



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND  
Ehituse ja arhitektuuri instituut

# LINNALISTE SADEMEVEEÜLEUJUTUSTE RISKIHINDAMISE METOODIKA

## METHODOLOGY FOR PLUVIAL FLOOD RISK ASSESSMENT IN URBAN SETTLEMENTS

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Murel Truu  
/nimi/

Üliõpilaskood: EAXM204138

Juhendaja: Ivar Annus, professor  
/nimi, amet/

# 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.

23. mai 2022

Autor: Murel Truu

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

23. mai 2022

Juhendaja: Ivar Annus

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

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

Mina Murel Truu,

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Linnaliste sademeveeüleujutuste riskihindamise metoodika,

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.

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

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

---

Murel Truu

23.05.2022

/allkirjastatud digitaalselt/

---

<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 loomingu 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:** Murel Truu, EAXM204138

Õppekava, peeriala: EAXM, Hooned ja rajatised, Vee- ja keskkonnatehnika

Juhendaja(d): Ivar Annus, professor

### Lõputöö teema:

Linnaliste sademeveeüleujutuste riskihindamise meetodika (eesti keeles)

Methodology for pluvial flood risk assessment in urban settlements (inglise keeles)

### Lõputöö põhieesmärgid:

1. Analüüsida maailmas kasutatavaid sademeveeüleujutuste riskihindamise meetodikaid.
2. Töötada välja Eesti linnadele kohaldatav sademeveeüleujutuste riskihindamise meetodika.
3. Rakendada ja valideerida meetodikat Rakvere linna näitel meetodika rakendamise võimalusi Rakvere linna näitel.

### Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Hädaolukorral riski olemuse ja riskihindamise standardite läbitöötamine. Töö erialakirjandusega sademeveeüleujutuse riskimeetodikate analüüsimisel.	01/02/22
2.	Riskimeetodika väljatöötamine ja testimine pilootalal.	1/04/22
3.	Töö põhijärelduste esitamine artiklina esitamiseks CCVI-WDSA konverentsil	01/05/22
4.	Töö vormistamine	23/05/22

**Töö keel:** eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "23."mai 2022 a.

**Üliõpilane:** Murel Truu ..... "23."mai 2022 a.  
/allkirjastatud digitaalselt/

**Juhendaja:** Ivar Annus ..... "23."mai 2022 a.  
/allkirjastatud digitaalselt/

**Programmijuht:** Simo Ilomets..... "23."mai 2022 a.  
/allkirjastatud digitaalselt/

*Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel*

# SISUKORD

EESSÕNA .....	7
1 SISSEJUHATUS.....	8
2 LINNALISE SADEMEVEEÜLEUJUTUSE RISKI HINDAMISE METOODILISED ALUSED ..	10
2.1 Riski standardiseeritud käsitlus ning selle rakendus sademeveeüleujutuse kontekstis .....	10
2.1.1 Riskijuhtimise standard ja hädaolukorra riskide hindamise raamistik.....	10
2.1.2 Hädaolukorra riskifunktsiooni arvesse võtvate sademevee üleujutuse riski hindamise meetodikate ülevaade .....	12
2.2 Sademeveeüleujutuse riskifaktorite mõõdikud ja nende modelleerimine .....	14
2.2.1 Sademeveeüleujutuse riskifaktorite valiku alused .....	14
2.2.2 Sademeveeüleujutuse ohuallikad .....	16
2.2.3 Sademeveeüleujutust defineerivate hüdrodünaamiliste näitajate modelleerimine.....	18
2.2.4 Linnaruumi haavatavus sademeveeüleujutuse olukorras .....	20
2.2.5 Tulevikuriskide hindamine lähtuvalt linnade võimekusest kohaneda tulevikuriskidega .....	21
2.3 Sademeveeüleujutuste riski hindamine Eesti linnades ja üleujutusriskile rakendatavad riskitasemed.....	23
3 LINNADE SADEMEVEEÜLEUJUTUSE RISKI HINDAMISE METOODIKA .....	27
3.1 Mitmetasandiline sademeveeüleujutuse riskikaalutluse raamistik ja riskitasemete määramine .....	27
3.1.1 Mitmetasandiline sademeveeüleujutuse riskikaalutluse raamistik.....	27
3.1.2 Riskitasemete määramine ja kasutamine .....	29
3.2 Riskikaalutluse ettevalmistamine ja riskistsenaariumite valik.....	31
3.2.1 Riskikaalutluse töövoe ettevalmistus .....	31
3.2.2 Riskistsenaariumite kujundamine .....	32
3.3 Etapp 1: Linna sademeveeüleujutuse riskipiirkondade tuvastamine .....	35
3.3.1 Valgalade või süsteemiosade piiritlemine.....	35
3.3.2 Riskipiirkondade tuvastamise sammud .....	36
3.4 Etapp 2: Äravoolusüsteemi mudelil põhinev sademeveeüleujutuse riski analüüs .....	41
3.4.1 Äravoolusüsteemi mudeli koostamine .....	41
3.4.2 Üleujutustundliku piirkonna riskianalüüsi läbiviimise sammud .....	43
3.5 Etapp 3: Riski hindamine .....	46
4 JUHTUMIUURING METOODIKA VALIDEERIMISEKS.....	48
4.1 Metoodika rakendamine Rakvere linnas .....	48
4.1.1 Rakvere linna kirjeldus.....	48

4.1.2 Etapp 1: Valgaladepõhine sademevee üleujutuse riski tuvastamine	
Rakveres .....	49
4.1.3 Etapp 2: Sademevee üleujutuse riskianalüüs Rakvere südalinnas .....	58
4.1.4 Etapp 3: Riskide hindamine .....	63
4.1.5 Tulemuste visualiseerimine riski hindamise lihtsustamiseks .....	65
4.2 Sademeveeüleujutuste riskihindamise meetoodika valideerimine ja piirangud ...	69
5 SADEMEVEE ÜLEUJUTUSRISKI HINDAMISE METOODIKA KASUTAMINE JA	
EDASIARENDUSVÕIMALUSED .....	71
KOKKUVÕTE .....	74
SUMMARY .....	77
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	80

## **EESSÕNA**

Minu magistritöö teema lähtub Tallinna Tehnikaülikooli linna veesüsteemide uurimisgrupi olulisest uurimisvaldkonnast – linnaline üleujutus. Olen magistriõpingute jooksul kõnealusel uurimisgrupis töötades, saanud osaleda mitmetes põnevates uurimisprojektides ja lõõnud kaasa erinevates algatustes. See kogemus on magistritöö kujunemisse olulise panuse andnud. Töö ülesehitamisel olen saanud rakendada ka oma varasemat töökogemust keskkonnakaitseametnikuna ning eelnevaid õpinguid linnaplaneerimise ja maastikuarhitektuuri vallas.

Käesolevas magistritöös tuginen olulisel määral linna veesüsteemide uurimisgrupi juhitud Interreg BSR NOAH projekti tulemustele. Töö ise saab olema lähtekohaks LIFE IP BUILDEST projektis hoonestatud keskkonna üleujutusrisiki kinnistupõhise käitlemise meetodika väljatöötamisel.

Magistritöös esitletava meetodika väljatöötamiseks ja testimiseks sain rakendada NOAH projekti raames koostatud ja kalibreeritud Rakvere linna äravoolusüsteemi mudelit, mille on koostanud ja valideerinud head kolleegid Nils Kändler ja Anatoli Vassiljev. Lähteandmete ning hea nõuga aitas tööle kaasa Rakvere Linnavalitsuse linnaarhitekt Angeelika Pärna. Töös seatud eesmärkidel sihi hoidmist aitas oluliselt suunata juhendaja Ivar Annus. Tema julgustusel esitasin ka töö põhitulemused artiklina suvel toimuvale CCVI-WDSA konverentsile ettekandeks (artikkel on hetkel retsenseerimisel). Suur tänu.

Võtmesõnad:

sademevee üleujutus, riskihindamise meetodika, üleujutusrisk, magistritöö

# 1 SISSEJUHATUS

Äärmuslikest vihmadest tingitud linnalised üleujutused on järjest ulatuslikum probleem. Viimase Valitsustevahelise Kliimamuutuste Nõukogu (IPCC) raporti hinnangul on suures osas maailmas ekstreemsetest sademetest ja sellega kaasnevatest tulvadest tulenevad riskid suurenemas [1]. Euroopa linnade jaoks on sademeveeüleujutused üheks suuremaks kliimamuutustega seonduvaks ohuks [2]. Seejuures ei avaldu kahjuks tõsiste tagajärgedega sademeveeüleujutused ainult kliimateadlaste tulevikuproгноosides. 2021 aasta juuli kuul Lääne-Euroopat tabanud vihasadude tagajärjel tekkinud äkktulvades kaotas elu enam kui 200 inimest, üleujutuste käigus hävisid kodud ja linnade olulised taristuobjektid ning tulvade tagajärjel tekkinud teesulud lõikasid väiksematel küladel päevadeks ära evakuatsiooniteed ja päästeteenistuse juurdepääsu [3].

Suureneva ohu mõistmiseks ja leevendamiseks on sademeveeüleujutuste keerulist tekkemehhanismi viimastel aastatel palju uuritud. Kui pikka aega kavandati linnade sademeveesüsteeme selleks, et kogu maapinnale sadanud vesi alati ja kiirelt ära juhtida, siis sagenevate valingvihmade ja piiratud ressursside tingimustes on vaja targemaid ja terviklikumaid lahendusi. Valikud, kas panustada kogukonna paremasse üleujutusvalmidusse, taristu säilenõtkuse suurendamisse või teha investeeringuid linnaruumi, on suure mõjuga strateegilised otsused, mis peaks põhinema võimalike ohtude ja nende leevendusvõimaluste alternatiivide süstemaatilisel hindamisel. Järjest enam kasutatakse selleks riskide juhtimise raamistiku [4], mistõttu ongi sademevee üleujutuste riskide hindamine järjest aktuaalsem uurimisteema, mida tajutakse väljakutsena üle maailma [5].

Riski üleüldiselt, mõistetakse mingi ebasoodsa sündmuse esinemise tõenäosusena või määramatuse mõjuna eesmärkidele [6]. Linnapiirkondade sademeveeüleujutuste kontekstis on riski mõiste täna üsna laialivalguv ja riskikäsitlus killustatud. Sagenevate valingvihmade ja muutuva linnaruumi tagajärjel tajutakse aga järjest suuremat vajadust sademevee üleujutuste riske süstemaatiliselt hinnata [7, 8]. Seejuures püsib riskikäsitlus aga ebamäärasena, sest sademeveeüleujutuste tekkemehhanismid on keerulised ning linnadel puuduvad piisavad alusandmed, et riske meetoodiliselt hinnata [9]. Selle tulemusena irdutakse riskide hindamise standarditest ja piirdutakse kogemuslike või subjektiivsete riskipiirkondade määratlusega.

Käesoleva töö eesmärgiks on pakkuda välja linnaliste sademeveeüleujutuste riski hindamise meetoodika Eesti linnadele, mis lähtub rahvusvahelise riskijuhtimisstandardi ISO 31000 [6] protseduuridest ja ÜRO Katastroofiohu Vähendamise Ameti (UNDRR)



riskikäsitlusest [10]. Lisaks üldisele meetodilisele raamistikule pakub töö välja meetodid ja andmeallikad riskiparameetrite kirjeldamiseks, lähtudes üheltpoolt sademeveeüleujutuse keerulisest tekkemehhanismist, aga ka linnade tänasest teadlikkusest ja valmidusest ning alusandmete kättesaadavusest. Väljapakutav meetodika jätab linnadele võimaluse kohaspetsiifilisi tegureid arvesse võtta.

