastab vett,” 2012. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.digar.ee/arhiiv/nlib-digar:130263>. [Kasutatud 01 Mai 2022].
- [33] Alkranel OÜ, „Alternatiivsete sademevee äravoolu- ja kogumissüsteemide uurimustöö,” Tartu, 2005.
- [34] B. C. P. D. D. G. G. M. U. P. Vera Enzi, „Nature-Based Solutions and Buildings – The Power of Surfaces to Help Cities Adapt to Climate Change and to Deliver Biodiversity,” %1 *Nature-Based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas*, 2017.
- [35] A. R. & M. A. R. Upeka Kuruppu, „Permeable pavement as a stormwater best management practice: a review and discussion,” *Environmental Earth Sciences*, 2019.
- [36] National Association of City Transportation Officials, „Urban Street Stormwater Guide,” National Association of City Transportation Officials, [Võrgumaterjal]. Available: <https://nacto.org/publication/urban-street-stormwater-guide/stormwater-elements/green-stormwater-elements/hybrid-bioretention-planter/>. [Kasutatud 16 jaanuar 2022].



- [37] T. V. AS. [Võrgumaterjal]. Available: <https://tallinnavesi.ee/tehnilised-nouded/kaevud/>. [Kasutatud 01 Mai 2022].
- [38] K. OÜ. [Võrgumaterjal]. Available: <https://mahuti.ee/olipuudurid/>. [Kasutatud 01 Mai 2022].
- [39] P. OÜ. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.pipelife.ee/>. [Kasutatud 01 Mai 2022].
- [40] A. G. P. P. G. S. A. V. Giuseppina Garofalo, „A distributed real-time approach for mitigating CSO and flooding in urban drainage systems,” 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1084804516302752>. [Kasutatud 23 jaanuar 2022].
- [41] H. Tsõbulski, „SINDI SADEMEVEESÜSTEEMIDE INVENTAR,” Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2020.
- [42] A. Piirsalu, „Inseneri vaatevinkel sademevee majandamisel,” 6 aprill 2016. [Võrgumaterjal]. Available: [https://veeyhing.ee/wp-content/uploads/2016/04/Sademevesi\\_inseneria-A.Piirsalu.pdf](https://veeyhing.ee/wp-content/uploads/2016/04/Sademevesi_inseneria-A.Piirsalu.pdf). [Kasutatud 21 veebruar 2022].
- [43] LIFE UrbanStorm Project, „Development of sustainable and climate resilient urban stormwater management systems for Nordic municipalities. LIFE17 CCA/EE/000122,” Eesti, 2017.
- [44] A. Shkaruba, H. Skryhanb, O. Likhacheva, A. Katona, O. Maryskevych, V. Kireyeu, K. Sepp ja I. Shpakivska, „Development of sustainable urban drainage systems in Eastern Europe: an analytical overview of the constraints and enabling conditions,” *Journal of Environmental Planning and Management*, 16 Märts 2021.
- [45] Ramboll Foundation, „Strengthening Blue-Green Infrastructure In Our Cities,” 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <https://ramboll.com/-/media/38fc23d12a5d47dcb7b3821716d69270.pdf>. [Kasutatud 23 jaanuar 2022].
- [46] EPA, „Storm Water Management Model User’s Manual Version 5.1,” september 2015. [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-02/documents/epaswmm5\\_1\\_manual\\_master\\_8-2-15.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-02/documents/epaswmm5_1_manual_master_8-2-15.pdf). [Kasutatud 01 märts 2022].
- [47] SWECO Projet AS, „Haapsalu ühisveevärgi ja -kanalisatsiooni arengukava aastateks 2014...2025,” 2014.
- [48] O. O. H. R. M. Saago, „Matsalu alamvesikonna asulate vee- ja kanalisatsioonirajatiste rekonstrueerimine ja laiendamine,” Tartu, 2017.
- [49] R. G.-B. I. A.-D. Rosario Balbastre-Soldevila, „A Comparison of Design Storms for Urban Drainage System Applications,” *Water*, kd. 11, nr 4, 2019.
- [50] N. S. S. M. C. J. R.-H. Daniel Jato-Espino, „A simulation-optimization methodology to model urban catchments under non-stationary extreme rainfall events,” *Environmental Modelling and Software*, 2017.
- [51] M. Veltmann, „Säästlikud Sademeveesüsteemid parklates,” Eesti Maaülikool, Tartu, 2017.
- [52] I. A. A. V. R. P. Nils Kändler, „Peak flow reduction from small catchments using smart inlets,” *Urban Water Journal*, kd. 17, nr 7, pp. 577-586, 2019.
- [53] M. Truu, „Haapsalu Öhtu kalda piirkonna sademevete juhtimisest lähtuv maastikulahendus,” Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2020.
- [54] Maa-amet, „Haapsalu Tarbijate Kooperatiivi kaubanduskeskus ja võõrastemaja,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.maaamet.ee/egf/index.php?lht=aru&id=2995>. [Kasutatud 16 aprill 2022].
- [55] Maanteeamet, „Elastsete teekatendite projekteerimise juhend,” 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.mnt.ee/sites/default/files/content->

editors/Failid/Juhendid/projekteerimine/elastsete\_teeakatete\_projekteerimise\_juhe  
nd\_29\_03\_17.pdf. [Kasutatud 01 Mai 2022].

- [56] IPCC, „Climate Change 2014 Report,“ 2014. [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5\\_SYR\\_FINAL\\_SPM.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5_SYR_FINAL_SPM.pdf). [Kasutatud 15 Detsember 2021].
- [57] T. Tammets, „Eesti ilma riskid,“ Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituut, Tallinn, 2012.
- [58] Keskkonnaministeerium, „Kliimamuutustega kohanemise arengukava aastani 2030“.
- [59] S. Pauleit, T. Zölch, R. Hansen, T. B. Randrup ja C. K. v. d. Bosch, „Nature-Based Solutions and Climate Change – Four Shades of Green,“ *Nature-based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas*, 2017.

**LISAD**

## **LISA 1 Uputatud kaevude tabel**

## 2A korduvus

Node	Flooded	LPS	Flooding	10 <sup>6</sup> ltr	flood m3	condition	condition m3
108	0.01	17.82	13:24	0	0	2	1
110	0.01	3.79	13:24	0	0	1	1
114	0.03	19.62	13:24	0.001	1	2	2
121	0.01	21.5	13:24	0	0	2	1
123	0.03	39.01	13:25	0.002	2	3	2
125	0.01	49.14	13:25	0	0	3	1
127	0.01	7.77	13:25	0	0	2	1
165	0.01	1.21	13:23	0	0	1	1
1661	0.01	29.99	13:22	0	0	3	1
167	0.11	64.41	13:25	0.01	10	3	3
17	0.01	45	13:23	0	0	3	1
18	0.08	30.91	13:25	0.004	4	3	2
21	0.12	26.95	13:23	0.005	5	3	2
23	0.21	63.68	13:25	0.023	23	3	3
30	0.2	38.64	13:25	0.011	11	3	3
91	0.27	7.83	13:25	0.004	4	2	2
92	0.01	1.25	13:23	0	0	1	1
94	0.02	1.61	13:23	0	0	1	1
9925	0.27	24.7	13:25	0.009	9	2	3
9930	0.02	132.77	00:03	0.003	3	3	2
9955	0.01	15.47	13:23	0	0	2	1
9962	0.01	1.93	13:24	0	0	1	1
9964	0.01	3.16	13:24	0	0	1	1
9972	0.01	6.96	13:24	0	0	2	1
9973	0.01	24.12	13:24	0	0	2	1
9974	0.01	2.22	13:24	0	0	1	1
9975	0.01	43.24	13:24	0	0	3	1
146	0.01	13712.6	21:25	0.224	224	3	3
128	0.03	1011.01	01:35	0.068	68	3	3
28	0.01	6.62	13:21	0	0	2	1