Magistritöös väljatöötatud mitmetasandiline sademeveeüleujutuse riskide hindamise meetodika järgib eelviidatud riskijuhtimisstandardi kohaseid riskikaalutluse etappe ja läbib riskide hindamiseks ka eelnevad riskikaalutluse sammud - riski tuvastamise ja analüüsi. Pakutavad riskikaalutluse sammud on ka eraldiseisvalt rakendatavad, siiski on antud töö ülesanne esitada tervikprotsessi, kus riski hindamine toimub andmepõhiselt.

Töö koosneb kokku neljast sisupeatükist. Neist esimene tutvustab sademeveeüleujutuste riskihindamise parimaid praktikaid maailmas ja annab ülevaate teema käsitlusest Eestis. Teise peatüki moodustab väljatöötatud riskihindamise meetodika tutvustus ning kolmandas esitletakse pakutud meetodika rakendamist Rakvere linna sademeveeüleujutuse riskide hindamisel ning meetodika valideerimist. Neljas peatükk annab esmased järeldused võimalike rakendusala ja edasiarenduspotentsiaali kohta. Töö keskne osa, meetodikat kirjeldav peatükk, esitleb sademeveeüleujutuse riskide väljaselgitamiseks väljatöötatud mitmetasandilise riskikaalutluse protsessi etappe, nende eesmärgi ja väljundeid. Mitmetasandiline riskikaalutus on sisendiks erinevatesse otsustusprotsessidesse, mistõttu on pakutud välja lahendus, mis võimaldab riskikaalutlust lähtuvalt lähteandmete uuenedes kergesti korrata. Kolmas sisupeatükk näitlikustab riskimetoodika rakendatavust tegeliku linna üleujutusprobleemistikku arvesse võttes. Tuvastatakse Rakvere linna üleujutuse riskipiirkonnad, analüüsitakse täpsemalt kõige kõrgema riskitasemega süsteemiosas alamvalgalapõhiseid üleujutusriske ja nende tagajärgi. Saadud tulemustele tuginedes hinnatakse ühel tänavalõigul riski käitlusalternatiive. Meetodika väljatöötamisel on kasutatud Rakvere linnas varem väljatöötatud äravoolusüsteemi mudelit [11], arvutussimulatsioonid ning geopäringud on tehtud töö autori poolt.

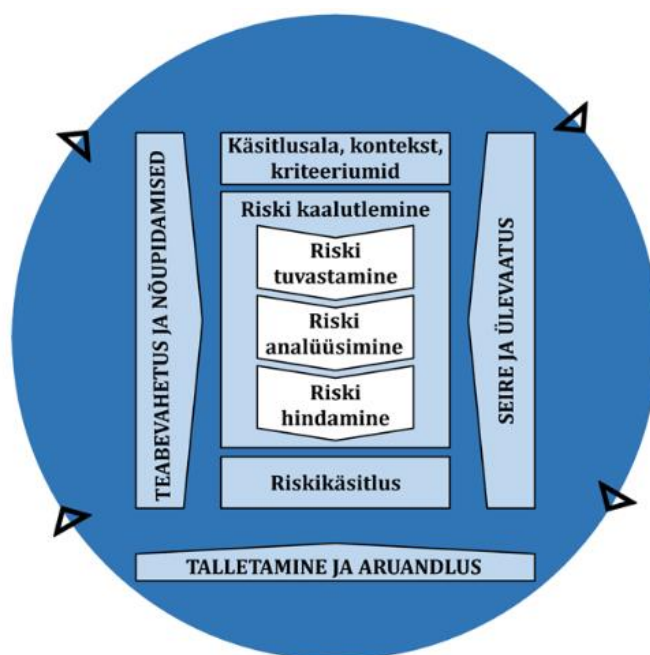
Nagu eelnevalt viidatud, seob meetodika rahvusvahelise riskijuhtimisstandardi UNDRR riskikäsitlusega. Nimetatud allikad, annavad pakutud meetodikale üleüldise raamistiku. Olulisel määral suunavad töös pakutavat ka kaks ulatuslikku teemakohast ülevaateartiklit, need on 2018. aastal avaldatud Rosenzweig *et al.* artikkel *Pluvial flood risk and opportunities for resilience* [7] ja 2022. aastal avaldatud Cea *et al.* artikkel *Flood Risk in Urban Areas: Modelling, Management and Adaptation to Climate Change. A Review* [4]. Töös pakutava meetodika analüüsietapi sisustamisel on oluliseks lähtekohaks 2021. aastal avaldatud Truu *et al.* töö *Integrated Decision Support System for Pluvial Flood-Resilient Spatial Planning in Urban Areas* [12].

## 2 LINNALISE SADEMEVEEÜLEUJUTUSE RISKI HINDAMISE METOODILISED ALUSED

### 2.1 Riski standardiseeritud käsitus ning selle rakendus sademeveeüleujutuse kontekstis

#### 2.1.1 Riskijuhtimise standard ja hädaolukorra riskide hindamise raamistik

Rahvusvaheline riskijuhtimise standard ISO 31000:2018 [6] kirjeldab riskijuhtimise raamistikku, põhimõtteid ja protsessi. Standardikohane protsess (Joonis 2.1) hõlmab käsitusala põhiste juhtpõhimõtete defineerimist, protsessi etappide institutsionaliseerimist organisatsiooni toimingutesse ning rakendatud riskijuhtimise mudeli (ja -metoodika) regulaarset seiret ja ülevaatus. Riski kaalutlemisel on olulised etapid 1) riski tuvastamine; 2) riski analüüsimine; 3) riski hindamine, mille põhjal leitakse sobivaimad lahendused riskikäsitluseks (vältimiseks, maandamiseks või kohanemiseks). Kirjeldatud standard annab riskijuhtimisele üldise raami, kuid pole spetsiifiline hädaolukordade käsitlemiseks ning on universaalsena kohaldatav kõikvõimalikele riskidele (s.h. äririskid, poliitilised riskid või siis keskkonnariskid). Käesolev töö ei vaata sademeveekäitluse riskijuhtimise kogu protsessi, vaid keskendub ennekõike riski kaalutlemise etappide sisustamisele.



Joonis 2.1 Riskijuhtimise protsess vastavalt standardile ISO 31000:2018

Standardi põhimõtetes tuuakse välja vajadus lähtuda parimast olemasolevast teadmisest ja protsessi järjepidevast kohandamisest ja täiustamisest. Riskide kaalutlemise kontekstis tähendab see seda, et ennekõike on oluline lähtuda käsitlusalale sobivatest meetoditest ja arvestada riskisituatsiooni muutuva iseloomuga.

Tavaolukorras on sademeveeüleujutus lühiajaline ebamugavus, kuid ekstreemsete valingvihmade tagajärjed võivad tuua kaasa hädaolukordi. Seega on põhjust sademeveeüleujutuse riski kirjeldamisel võtta aluseks UNDRR käsitlus [10]. See defineerib riski funktsioonina, mis võtab koostoimes arvesse ebasoodsat sündmust ehk ohtu (*hazard*), inimeste ja nende varade kokkupuudet tagajärgedega (*exposure*) ja nende haavatavust ohuolukorras (*vulnerability*). Olemuslikult vastavad need parameetrid sündmuse tõenäosusele, mõju ulatusele ja selle tugevusele. Ideena annab seda edasi valem 2.1.

$$\text{Risk} = \text{Oht} \times \text{Kokkupuude} \times \text{Haavatavus} \quad (2.1)$$

Viies need riskiparameetrid linnade sademeveeüleujutuse konteksti, on lihtne mõista, et tulevikus on kõigi riskiparameetrite puhul võimalik aimata ette kasvu – kliimamuutuste tagajärjel suureneb tõenäosus sagenevateks valingvihmadeks, linnastumise intensiivistumisel suureneb üleujutustega kokku puutuvate inimeste arv nagu ka tiheneva-areneva linna haavatavus ekstreemsete sadude suhtes.

Lisaks tüüpilistele riskiparameetritele on katastroofiohu kontekstis (sh üleujutuste puhul) põhjust riskide hindamises võtta arvesse ka leevendusmeetmete rakendamise võimekust. Üldistatud tasemel on üleujutusrisiki hindamisel kohanemisvalmiduse arvesse võtmise vajadus väljapakutud [13], kuid linnaliste sademeveeüleujutuste riskide hindamiseks pole sellist lähenemist veel rakendatud. Kohanemisvõimet arvestavat riski avaldist esitab valem 2.2 [13].

$$\text{Risk} = \frac{\text{Oht} \times \text{Kokkupuude} \times \text{Haavatavus}}{\text{Transformeerumisvõimekus} \times \text{Kaudne kohanemisvõimekus}} \quad (2.2)$$

Transformeerimisvõimekusena tuleb seejuures mõista võimalusi rakendada struktuurseid meetodeid (nt. investeeringud linnaruumi, sademevee äravoolusüsteemi rekonstrueerimine vms.). Kaudse kohanemisvõimekusena arvestatakse võimalusi leevendada üleujutusrisiki kaudsete meetoditega (nt teadlikkuse kasv, rahvatervise paranemine jms.).

$$\text{Riskiparameetrite indikaatorid} = \sum_{j=1}^n \text{Alamindikaatorid } (j) \quad (2.3)$$

Eeltoodud valemid kirjeldavad kontseptuaalselt hädaolukorrariski hindamise loogikat, kuid kirjeldades iga parameetri jaoks normaliseeritud indikaatorite süsteemi (2.3), on võimalik valemide 2.1 ja 2.2 kasutada riskifunktsioonina. Normaliseeritud indikaatoritel põhinev riskiindeks võimaldab hinnatava ala lõikes riskitaset võrrelda ning tulemusi erineval moel visualiseerida. Tavapärasemad riskitasemete esitlusviisid on: mõju-tagajärje riskimaatriksid, ohu-haavatavuse riskikõverad ning erinevad teemakaardid.

### **2.1.2 Hädaolukorra riskifunktsiooni arvesse võtvate sademevee üleujutuse riski hindamise meetodikate ülevaade**

Linnaliste sademeveeüleujutuste riski hindamine on kasvav uurimisvaldkond. Scopus allikahalduskeskkonda tehtud päring märksõnadele „*pluvial flooding*“ + „*risk assessment*“ väljastas käesoleva töö koostamise ajal kokku 88 artiklit, seejuures on aastas avaldatud uurimuste arv kasvanud 1 artiklilt 2010 aastal, 16 artiklini 2021 aastal [14]. Seejuures keskendub neist artiklitest valdav enamus spetsiifiliste riski määravate parameetrite uurimisele. Terviklikke riskimetoodikaid, mis vastavad UNDRR riskikäsitlemisele, pakkuvaid artikleid on oluliselt vähem (tabel 2.1). Rahvusvahelise riskijuhtimise standardile viitavad vaid üksikud tööd (näiteks [15]).

Tabelis 2.1 on ära toodud ülevaade olemasolevatest riskimetoodikatest, mis lähtuvad UNDRR riskifunktsioonist või kasutavad sarnast lähenemist ilma funktsioonile viitamata. Nagu näha, käsitlevad need riskimetoodikad väga erinevaid linnalisi piirkondi. Ohu-, kokkupuute- ja haavatavuse parameetrist lähtuvat riskivalemit on kasutatud väga väikeste külade üleujutusrisi hindamiseks [16, 17] aga ka tõeliste suurlinnade riskianalüüsil [18, 19]. Väga üldistatud tasemel on tehtud ka riikide üleseid analüüse [13], mis vaatavad ainult ekstreemvihmade mõju üleüldisele üleujutusriskile. See näitab küll, et sademeveeüleujutuse ohtu tajutakse võrdselt olulisena nii suurlinnades kui külades, kuid muudab kasutatavad meetodid ja riskianalüüsis saadud tulemused võrreldamatuks.