## 5A Korduvus

Vode	Flooded	LPS	Flooding	10 <sup>6</sup> ltr	m3	condition l/s	ondition m3
105	0.01	11.89	13:23	0	0	2	1
107	0.01	23.16	13:23	0	0	2	1
108	0.01	15.42	13:23	0	0	2	1
110	0.02	6.62	13:22	0	0	2	1
114	0.07	43.22	13:25	0.007	7	3	2
121	0.04	38.08	13:23	0.002	2	3	2
123	0.12	78.56	13:25	0.016	16	3	3
125	0.03	40.82	13:24	0.002	2	3	2
127	0.01	54.73	13:24	0.001	1	3	2
165	0.04	2.32	13:25	0	0	1	1
1661	0.01	34.12	13:21	0	0	3	1
167	0.15	113.91	13:24	0.028	28	3	3
17	0.03	57.84	13:22	0.003	3	3	2
18	0.13	73.89	13:25	0.016	16	3	3
21	0.16	44.21	13:25	0.012	12	3	3
23	0.23	96.39	13:25	0.04	40	3	3
30	0.23	65.36	13:25	0.023	23	3	3
58	0.01	12.13	13:23	0	0	2	1
91	0.34	15.37	13:26	0.01	10	2	3
92	0.01	3.74	13:22	0	0	1	1
94	0.07	10.28	13:25	0.001	1	2	2
9911	0.01	7.16	13:23	0	0	2	1
9924	0.01	8.9	13:23	0	0	2	1
9925	0.29	38.37	13:25	0.015	15	3	3
9930	0.02	132.77	00:03	0.003	3	3	2
9955	0.01	16.04	13:22	0	0	2	1
9962	0.02	6.41	13:23	0	0	2	1
9964	0.05	17.74	13:25	0.002	2	2	2
9972	0.01	9.87	13:23	0	0	2	1
9973	0.01	37.4	13:23	0	0	3	1
9974	0.01	8.95	13:23	0	0	2	1
9975	0.01	10.73	13:23	0	0	2	1
146	0.01	13712.6	21:25	0.224	224	3	3
128	0.03	1011.01	01:35	0.068	68	3	3
28	0.05	21.28	13:25	0.002	2	2	2

10A Korsuvus

Node	Flooded	LPS	Flooding	10 <sup>6</sup> ltr	m3	condition l/s	condition m3
105	0.01	21.69	13:22	0	0	2	1
107	0.01	26.88	13:22	0	0	3	1
108	0.01	28.68	13:22	0	0	3	1
110	0.05	19.55	13:25	0.002	2	2	2
114	0.09	54.82	13:25	0.012	12	3	3
121	0.06	38.96	13:22	0.005	5	3	2
123	0.13	98.56	13:25	0.025	25	3	3
125	0.05	47.96	13:23	0.005	5	3	2
127	0.01	74.12	13:23	0.001	1	3	2
165	0.07	6.24	13:25	0.001	1	2	2
1661	0.01	35.96	13:21	0	0	3	1
167	0.17	157.81	13:25	0.042	42	3	3
17	0.06	79.05	13:22	0.01	10	3	3
18	0.15	94.06	13:25	0.025	25	3	3
21	0.17	55.95	13:25	0.017	17	3	3
23	0.25	126.59	13:25	0.052	52	3	3
30	0.24	85.95	13:25	0.031	31	3	3
38	0.01	5.58	13:24	0	0	2	1
39	0.01	4.14	13:24	0	0	1	1
58	0.05	21.23	13:25	0.002	2	2	2
87	0.01	9.59	13:24	0	0	2	1
91	0.39	22.14	13:26	0.015	15	2	3
92	0.01	4.62	13:21	0	0	1	1
94	0.1	19.8	13:24	0.004	4	2	2
9911	0.01	16.06	13:22	0	0	2	1
9918	0.01	12.37	13:23	0	0	2	1
9923	0.03	3.41	13:22	0	0	1	1
9924	0.02	17.53	13:22	0	0	2	1
9925	0.3	52.27	13:25	0.02	20	3	3
9930	0.02	132.77	00:03	0.003	3	3	2
9955	0.01	17.59	13:21	0	0	2	1
9956	0.01	9.09	13:24	0	0	2	1
9957	0.01	6.44	13:24	0	0	2	1
9962	0.05	16.2	13:25	0.002	2	2	2
9964	0.07	28.64	13:25	0.005	5	3	2
997	0.01	1.35	13:22	0	0	1	1
9972	0.01	19	13:22	0	0	2	1
9973	0.01	61.89	13:22	0	0	3	1
9974	0.01	14.16	13:22	0	0	2	1
9975	0.01	13.35	13:22	0	0	2	1
146	0.01	13712.6	21:25	0.224	224	3	3
128	0.03	1011.01	01:35	0.068	68	3	3
28	0.08	40.87	13:25	0.006	6	3	2
9996	0.01	12.65	13:23	0	0	2	1