Suurlinnades rakendatud meetodikad võimaldavad leida kohad, kus üleujutus tekkida võiks, kuid saadud riskihinnangute tulemusel ei saa teha põhjanevaid järeldusi võimalike üleujutuste tagajärgede kohta. Selliselt tuvastatud üleujutusriskipiirkonnad on aga kasulik alusinfo planeeringuliste ja strateegiliste otsuste tegemiseks ning edasiste täpsemate uuringute kavandamiseks.

Tabel 2.1 Olemasolevate sademeveeüleujutuse riskikaalutluse metoodikate võrdlustabel

Metoodika	Vaadeldava ala iseloom ja pindala	Ohukäsitlus	Kokkupuute käsitlus	Haavatavuse käsitlus	Kohanemis-võimekus
Imamura, 2022 [13]	33 riiki Aasias (eritähelepanu mussoonpiirkondadele)	Sademetega prognoositud maksimum (ja mitmed teised muud liiki üleujutusi tingivad looduslikud ohutegurid).	Rahvastikutihedus, prognoositav rahvaarvu kasv, maakatte iseloom.	Erinevad sotsiaalmajanduslikud näitajad nt. korruptsiooniindeks, madala sissetulekuga inimeste osakaal jms.	Transformeerimis-võimekus: investeringud, reservuaaride pindala jms). Kaudne kohanemisvõimekus: kirjaoskus, sisemajanduse koguprodukt, rahvatervis jms.
Othmer et al. 2020 [16]	Olfen (Saksamaa), 53 km <sup>2</sup> , millest ~17% moodustab tihe-asustusala, ülejäänud linnalähipiirkond.	Ekstreemvihma tõenäosus koos maapinnamudeli ja pindmise voolu analüüsiga.	Ei käsitle	Hoonetele tekkida võiva kahju potentsiaal kaalutud elanikkonna tundlikkusega (vanuserühmapõhine).	Ei käsitle
Szewrański et al. 2018 [17]	Dobrzykowice (Poola), 5 km <sup>2</sup> . Külapiirkond, millest ~16 % on tiheasustatud	Ilmaprognoosile kohanduv ekstreemvihma ennustus-mudeliga kombineeritud pindmise äravoolu analüüs (DEM põhine).	Maapinna-lohkudesse koguneva vee sügavus (DEM põhine).	Hoonetele tekkiv kahju.	Ei käsitle
Di Salvo et al. 2018 [19]	Rooma (Itaalia), 1285 km <sup>2</sup> . Tiheasustus	Üleujutuse tõenäosus, mis põhineb ajaloolistel üleujutustel ja maapinna kõrgusmudeli analüüsil.	Ei käsitle	Hoonetele, teenustele, taristuelementidele ja võimalikele reostus-ohlikele piirkondadele ja pärandobjektidele tekkida võiv kahju	Ei käsitle
Sperotto et al. 2016 [18]	Veneetsia (Itaalia), 416 km <sup>2</sup> . Tiheasustus.	Piirkonnapõhine sademetega intensiivsuse kasvu prognoosi võrdlus projekteerimisel kasutatavate lävenditega.	Eluhoonete, ärihoonete ja taristu kokkupuuteala	Kalded. Vee läbilaskvus. Hiljutised üle ujutatud alad.	Ei käsitle

Seni avaldatud töödes on näha, et vaid vähesed võtavad arvesse kõiki riskivalemi parameetreid. Mitmetes töödes ([16, 19]) arvestatakse näiteks kokkupuuteala ohuparameetri ja haavatavuse osana. Töid analüüsid selgub, et väga erinevalt on käsitletud riski tekitavate parameetrite olemust. Näiteks on Veneetsia piirkonna üldise üleujutusrisi hindamisel [18] võetud maapinnamudel (so. kalded) ja maakattetüübid arvesse kui haavatavuse indikaator, samas kui valdav osa teistest uurimustest käsitleb neid näitajaid hoopis ohukäsitluse osana.

Ühe erandiga, ei võta analüüsitud tööde riskifunktsioonid eraldi parameetrina arvesse kohanemisvõimekust. Aasia riikide üleujutusrisi riskimetoodika [13] on kohanemisvalmiduse hindamisel põhjalik ja eristab selle alamindikaatoritena nii väga kaudseid näitajaid nagu kirjaoskuse projektsioon või rahvamajanduse prognoosid, aga ka väga spetsiifilisi näitajaid nagu suure mõjuga üleujutuskaitsemeetmete kavandamine. Suure üldistusega metoodikas, on mõnevõrra lihtsam hüljata kohanemismeetmete seosed teiste riskiparameetritega. Linnaülest hinnangute või veel spetsiifilisemate väiksemate valgalade põhisel analüüsil on aga kohanemise mõjude analüüsil oluline saada aru, mil määral muudavad kohanemismeetmed teiste parameetrite alamindikaatorite väärtust.

Kõigis vaadeldud metoodikates hinnatakse sademevee üleujutusrisi kaardianalüüsina, kus geoinfosüsteemide (GIS) kattuvusanalüüsi võimalusi kasutatakse nii riskiparameetrite identifitseerimisel kui nende koosmõju väljaselgitamisel.

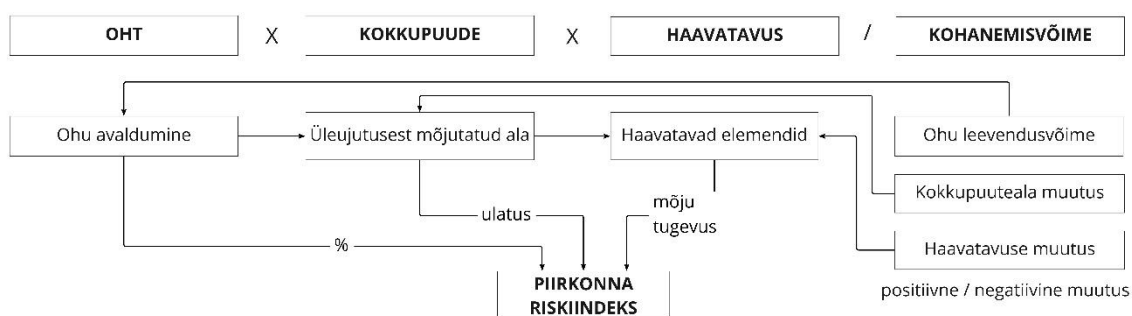
## **2.2 Sademeveeüleujutuse riskifaktorite mõõdikud ja nende modelleerimine**

### **2.2.1 Sademeveeüleujutuse riskifaktorite valiku alused**

Soovimatute sündmuste tagajärgede vältimiseks tehtavate strateegiliste otsuste tarbeks on vaja kaaluda erinevaid lahendusalternatiive, mille kohasus sõltub efektiivsusest negatiivseid mõjusid leevendada. Selliste strateegiliste otsuste tegemisel ongi heaks analüüsimeetodiks riskipõhine otsustamine, mida sademevee leevenduslahenduste planeerimisel järjest enam kasutatakse [4]. Sõltumata sellest, millist riskimetoodikat üleujutusrisi hindamiseks kasutatakse, põhinevad need sademeveeüleujutuse tekkemehhanismil ja võtavad arvesse üleujutuse tagajärjel tekkivat kahju. Seejuures on riskide hindamisel kasutusel mitmeid analüüsivõtteid, mis võtavad arvesse väga erinevaid faktoreid.

Kui punktis 2.1.1 kõrvutatud riskimetoodikate analüüsist selgus, et riskiparameetrite käsitles on suured erinevused, siis mitmed ülevaateartiklid [4, 7] ja ka Valitsustevahelise Kliimamuutuste Nõukogu (IPCC) riskihindamise juhismaterjalid [1], [20] on parameetrite tõlgendamisel omavahel paremas kooskõlas. Nii saab kokku võtta, et ohuparameeter väljendab ebasoodsa sündmuse (antud juhul valingvihma) avaldumise tõenäosust, haavatavuse parameeter hindab tekkida võivat kahju ja kokkupuuteparameeter mõõdab ohuolukorraga kokkupuutel tekkiva mõju ulatust. Kui Imamura [13] haaras oma üleujutusrisi funktsiooni (valem 2.2) eraldiseisvate parameetritena nii transformeerimisvõime kui kaudse kohanemisvõime, siis funktsiooni loetavuseks on need parameetrid käesolevas töös seotud edaspidi ühtseks kohanemisvõime parameetriga.

Riskiparameetrite analüüsil on vaja aru saada, et parameetrid on teineteisest sõltuvad (Joonis 2.2). Näiteks pole üleujutuse kokkupuuteala eraldiseisvalt määratav ja on eri ohutegurite (koos)ilmnemisel erinev. Eriti keeruliseks läheb parameetrite seoste arvestamine erinevate kohanemismeetmete hindamisel. Riskihinnangul tuleb nende seoste arvestamise või hülgamise osas teha otsuseid, mis sõltuvad analüüsi üldistustasemest ja eesmärgist.



Joonis 2.2 Sademeveeüleujutuse riskiparameetrite koostoime lihtsustatud skeem

Parameetrite vaheliste seoste mõistmise kõrval on riskiparameetrite valikul vaja arvestada ka analüüsi ajalise vaatega. Riskistsenaariumeid valides ja kujundades on vaja otsustada, kas riskikäsitus lähtub tänasest ohuhinnangust või vaatab kaugemasse tulevikku. Juhul kui ohuallikatena soovitakse arvesse võtta tuleviku kliimat, on vajalik tuleviku kliimastsenaariumid teisendada ja taandada kohalikule tasandile (Joonis 2.3 Tüüpiline metodoloogiline käsitus tuleviku ohuhinnangu määratlemiseks [21])[21]. Lisaks sellele on vaja otsustada, kas tulevikuohutused hinnatakse tänaste ruumiliste parameetrite ja sotsiaalmajandusliku olukorra kohta või modelleeritakse ka nende muutust.



Joonis 2.3 Tüüpiline metodoloogiline käsitlus tuleviku ohuhinnangu määratlemiseks [21]

Lähtuvalt teema keerukusest, kasutatakse linnaplaneerimises jätkuvalt palju ajalooliste sündmuste tagajärgedel põhinevat sademeveeüleujutuse riskikäsitlust. See on üsna tavapärane praktika Eesti linnades (käsitletud põhjalikumalt käesoleva töö punktis 2.3), kuid samasugust varasemate sündmuste kaardistusel põhinevat riskikäsitlust kohtab ka mujal riikides [22, 23]. Arvestades valingvihmade keerulist ja seejuures dünaamilist iseloomu ja muutuvat linnaruumi, on aga selline käsitlus ebapiisav tulevikuriskide mõistmiseks [4, 7, 15]. Seetõttu on sademeveeüleujutuste riskide hindamisel saanud tavapraktikaks üleujutusrisi määravate hüdrodünaamiliste näitajate modelleerimine.

### 2.2.2 Sademeveeüleujutuse ohuallikad

Lihtsustatult võttes tingivad sademeveeüleujutuse ohu looduslikud ja inimtekkelised tegurid. Rosenzweig et al. 2018 [7] defineerib linnaliste üleujutuste riskide hindamisel ohuparameetrina ebasoodsat sündmust põhjustava olukorra tõenäosuse ja toob välja tegurid, mida näiteks kliimamuutuste kontekstis ohuallikatena käsitleda. Need tegurid on ülevaatlilikuna esitatud **Error! Reference source not found.**

Nagu näha tabelist 2.2 määrab linnalise sademeveeüleujutuse ohu eelkõige ekstreemvihma esinemise tõenäosus. Lisaks sellele on rida tegureid, mis aitavad kaasa sademeveeüleujutuse tekkele. Lähtuvalt analüüsitava piirkonnast võivad nende tegurite olulisused hindamisel erineda. Ekstreemvihma esinemise tõenäosust on olemasolevates riskimetoodikates arvesse võetud erinevalt – ohuparameetrite defineerimisel on lähtutud nii ilmaprognoosist [17] kui ka standardvihmadest [16]. Eesti oludes on antud parameetri baasnäitajana kohane rakendada Väliskanaliseerimisvõrgu standardi EVS 848:2021 [24] korduvust ja intensiivsusust, mis lähtuvad projekteeritava/analüüsitava ala iseloomust. Globaalsele kliimastsenaariumile tuginevat arvutusvihma iseloomu saab tuletada suurendades standardvihmade näitajaid kliimastsenaariumite tunnuste alusel [25]. Kohalikule tasandile taandatud kliimamudelile tuginevat arvutusvihma Eesti oludes hetkel veel riskianalüüsi tarbeks kasutada pole võimalik, kuna täna sellised mudelid puuduvad.



Tabel 2.2 Ohuparameetrid ja nende olulisus sademeveeüleujutuse riskihinnangus [7]

<b>Ohuparameetrit mõjutavad tegurid</b>	<b>Olulisus riskihinnangus</b>
Ekstreemsete sadude esinemise tõenäosus	Põhiparameeter
Sademevee äravoolusüsteemi suublatena kasutatavate looduslike veekogude veetaseme muutuse tõenäosus	Koosmõju
Pikaajaliste kuumalainete tõenäosus	Koosmõju
Pikaajaliste sadude tagajärjel pinnase küllastumine	Koosmõju
Süsteemi häiringud	Koosmõju

Enamikes linnades on sademeveeüleujutused rohkemal või vähemal määral seotud ka pinnaveekogude üleujutustega. Suublate veetase mõjutab otseselt äravoolusüsteemi toimivust, nagu mõjutab ka pinnaveekogude veetase suuremas mõjualas pinnase infiltratsioonivõimet. Seega on põhjust võtta arvesse veekogude hüdroloogilist režiimi ja üleujutusohu tõenäosust. Siin saab üleujutuste koosmõju analüüsiks edukalt kasutada Euroopa Ühenduse Üleujutusdirektiivi riskihindamise meetoodika [26] kohast üleujutuste esinemise tõenäosust.

Pikaajaliste kuumalainete tagajärjel toimub pinnase paakumine, mille tagajärjel väheneb pinnase infiltreerimisvõime. Pikaajaliseks kuumalaineks saab lugeda enam kui 10-päevased tsükli [1], kusjuures temperatuurimääratlus, mis liigitub kuumapäevaks on alati lokaalne. Eestis on määratud kuumapäevadeks päevad, kus ööpäeva kõrgeim temperatuur on 25°C või enam [27]. Kuumatsükli tekkimist ja esinemise tõenäosust saab modelleerida [28], kuid keerulisem on olukord koosmõju väljaselgitamisega. Sissejuhatuses viidatud 2021. aastal Lääne-Euroopat tabanud üleujutuste üks algpõhjus oli see, et enne ekstreemseid valingvihmasid oli piirkonnas kestnud pikalt sadude periood ja pinnas oli juba veest küllastunud [3]. Seega võib sademevee ohuolukorra kirjeldamisel saada ka määravaks pikaajaliste sadude tagajärjel pinnase infiltreerimisvõime vähenemine. Pinnase infiltreerimisvõimet arvesse võttev ohumudel on eriti oluline linnadele, kus äravoolusüsteemis domineerivad immutusosalad.

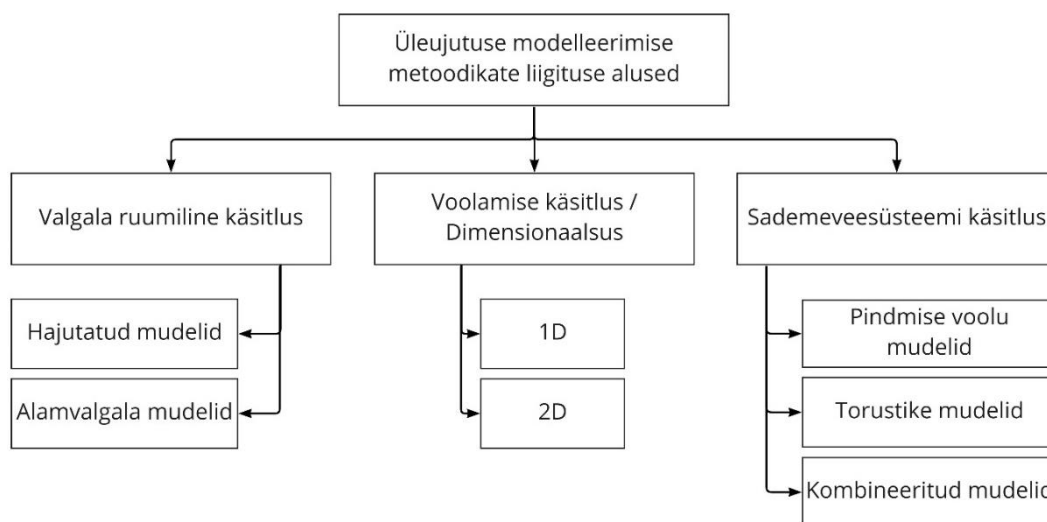
Lisaks looduslikele ohuolukordadele on põhjust arvestada ka inimtekkeliste ohuolukordadega, nagu näiteks sademeveesüsteemi häiringud (nt ummistused, süsteemirikked) ja nende esinemise tõenäosus. Analüüsitud uurimistöodes seda ohuindikaatorit pole enamasti arvestatud, kuid arvestades, et linnade äravoolusüsteemid toimivad täna suures osas oma projekteeritud eluea piiril [29], on inimtekkelised tehniliste rikete avaldumistõenäosust põhjust riskihinnangus arvesse võtta. Seda võimaldab näiteks Väliskanalisatsiooni standardis kirjeldatud parameeter hüdroloogiline risk, mis avaldub läbi standardvihma korduvuse ja projekteeritud rajatise

tööea [24]. Mõnes mõttes võiks sademeveeüleujutuste tekkemehhanisme arvesse võttes liigitada ohuallikaks ka ennustatava linna tihenemise ja sellest tingitud vett mitteläbilaskvate katendite osakaalu suurenemise, kuid käesolevas töös käsitletakse seda kohanemisvõimekuse osana ja ohuallikana kirjeldatakse väliseid mõjusid, mille juhtimise/ärahooldamise võimalused on piiratud.

### 2.2.3 Sademeveeüleujutust defineerivate hüdrodünaamiliste näitajate modelleerimine

Üleujutusrisiki määravateks faktoriteks on erinevad hüdrodünaamilised näitajad, näiteks üleujutusala territoriaalne ulatus, veesügavus, voolukiirus süsteemis, üleujutuse kestvus, veetõusu kiirus [30]. Neile näitajatele saab seada lävendid, millest alates on põhjust rääkida ebasoodsast sündmusest, millel on mõõdetavad negatiivsed tagajärjed [4]. Nii tekib riskihinnangu tase ebasoodsa sündmuse tõenäosuse ja tagajärje seosest, mida saab visualiseerida haavatavuse-kahju kõveraid kasutades [31] või riskimaatriksil esitledes [32].

Terviklikul riskikäsitlusel on põhjust modelleerida nii muutuvat kliimat, kui ka linnakeskkonna muutuseid (so. arengustsenaariumeid vms.), kuid määravaks saab eelmainitud hüdrodünaamiliste näitajate modelleerimisel. Joonisel 2.4 on kirjeldatud alused, mille järgi sademevee üleujutuse modelleerimise meetodikaid liigitatakse.



Joonis 2.4 Üleujutuse modelleerimismeetodite liigituse alused, kohandatud [33]–[36] põhjal

Meetodite valik sõltub ennekõike vaadeldava sündmuse tekkepõhjustest, aga ka kasutada olevatest andmetest ning meetodi rakendajate algteadmistest. Kuigi antud töö

eesmärgiks ei ole analüüsida erinevaid modelleerimismeetodeid, on oluline saada aru mudelite otstarbest ja nende rakendamise piirangutest.

Ruumilises käsitluses on nii hajutatud mudeleid, mis uurivad üleujutuse teket mingis etteantud kaardiruudustikus, kui ka alamvalgala mudelid, mis hindavad üleujutuse tekkemehhanismi, eelpiiritletud valgala tunnustele tuginedes. Mudelite dimensionaalsuse erinevus seisneb voolamise käsitluses tehtud lihtsustustel. 1D mudelis võetakse arvesse voolamist torus või voolusängis ning uuritavad parameetrid taandatakse kindlale ristlõikele. 2D modelleerimine võtab arvesse vee valgumist mitmes suunas, st. sademevee üleujutusel võetakse arvesse maapinnamudel. Pindmise voolu mudelid hõlgavad torustikus toimuva voolamise, torustiku mudelid ei arvesta jällegi infiltratsioonist ja valgala reljeefist tingitud äravooluga. Kombineeritud mudelid on keerulised ja haaravad nii sademeveesüsteemi komponendid kui arvestavad infiltratsiooni ja valgala loomuliku äravooluga. Lisaks eelkirjeldatud liigitustele eristab modelleerimisvõtteid veel matemaatiline keerukus. Siin saab eristada puhtaid dünaamilise voolamise mudeleid, või ühendmudeleid, mis hõlmavad lisaks hüdrodünaamilistele parameetritele ka hüdroloogilisi. On olemas rakuautomaatidel põhinevaid mudeleid, seoste ja iteratsioonide uurimiseks ning lihtsamaid GIS põhiseid modelleerimismeetodeid [23].

Modelleerimismeetodi valikul on vaja kaaluda analüüsivõimekust (sh. nii analüüsi läbiviivate spetsialistide oskusi kui ka kasutada olevat arvutusvõimsust) ning kättesaadavaid andmeid. Oluline on defineerida, milliseks riski kaalutlemise etapiks modelleerimist vaja rakendada on – kas modelleerimisega alles tuvastatakse võimalikke riskialasid või on vaja modelleerimist kasutada juba hinnatud riskiolukorra leevenduslahenduste otsimiseks. Joonis 2.5 näitab mudelite sobivust lähtuvalt arvutuse täpsusest, arvutusajast ja sobivast ruumilisest skaalast.

Mudeli tüüp	Üleujutus riskihinnangu täpsus	Arvutusaeg	Sobiv ruumiline skaala
1D pindmise voolu mudel	Madal ↓ Kõrge	Mõni minut ↓ Mitmeid tunde	Makroskaala ↓ Mikroskaala
1D torustiku mudel			
1D - 1D kombineeritud mudel			
2D pindmise voolu mudel			
1D - 2D kombineeritud mudel			

Joonis 2.5 Sademevee üleujutuse modelleerimismeetodite võrdlus [34]

Eelnevas punktis vaadeldud riskimetoodikad on võtnud arvesse vaid pindmise voolu mudeli, tehes lihtsustuse, et üleujutuse käigus on sademeveetorustik terves ulatuses täistäitel.

## 2.2.4 Linnaruumi haavatavus sademeveeüleujutuse olukorras

Linnaruumi sademeveeüleujutuste haavatavuse hinnangud erinevad hinnatava linna põhiselt. Suure raamistiku haavatavuse parameetri käsitluseks saab Euroopa Ühenduse Üleujutusdirektiivist [26]. Üleujutusdirektiiv defineerib üleujutusrisiki kui „*üleujutuse tõenäosuse koos üleujutuse võimalike kahjulike tagajärgedega inimeste tervisele, keskkonnale, kultuuripärandile ja majandustegevusele*“. Kuigi antud direktiiv ei keskendu sademeveeüleujutustele, saab direktiivis antud üldisest definitsioonist hästi tuletada haavatavad valdkonnad (tabel 2.3).

Tabel 2.3 Haavatavuse valdkonnad ja probleemistik, mille põhjal on võimalik tuletada alamindikaatorid

<b>Valdkond</b>	<b>Alamindikaatoreid kirjeldavad probleemistik</b>
Majanduslik haavatavus	Üleujutuse poolt tekitatav negatiivne mõju taristule; Üleujutuse tõttu tekkivad häiringud teenuste pakkumisel: ühistransport, võrguteenused vms.); Üleujutuskahjud majandussektoritele (põllumajandus vms.).
Sotsiaalne haavatavus	Rahvastikutihedus; Sotsiaalse haavatavuse indeks (SoVi vms) [41]; Juurdepääsetavuse tagamine kriitilistele objektidele.
Kultuuriline haavatavus	Muinsuskaitsealuste ja miljööväärtuslike alade/objektide kahjustamine;
Keskkonna haavatavus	Üleujutuse kokkupuute mõju reostusallikatega; Looduskaitsealustel väärtuslike alade kahjustamine, liikide elupaikade häving; Süsteemi toimivusest lähtuv reostusoht (ühisvoolne või lahkvoolne süsteem).

Haavatavuse parameetri mõõdikuks on mõju olulisus, mida on võimalik hinnata erinevate meetoditega. Mõju olulisuse määramisel on palju kasutatud indeksite skaalasid, mis põhinevad varem toimunud üleujutuste tagajärgede hinnangutel [37, 38, 39]. Samuti on kasutusel ka lihtsad sotsiaalmajanduslikud indikaatorid (nt rahvastikutihedus vms.), kuid need on saanud viimasel ajal kriitikat. Ajalooliste sündmuste analüüsid on näidanud, et tegelikus olusituatsioonis sõltuvad tagajärjed

pigem sotsiaalselt haavatavate elanike (erivajadusega inimesed, kirjaoskamatud vms) osakaalust piirkonnas [37]. Nii ongi kasutusele võetud mitmeid keerulisemaid ühiskonda iseloomustavaid indekseid, nt USAs üleriigiliselt kasutusel olev sotsiaalse haavatavuse indeks (SoVI) [40, 41].

Ka teistes haavatavuse valdkondades on tuletatud erinevaid näitajaid, mida mõju olulisuse hindamisel arvesse võtta. Näiteks üleujutuse poolt tekitatavat negatiivset mõju taristule saab analüüsida lähtuvalt taristu eripärast ja kasutamise spetsiifikast. Hoonete haavatavust võib hinnata lähtuvalt tekkida võivast kahjust, mis sõltub piirdetarindites kasutatud materjalidest, hoonetes kasutatavatest tehnosüsteemidest ja ka sellest kas hoones on üleujutuskaitseks kasutusel aktiivsed või passiivsed vastumeetmed [42, 43, 44]. Enamasti puuduvad selle kohta piisavad andmed, et linnaülest haavatavust analüüsida. Selle probleemi ületamiseks on võimalik küll kitsama valimi põhjal väljaselgitatud näitajaid muude tunnuste põhjal laiemale territooriumile laiendada, kuid sellised meetodid eeldavad spetsiaalseid uuringuid ja ekspertanalüüsi. Antud teemas on suur potentsiaal kindlasti ehitatud keskkonna digikaksikute andmete täiustumisel, kus näiteks hoonete üleujutustundlikkust kirjeldavad parameetrid saaks andmebaasist väljavõtena riskiindikaatoritesse kaasata.

Lisaks kogemuslikele skaaladele saab teatud tagajärgi hinnata ka kulu-tulu analüüsi meetodeid kasutades [45]. Kuigi kulu-tulu analüüsi meetoditega on võimalik rahaline väärtus määrata ka turuhinnata objektidele, on meetodi rakendatavus sotsiaalse, kultuurilise ja keskkonna haavatavuse osas siiski küsitav.

Tulevikuriskide analüüsil on lisaks hüdrodünaamiliste näitajate modelleerimisele oluline prognoosida ka tulevikustsenaariumites muutuvat haavatavust. Siin peab arvesse võtma sotsiaalmajanduse valdkonda liigituvaid mudeleid, mis on väljaspool käesoleva töö mahust. Kuigi üleujutuse haavatavuse temaatikale keskenduvate uuringute hulk on hüppeliselt kasvanud, on valdkond jätkuvalt arengujärgus [4].

### **2.2.5 Tulevikuriskide hindamine lähtuvalt linnade võimekusest kohaneda tulevikuriskidega**

Sademevee üleujutusrisiki baasstsenaariumi hindamine ei eelda kohanemisvõimekuse arvestamist, kuid kohanemisvalmidus on oluline niipea, kui riski hindamise tulemusena soovitakse rakendada vastumeetmeid ning soovitakse eelhinnangut nende tulemuslikkusele. Samuti saab see oluliseks, kui linnaruumis on planeeritud arengud, mis võivad üleujutusrisiki suurendada. Kohanemismeetmete rakendamisega muutub kas

kokkupuuteala või haavatavus (Tabel 2.4). Ohuparameetri mõjutamist linnapõhiste vastumeetmetega antud töös tõenäoliseks ei peeta, inimõju kliimamuutuste avaldumisele kajastub juba riskistsenaariumit määravas kliimaprojektsioonis. Imamura [13] võtab arengu- ja kohanemisvalmidust arvesse suure üldistusega ja hülgab seosed teiste riskiparameetritega. Seda aga ei tohiks teha linnaülese riskihinnangu koostamisel.

Tabelis 2.4 on toodud erinevad valdkonnad, mis kohanemisvõimekust mõjutavad. Tuleviku kohanemisvõimekus sõltub väga konkreetsetest üleujutuskontrolli meetmetest, näiteks linna sademevee äravoolusüsteemi rajatud kontrollmahutite ja viibetiikide rajamise plaanidest või muudest meetmetest, millega saab üleujutuse tekkimise ohtu piirata. Samuti sõltub linna kohanemisvõimekus tuleviku üleujutusega muutuva linnaruumi iseloomust (täisehitatud alade laienemine või nõuded rohealade loomisele). Kohanemisvõimekusesse panustab ka muutuv ühiskond. See küll ei määra ära üleujutuse kokkupuuteala, aga saab mõjutada linna haavatavust toimuvate üleujutuse suhtes.

Tabel 2.4 Kohanemismeetmete mõju sademeveeüleujutuse kokkupuutealale ning linnaruumi haavatavusele

<b>Kohanemis- võimekuse valdkond</b>	<b>Mõju kokkupuutealale</b>	<b>Mõju haavatavusele</b>
Üleujutuskontrolli meetmed	Äravoolusüsteemi rekonstrueerimine või väljaehitamine; Kontrollitud üleujutusosalad linnas; Veetaseme reguleerimine süsteemis.	Hoonepõhised meetmed (hoonete rekonstrueerimine üleujutuskindlate materjalidega, sokli kõrguse nõue vms.); Hoiatussüsteemide rakendamine;
Muutuv linnaruum	Sillutatud pinna osakaalu muutmine; Valgalade hüdroloogilise režiimi ja toimivuse muutmine nt. vertikaalplaneerimisega;	Reostusohlike objektide paiknemise muutumine; Kultuuri- või loodusväärtuslike objektide lisandumine/hävimine.
Muutuv ühiskond	-	Linnaarengu mõju demograafilistele näitajatele.

## **2.3 Sademeveeüleujutuste riski hindamine Eesti linnades ja üleujutusriskile rakendatavad riskitasemed**

Euroopa Liidus kehtib alates 2007. aastast Üleujutusdirektiiv [26], mille eesmärk on anda liikmesriikidele üleujutusriski hindamise ja maandamise raamistik. Üleujutusdirektiivi poolt antavad juhised hõlmavad jõgede veetaseme tõusuga, mägedest tuleneva tulvaveega ja rannikualadel merevee taseme tõusuga kaasnevaid üleujutusi. Direktiiv ei sea liikmesriikidele kohustust hõlmata riskihindamisse kanalisatsioonisüsteemidest tingitud üleujutusi. Üleujutusdirektiivi raamistik on Eestisse kohaldatud aastast 2009, mil Veeseadusesse [46] integreeriti temaatiline peatükk. Esmane terviklik hindamine viidi läbi 2011. aastal, pärast mida on üleujutuse riskihinnanguid täpsustatud 2018. aastal [47]. Üleujutusdirektiivi hindamiskohustust viib ellu Keskkonnaministeerium koostöös teiste ametkondadega ja üleujutuste riskikaardid on hästi teada ja aktiivselt kasutatavad läbi Maa-Ameti kaardiportaali [48].

Sademeveeüleujutuste osas süsteemseid linnaüleseid riskikaarte Eestis seni koostatud ei ole. Kombineeritud sademevee strateegia [49] kirjeldab riskipiirkondade kaardistamisel üleujutusdirektiivi metoodikat ja ei anna sademeveeüleujutuste riskimetoodikaks täpsustatud juhiseid. Sõltuvalt probleemi teravusest ja linnade võimekusest, on sademeveest tingitud üleujutuste probleemistikku Eestis siiski mõnevõrra analüüsitud ja seda ka erinevates vormides esitletud. Näiteks on varasemate sündmuste põhjal valingvihmade poolt ohustatud alasid kogemuslikult piiritletud ja esitatud üldplaneeringu kaartidel, probleemipiirkondi on kirjeldatud ühisveevärgi ja kanalisatsiooni arengukavades või on koostatud eraldiseisvaid uuringuid. Ülevaate teema käsitlemisest Eesti suuremates linnades annab Tabel 2.5, mis on koostatud linnade põhiliste valdkondlike arengudokumentide läbitöötamise tulemusena.

Väheste linnade üldplaneeringutes tuuakse välja sademeveeüleujutuse riskipiirkonnad seades tundlikele aladele projekteerimistingimused (nt. Tartu, 2021 [50]). Enamasti räägivad üldplaneeringud siiski sademevee käitluse strateegilistest suundadest riskipiirkondi eraldi välja toomata. Mõned vanemad üldplaneeringud teevad üldistusi vaid sademevee probleemi lahendamiseks, täpsustamata, mida see tähendab (nt. [51]). Suuremad linnad on koostanud eraldi sademevee strateegiadokumentid (nt. Tallinn [52], Pärnu [53]). Seejuures on näiteks Pärnu sademevee strateegias riskianalüüsina toodud hoopiski sademeveestrategiega elluviimise riskid – nt. finantsriskid, õigusriskid ja keskkonnariskid [53]. Sademevee strateegiad kirjeldavad põhjalikult enamasti ajalooliste üleujutuste põhjal välja kujunenud probleemalasid. Ühisveevärgi ja kanalisatsiooni arengukavades (ÜVKA) kajastatakse samuti teemat enamasti pigem üldise probleemina, nt. Tartu ÜVKA [54]: „Mõnes kohas on torustikud liiga väikese

*läbimööduga (tegemist on nn "pudelikaeladega") ning ei suuda sademevett valingvihmade ajal läbi lasta, mistõttu võib suure saju ajal madalamates kohtades, aga ka omavoliliste sademevee liitumiste tõttu, tekkida uputusi."* Mitmete linnade ühisveevärgi- ja kanalisatsiooni arengukavad viitavad aga teemale vaid kaudselt viitena üleujutusdirektiivi riskide hindamise kohustusele (nt. Rakvere [55] ja Narva [56]).

Linnade arengukavades, sh. ka eriotstarbelistes kliimakavades, tuuakse välja vajadus valingvihma tagajärjel tekkivate sajuvee üleujutuspiirkondade täpsustamiseks (nt. Tartu [60]). Linnad näevad vajadust omada ajakohast ja süstematiseeritud andmestikku sademevee kokkuvoolu piirkondade toimimisest/mittetoimisest, mida saaks rakendada planeerimise ja tehniliste projektide lähteülesannete ja projekteerimistingimuste väljastamisel ajakohase ja andmepõhise otsustustööriistana. Sõltuvalt linnade suuruselt ja administratiivsest võimekusest erineb oluliselt nende teadlikkus linna sademeveesüsteemide toimimisest.

Valdavalt on linnad valingvihmaüleujutuste suurenevast riskist teadlikud ning lähtuvad linnaplaneerimisel väliskanalisatsioonivõrgu standardi nõuetest ja üldisest ettevaatusprintsipiist (rohealade osakaalu nõue jms.). Väliskanalisatsioonivõrgu standardis [24] eristatakse sademeveest tingitud üleujutusi (jaotis 5.4.4.5), mille vältimise meetmeloetus toob standard välja vajaduse määratleda riskiga piirkonnad ja alad. Seejuures antakse standardis meetod kuni 100 ha suurustel valgaladel sademevee arvutusäravoolu leidmiseks ja tippvooluhulga määramiseks ning juhised arvutusvihma / kokkuvooluaja valikuks. See meetod, nagu eespool öeldud, on sobiv ennekõike väikeste süsteemiosade toimivuse hindamiseks, kuid ei ole mõeldud ülelinnaliseks riskihinnanguks. Standard annab soovitusi suuremate valgalade arvutusäravoolu leidmiseks süsteemide modelleerimise teel. Siin osutuvad barjääriks linnade andmevajadused geoinfosüsteemis ja vähene võimekus olemasolevate süsteemide seiramiseks, mis kumbki ei soosi linnaüleste sademeveemudelite koostamist [71].

Siiski on mitmed linnad koostanud sademeveeprobleemistiku lahendamiseks suuremate piirkondade üleseid projektlahendusi, sh. ka selliseid, mis põhinevad äravoolusüsteemi mudelitel (nt. Tallinnas, kesklinna ühisvoolsete valgalade osas [59] ja Maardus, Muuga elamupiirkonnas [68]). Analüüsitud linnades sademeveeüleujutuse linnaülest riskianalüüsi koostatud pole. Projektipõhiselt on loodud mudelipõhiseid otsustustööriistu valitud pilootaladele (näiteks NOAH projektis Haapsalus ja Rakveres [11]), aga need pole laialdast kasutust veel leidnud.



Tabel 2.5 Sademeveeüleujutuse probleemkohtade ja/või riskipiirkondade analüüs ja esitamine valitud Eesti linnades (>15 000 elanikku).

Linn	Rahvaarv [57]	Pindala (km <sup>2</sup> )	ÜP	ÜVKA	Eraldiseisev uuring / analüüs linnalise sademeveest tingitud üleujutusrisi hindamiseks	ÜVKA näeb vajadust süsteemse sademevee üleujutuse riskihindamise järel
Tallinn	438 341	158	<b>T</b> [58]	<b>T, K</b> [59]	Tallinna sademevee strateegia [52]	Kavandatud meede
Tartu	91 407	39	<b>T</b> [50]	<b>Ü</b> [54]	Tartu Kliimakava [60]	Kavandatud meede
Narva	53 424	69	-[61]	<b>Ü</b> [56]	Pole teada	Üldine viide üleujutusdirektiivile
Pärnu	38 347	32	<b>Ü</b> [62]	<b>Ü</b> [63]	Pärnu sademevee strateegia [53]	Kombinatsioonis rannikuüleujutusega
Kohtla-Järve	32 577	69	<b>Ü</b> [51]	<b>Ü</b> [64]	Pole teada	Üldine viide üleujutusdirektiivile
Viljandi	16 875	15	-[65]	<b>Ü</b> [66]	Pole teada	Ei ole kajastatud
Maardu	15 284	23	<b>T</b> [67]	<b>T</b> [68]	Pole teada	Ei ole kajastatud
Rakvere	14 984	11	- [69]	<b>Ü</b> [55], [70]	Kesklinna piirkonna ekstreemne ilmastikukiht, 2021 [11]	Üldine viide üleujutusdirektiivile

Tähistus:

ÜP – üldplaneering;

ÜVKA– ühisveevärgi ja kanalisatsiooni arendamise kava;

Konkreetsed sademeveeüleujutuse riskipiirkonnad on esitatud **T** - tekstis; **K** – kaardil; **Ü** - töös ei ole välja toodud konkreetseid piirkondi, mis on regulaarselt valingvihmade tagajärjel üle ujutatud, või saavad seda olema tulevikus, kuid teema on üldistatud kujul lahti kirjutatud

Eestis rakenduva üleujutusdirektiivi riskihindamise meetodika kohaselt eristatakse „olulist“ ja ebaolulist riski, mis määratakse lähtuvalt sellest, kas üleujutusala jäävad teatud tingimustele vastavad objektid. See tähendab, et oluline on üleujutus, mis takistab operatiivteenuste tööd, kahjustab keskkonnaohtlikku rajatist, rangelt kaitstava liigi elupaika, kultuuriväärtust või seab reaalsesse ohtu inimese elu ja tervise [47]. Siseministri määrusega (RT I, 22.06.2017, 15) kehtestatud Hädaolukorra riski hindamise nõuded ja riskianalüüsi koostamise kord [72] järgi on riskiskaala laiem ja haarab viite taset, kattes sündmuse tõenäosuse ja tagajärgede kombinatsioone analüüsides madalat kuni väga kõrget riski (Joonis 2.6 2.6). Määruses viidatud hädaolukorra riskianalüüsi juhised rakendub küll erinevatele päästesündmustele, kuid autorile teadaolevalt ei ole seni Eesti linnades selle kohaselt sademeveeüleujutusi käsitletud.

		TAGAJÄRG				
		vähetahtis (1)	kerge (2)	raske (3)	väga raske (4)	katastroofiline (5)
TÕENÄOSUS	Väga suur (A)	keskmine	oluline	kõrge	väga kõrge	väga kõrge
	Suur (B)	Keskmine	oluline	oluline	kõrge	väga kõrge
	Keskmine (C)	madal	keskmine	oluline	kõrge	kõrge
	Väike (D)	madal	keskmine	oluline	oluline	kõrge
	Väga väike (F)	madal	madal	keskmine	oluline	kõrge

Joonis 2.6 Siseministri määruses „Hädaolukorra riski hindamise nõuded ja riskianalüüsi koostamise kord“ esitatud riskitasemete maatriks [72]

# **3 LINNADE SADEMEVEEÜLEUJUTUSE RISKI HINDAMISE METOODIKA**

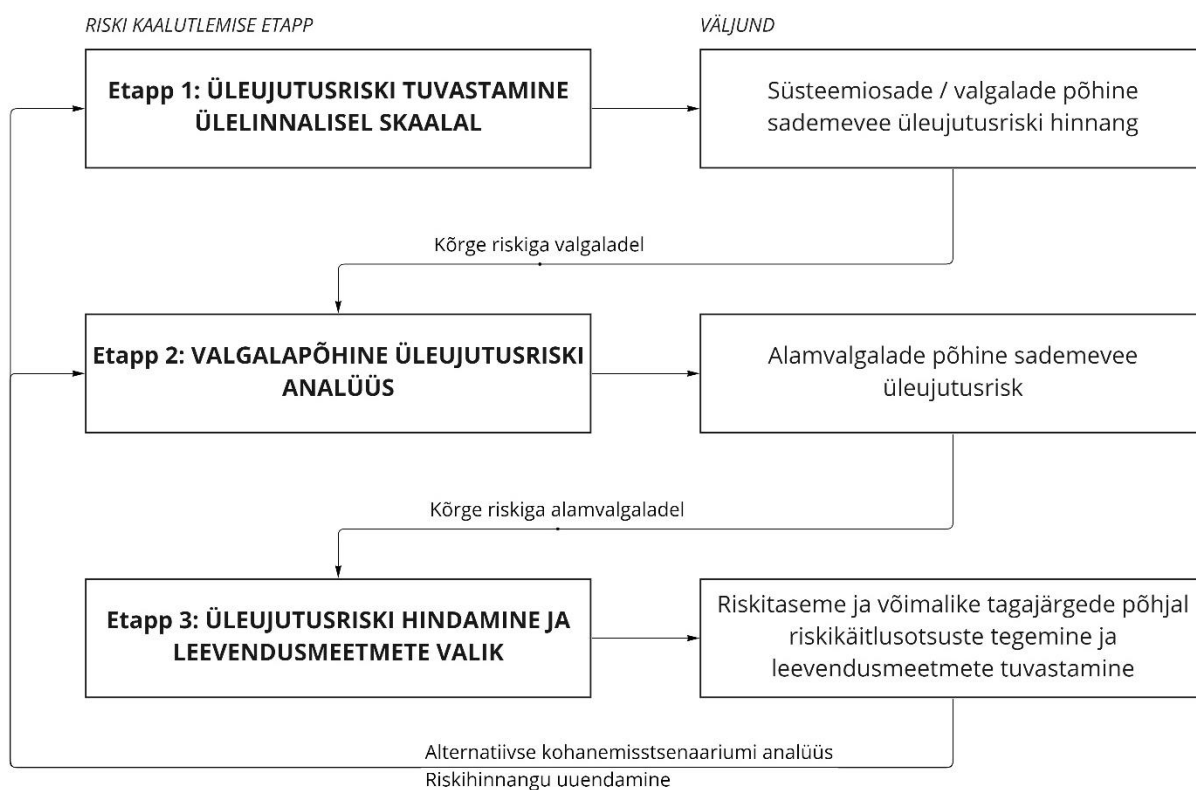
## **3.1 Mitmetasandiline sademeveeüleujutuse riskikaalutluse raamistik ja riskitasemete määramine**

### **3.1.1 Mitmetasandiline sademeveeüleujutuse riskikaalutluse raamistik**

Riskijuhtimisstandard ISO 31000:2018 [6] ei sea ette piire, mil moel valdkondlikke riske tuvastama peaks ja kuidas peaks käima nende analüüsimine ja hindamine. Seega on võimalik riske tuvastada ka varasema kogemuse põhjal ja hinnata näiteks elanike tagasiside kaudu. Sellised meetodid ei ole aga muutuva kliima ja arenevate linnade tingimustes piisavalt usaldusväärsed. Olukorras, kus linnadel pole täna piisavaid geoinfosüsteeme ega toimivaid sademevee seireprogramme, ei ole ka mõeldav linnaülese riskihinnangu saamiseks kompleksete mudelite koostamine.

Käesolev töö pakub tervikliku mitmetasandilise lahenduse (Joonis ), mis seob ÜRO katastroofiohu hindamise ameti riskiindeksi valemi riskijuhtimisstandardi riskikaalutluse sammudega. Seeläbi toimub riskipiirkondade tuvastamine juba erinevaid ohu- või kohanemistsenaariume arvesse võttes, mille tulemusena saab tuua välja linna erineva riskitasemega süsteemiosad. Nendel valgaladel on sademeveeüleujutuse väljaselgitamiseks põhjust viia läbi täpsem riskianalüüs kasutades juba täpsemaid mudeleid. Mitmetasemelise protsessiga saab analüüsiressurssi mõistlikult suunata, valides maksimaalselt olemasolevaid andmeid ära kasutavas kiiranalüüsis need kõrge riskiga piirkonnad, kus süsteemile on vaja koostada arvutusmudel ja viia vajadusel läbi täpsemad alusuuringud.

Pakutav meetoodika võimaldab riskikaalutlust kergesti korrata. Protsessis otsustatud käitlusalternatiivide rakendumisel muutunud olukorda on põhjust uues riskikaalutluse iteratsioonis (uutele lähteandmetele tuginedes) hinnata (tervikprotsessi kordus). Vajalik võib olla välja töötada uus riskistsenaarium ülelinnalise riski tuvastamiseks (1. etapi kordus) või sootuks võrrelda käitlusalternatiivide mõjusust riskianalüüsi etapis (2. etapi kordus).



Joonis 3.1 Etapiviisiline sademevee üleujutuse riskikaalutluse raamistik

Ülevaatlilikult koosneb metoodika järgmistest etappidest:

**Ettevalmistav etapp: Riskikaalutluse ettevalmistus ja riskistsenaariumite valik:** ettevalmistuse etapis on vaja sõnastada analüüsi eesmärgid ja oodatavad tulemid, mis omakorda määravad edasise töövoogu ja selle läbiviimiseks vajalikud ressursid. Ettevalmistamise käigus määratakse huvipakkuvad riskistsenaariumid. Detailsem info etapi kohta on ära toodud pt. 3.2.

**Etapp 1. Üleujutusrisi tuvastamine üle-linnalisel skaalal:** tuvastamise etapis piiritletakse valgalad / süsteemiosad, mille riskitaset linnas soovitakse võrrelda ning ja viiakse läbi üldistatud riskiparameetrite analüüs. Analüüsiks kasutatakse vaid avaandmeid ja linna planeeringulist infot. Tuvastatud riskiparameetrite põhjal arvutatakse riskiindeksid eelnevas etapis ettevalmistatud valgaladele või süsteemiosadele. Analüüsi korratakse võttes arvesse erinevaid riskistsenaariumeid. Koostatakse tulemuste kokkuvõtte ja riskitaseme visualiseering ning valitakse süsteemiosad, mille jaoks on vajalik täpsemate analüüside läbiviimine ning antakse soovitusel sobivate meetodite valikuks. Detailsem info etapi kohta on ära toodud pt. 3.3.

**Etapp 2. Valgalapõhine üleujutusrisi analüüs:** eelmises etapis tuvastatud kõrge riskiga süsteemiosadele koostatakse äravoolusüsteemi matemaatiline mudel ja piiritletakse alamvalgalad. Riskianalüüsi etapis rakendatakse riskiparameetrite analüüsiks erinevaid üleujutust iseloomustavate hüdrodünaamiliste näitajate modelleerimise meetodeid, milleks võib olla vajalik läbi viia täiendavaid alusuuringuid. Tuvastatud riskiparameetrite põhjal arvutatakse riskiindeksid piiritletud alamvalgaladele. Koostatakse tulemuste kokkuvõtte ja riskitaseme visualiseering ning sõelutakse välja alamvalgalad, mille puhul on vajalik rakendada meetmeid riski leevendamiseks. Detailsem info etapi kohta on ära toodud pt. 3.4.

**Etapp 3. Üleujutusrisi hindamine ja leevendusmeetmete valik:** riski hindamise etapis analüüsitakse eelmises etapis mõõdetud riskitasemest lähtuvalt riski aktsepteerimisvalmidust ja otsustatakse, kas ja milliseid vastumeetmeid riski leevendamiseks on vajalik rakendada. Potentsiaalselt sobivate meetmete jaoks koostatakse kohanemistsenaariumid, vajadusel liigutakse tagasi riski analüüsi etappi. Detailsem info etapi kohta on ära toodud pt. 3.5.

**Uus iteratsioon / alternatiivne stsenaarium:** meetod võimaldab lähtuvalt alusandmete uuenemisest või huvi pakkuvast tulevikustsenaariumist lähtuvalt riskikaalutlust / või mõnd selle etappidest vabalt valitud hetkel korrata või soovi korral ka automatiseerida.

Käesolevas töös väljapakutud meetodika eesmärk on lihtsustada sademeveest tingitud üleujutusrisi juhtimisel andmepõhist otsustamist. Olukorras, kus Eesti linnade sademeveeüleujutuse riskipiirkonnad kaardistatakse täna valdavalt ebakvaliteetselt dokumenteeritud minevikusündmuste põhjal, annab meetodika rakendamine linnadele võimaluse astuda olulise sammu edasi.

### **3.1.2 Riskitasemete määramine ja kasutamine**

Nagu punktis 2.3 kirjeldati, kasutatakse Eestis üleujutuste ja hädaolukordadega seotud riskitasemete määramisel erinevaid lähenemisi. Veelgi enam kohtab üleujutuse riskitasemete skaalasisid rahvusvahelistes temaatilistes uurimustes.

Käesolevas töös pakutava meetodika kohaselt leitakse riskitase lähtuvalt riskifunktsioonist. Riskifunktsiooniga leitud piirkonnapõhine riskiindeks on kasutatav ainult võrdlevas tähenduses ning ei anna eraldivõetuna üleujutuse tõenäosuse või tagajärgede osas selget hinnangut. Koostades aga eraldivõetavad riskiparameetrite (oht, haavatavus, kokkupuude) tundlikkuse analüüsid, võimaldab meetodika tuua välja

erinevate faktorite mõju riskitasemele. Olukorras, kus oluline on vaid erinevate piirkondade üleujutusrisi võrdlus, ei ole komponenthavaal riskifaktorite osakaalu analüüsimine tingimata vajalik. Põhjus-tagajärg seoste otsimiseks ja leevendusmeetmete leidmiseks on see aga märkimisväärselt olulisem riskianalüüsi staadiumis.

Riskide hindamise etapis, kus on vajalik otsustada riskide käitlusalternatiivid, on aga põhjust rääkida aktsepteeritavast riskist, riskikäitlusele alluvast riskitasemest ning jääkriskist, mis ei ole optimaalsete vastumeetmetega leevendatav. Tabelis 3.1 on toodud riskitaseme esitlusviisid vastavalt kaalutlemise etapist ja kasutusotstarbest.

Tabel 3.1 Riskitaseme esitlusviisid vastavalt kaalutlemise etapist ja kasutusotstarbest

<b>Riski kaalutluse etapp</b>	<b>Riskitaseme esitus</b>	<b>Kasutamine</b>
1. Riski tuvastamine	Baasstsenaariumi riskiindeksi võrdsel jaotusel põhinev skaala: 1 - riskita 2 - madal risk 3 - keskmine risk 4 - oluline risk 5 - kõrge risk	Võrdlus: linna piires süsteemiosade vahel riskitaseme eristamine ja riskistsenaariumite võrdlus.
2. Riski analüüs	Baasstsenaariumi riskiindeksi võrdsel jaotusel põhinev skaala: 1 - riskita 2 - madal risk 3 - keskmine risk 4 - oluline risk 5 - kõrge risk	Võrdlus: alamvalgalade vahel riskitaseme eristamine ja riskistsenaariumite võrdlus
	Riskiindeksi tundlikkuse analüüs ohu tõenäosusest ja tagajärgede tugevusest.	Põhjus-tagajärg seosed: riski koondparameetritel põhinev ohu, kokkupuute, haavatavuse parameetrite mõju eristamine riskitaseme määramisel
3. Riski hindamine	A - aktsepteeritav risk K - käideldav risk J - jääkrisk	Riskianalüüsis väljaselgitatud riskitasemete käitlusotsused

Riskifunktsiooni abil arvutatud riskiindeksid jaotatakse riskiklassidesse rakendades GIS tarkvara loomulike vahemike (*Natural Jenks* [73]) optimeerimistööriistale. Loomulike vahemike meetod optimeerib riskiklassid minimeerides iga riskiklassi keskmise

riskiindeksi väärtuse ruutviga [74]. GIS andmetöötlus võimaldab rakendada erinevaid indeksite jaotuse optimeerimise tööriistu [75], sh. eksperthinnangul põhinevaid riskivahemikke või riski avaldumisel kaasnevate tagajärgede talumispiirist lähtuvaid jaotusi. Viimaste rakendamine on Eesti oludes piiratud kuna eeldaks eraldiseisvat uuringut. Riskitasemete skaalade määramisel on oluline klassifitseerida võrdlusstsenaariumid lähtuvalt vastava taseme baasstsenaariumi skaalavahemikust. Vastasel juhul ei ole saadud tulemused võrreldavad. Riski hindamise etapis tehakse otsus riski käitlemise osas tuginedes analüüsi-etapist saadud järeldustele ning ekspertotsusele.

## **3.2 Riskikaalutluse ettevalmistamine ja riskistsenaariumite valik**

### **3.2.1 Riskikaalutluse töövoog ettevalmistus**

Linna sademeveeülejutuse riskikaalutluse eesmärk on tagada asjakohane alusandmestik riskijuhtimisprotsessile, mis lisaks riskitasemete väljaselgitamisele toob kaasa ka otsuste langetamise ja riskide käitlemise. Riskijuhtimisstandardi [6] kohaselt peab riskijuhtimisprotsess olema lõimitud organisatsiooni struktuuri, toimingutesse ja protsessidesse. Mis tähendab, et riskijuhtimisprotsessi viiakse ellu nii strateegilisel kui operatiivsel tasandil. See tähendab, et riskikaalutluse protsessi läbiviimine pole eesmärk iseneses, vaid see peaks saama süsteemseks töövahendiks erinevate otsuste tegemisel.

Riskikaalutluse töövoog määrab analüüsi lähtekoht, ehk täpsemalt riskikaalutluse eesmärk ja kasutada olevad ressursid. Riskikaalutluse lähtekohaks on kogemus varasemate sarnaste analüüside läbiviimisel ning arusaam linna ülejutusriski tekkemehhanismist ja adekvaatne arusaam võimalikest tagajärgedest. Riskikaalutluses pakutud riskiparameetrite valik ja kaalumise sõltub oluliselt ajalooliste ülejutusete tagajärgedest saadud kogemustest ja riskijuhtimisprotsessi koordineerivate osapoolte teadlikkusest. Nagu öeldud on riskikaalutus mõeldud otsuste toetamiseks ja riskide juhtimiseks. Seega on protsessi eelselt oluline kindlasti määrata analüüsi ruumiline ulatus, eesmärk ja rakendusala. Riskikaalutlust võib olla vaja viia läbi erinevate linnade kliimakoormatavõimekuse võrdlemiseks, linna strateegiliste planeerimisotsuste toetamiseks, tuvastatud probleemkohtade lahendusalternatiivide leidmiseks või sootuks spetsiifiliste sihtrühmapõhiste riskijuhtimisotsuste toetamiseks. Analüüsi eesmärgist

sõltub protsessi haaratavate etappide arv ja analüüsimeetodite valik. On oluline vahe, kas riskikaalutus viiakse läbi riiklikul tasemel linnade üleujutusriskide analüüsiks, või sootuks linnaosapõhiste rohelahenduste planeerimisotsuste toetamiseks. Esimesel juhul on suure tõenäosusega mõistlik piirduda riskikaalutluse riskituvastamise etapiga, kuid väiksel linnaruumiskaalal eeldavad otsused sootuks suuremat täpsust ja lahendusalternatiivide võrdlusbaasi. Riskikaalutluse eesmärgi piiritlemisega on vaja seada lähtekoht ka tulenevalt analüüsi rakendusala. Kaalutluses kasutatavad parameetrid võivad erineda sõltuvalt sellest, kas riske hinnatakse linna hädaolukorra riskitaseme mõistmiseks, sademeveesüsteemi kontaktvööndi projekteerimistingimuste koostamiseks või konkreetsel kinnistul leevendusmeetmete planeerimiseks.

Kasutada olevate ressursside osas on põhjust rääkida nii alusandmete olemasolust, kasutada olevatest tarkvaradest ja loomulikult ka inimressursist. Riskikaalutluse protseduuri väljatöötamisel on maksimaalselt rakendatud vabalt kättesaadavaid avalikes registrites ja andmebaasides olevaid andmekogumeid. Riskikaalutluse teine, analüüsi etapp, eeldab aga detailsemat arusaama sademeveeüleujutuse linnapõhisest tekkemehhanismist. Selle usaldusväärsus sõltub hüdrodünaamiliste näitajate modelleerimisel kasutatud meetoditest, mis omakorda eeldab detailset arusaama äravoolusüsteemist. Olukorras, kus linnas äravoolusüsteemi mudel puudub, on mõistlik riski tuvastamise käigus esmalt selgitada välja tundlikud piirkonnad ja selle põhjal planeerida mudeli koostamine, kalibreerimine ning alles siis edasine riskianalüüs ja hindamine. Antud metoodika kohast kaalutusprotsessi on võimalik linnas vähemalt osaliselt rakendada ka kohalike omavalitsuste analüütikute poolt. Samas on tõenäoline, et väikestes omavalitsustes, mille keskkonna- ja linnahaldusspetsialistidelt eeldatakse laiapõhjalisi kompetentse ja tegelemist väga erinevate probleemidega [76], võib olla vajadus kaasata väliseid eksperte. Seda vajadust võib tingida ka olukord, kus linnal puuduvad analüüsiks sobivad GIS töövahendid. Antud töös esitatakse metoodikat küll kommertstarkvara Esri ArcMap abil, kuid samaväärset protsessi saab rakendada ka vabavaralisi kaarditarkvarasid, nt QGIS, kasutades.

Protsessi ettevalmistamine peab kirjeldama ka ootuse protsessi dokumenteerimisele. See võimaldab anda tulevikus hinnanguid riskikaalutlusele usaldusnivoo ja tundlikkuse kohta ja tagab protsessi korratavuse.

### **3.2.2 Riskistsenaariumite kujundamine**

Katastroofiohu riske hinnatakse tuleviku ebasoodsate sündmuste jaoks valmistumiseks. Tulevikku ette näha ei saa, aga tulevikuriske on võimalik hinnata lähtuvalt erinevatest



ohu-, arengu- ning kohanemistsenaariumitest. Ohustsenaariumite puhul on ennekõike põhjust analüüsida erinevate kliimaprojektsioonide mõju sademetele ning seeläbi ka linna üleujutusriskile, kuid linna eripärast lähtuvalt võib olla põhjust analüüsida ka teiste ohuolukordade koosmõju. Tulevikuriske kaardistades on vaja otsustada ja stsenaariumi kirjelduses dokumenteerida, millised riskiparameetrid kirjeldavad olemasolevat olukorda ning milliste puhul võetakse arvesse tulevikuväärtused.

**Baasstsenaarium:** Sademeveeüleujutuse riski hinnangu baasstsenaariumina on mõistlik kirjeldada hetkeolukorra riskitase, millega võrreldakse ükskõik milliseid valitud tuleviku riskistsenaariumeid. Samas on võimalik baasstsenaariumina käsitleda analüüsi seisukohast olulisi lähtetingimusi. Baasstsenaarium koostatakse nii riskide tuvastamiseks (1. etapp) kui analüüsiks (2. etapp). Baasstsenaariumi riskiindeksid 1. ja 2. etapis ei lange kokku, vaid on rakendatavad ainult konkreetse etapi piires. Riskide hindamise etapis (3. etapp) toimub otsustamine vastavalt eesmärgile varem leitud riskitasemete ja nende võrdlusbaaside põhjal. Baasstsenaariumis kasutatavad alamindikaatorid ja nende kaalud otsustatakse linnapõhiselt. Baasstsenaariumist lähtuvad riskitasemete klassid rakendatakse ka võrdlusstsenaariumitele, mis läbi lihtsustub tulemuste analüüs.

**Kliimastsenaariumid:** Kliimamuutuste tagajärjel sagenevad ja intensiivistuvad valingvihmad on üsna hästi tuntud tulevikukliima riskistsenaarium. IPCC on oma viimastes aruannetes [1], [20] toonud üheselt välja inimtegevuse olulise mõju atmosfääri ning maa ja merede soojenemisele, mis on juba toonud kaasa kiired muutused meie elukeskkonnas. Sõltuvalt globaalsetest inimarengu stsenaariumitest on tulevikukliima prognoosid erinevad, mistõttu ka on põhjust vaadata kliimamuutuste tagajärgi lähtuvalt erinevatest stsenaariumitest. 2022. aastal avaldatud IPCC kliimamuutuste mõjude, kohanemise ja haavatavuse aruandes [19] on tulevikustsenaariumeid kirjeldatud lähtuvalt inimkonna ühistest sotsiaalmajanduslikest arenguteedest (*Shared Socio-economic pathways* – SSp), 2014. aasta aruanne [18] lähtub veel representatiivsete kontsentratsioonide arenguteedest (*Representative Concentration Pathways* – RCP), millel põhineb ka Eesti Riiklik Kliimakohanemise Arengukava [77]. Eestile ei ole veel globaalsed sotsiaalmajanduslikud arenguteed kohaldatud. Tulevikukliimast lähtuvate riskistsenaariumite puhul on oluline mõista ka arenguteede ajaliskaalat. Nii RCP kui SSp arenguteed on koostatud kuni 100 aastasele perioodile, kusjuures eristatakse lähiaja 2021-2040 ja kesk-pika perioodi 2041-2100 mõjusid [19]. Riskistsenaariume valides on vaja otsustada, kui pikale perioodile on kavandatud riskide planeeritud ohjamislahenduste kestvus. Näiteks on linnaruumiinvesteeringute (nt. süsteemi ulatuslik rekonstrueerimine) mõju analüüsil mõistlik hinnata ka kesk-pika perioodi riske. Suurema määramatuse tingimustes,

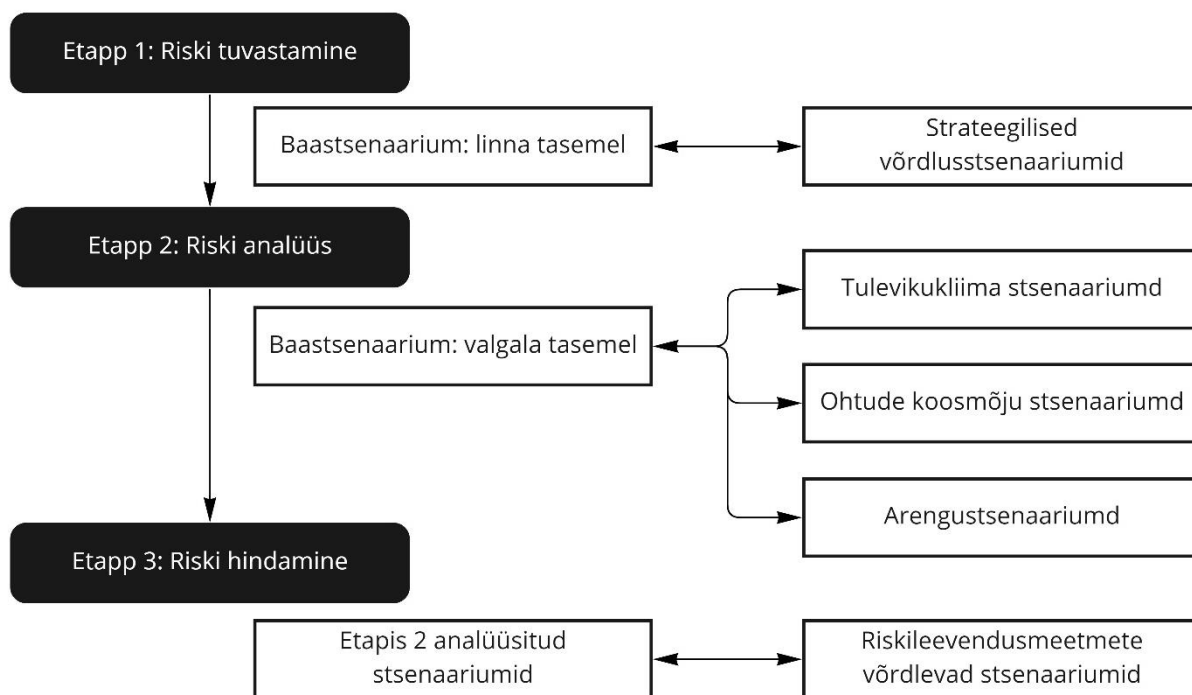
näiteks kui riskianalüüs on aluseks linna sademeveesüsteemi kontaktvööndi projekteerimistingimuste väljatöötamiseks, võib eelduslikult lähtuda lähiaja stsenaariumitest. Riskianalüüsis seisneb kliimaststsenaariumite arvesse võtmine ohuparameetri alamindikaatori muutmises lähtuvalt tulevikukliima prognoosidest.

**Ohtude koosmõju stsenaariumid:** Lisaks tuleviku ekstreemvihmadele on võimalik kujundada riskianalüüsiks ka erinevaid ohtude koosmõju stsenaariumeid. Punktis 2.2.1 on kirjeldatud erinevad looduslikud ja inimtekkelised ohuallikad, mis aitavad kaasa sademeveeüleujutuse tekkele. Erinevate ohuallikate koosmõju üleujutusriskile on suure uurimispotentsiaaliga teema, mille osas täna universaalselt praktikad puuduvad. Etapis 1 on põhjust ohtude koosmõjuna võtta arvesse valgaladepõhist suhtelist hüdrooloogilist riski ja rannikuüleujutuste riski. Keerulisemad kliimatiliste tingimuste koosvaldumise stsenaariumid (pikk vihmaperiood koostoimes valingvihmaga või põuaperiood kombineeritud sellele järgneva ekstreemse sajuperioodiga) eeldavad sootuks täpsemaid kliimamudeleid ja selline peenhäälestus võib olla põhjendatud vaid kriitilise riskiga aladel leevendusmeetmete analüüsil, s.o. etapis 3.

**Kohanemise- ja arengustsenaariumid:** Tulevikukliimast ning -ohtudest sõltumatult mõjutavad sademeveesüsteemide toimivust muutused linnaruumis, mille alusel saab analüüsida erinevaid kohanemis- või arengustsenaariumeid. Vett mitteläbilaskvate katendite osakaal (infiltratsiooni mõju), linnahaljastuse muutumine (taimaurumise mõju), vooluvete suunamine kanalisse või torustikku (tipuvooluhulga muutus) sõltub oluliselt linna arendustegevustest. Süstemaatilise riskikaalutluse lõppeesmärk ongi jõuda riskide hindamisel tulemuseni, kus võimalikud leevenduslahendused annavad tulemuseks riskitaseme, mille võimalike tagajärgedega ollakse valmis leppima. On selge, et globaalsed kliimaststsenaariumid ja kohalikud arendusplaanid kulgevad paralleelselt (seejuures ka küllap omavaheliselt põhjus-tagajärg seost omades). Antud meetodika võimaldab rakendada ka kombineeritud kliima- ja arendusstsenaariume ja luua seeläbi kohalikud arenguteed, näiteks pessimistlike kliimaststsenaariume optimistlike linnakeskkonna kohanemisvõimekust oluliselt tõstvate arengustsenaariumitega ja vastupidi.

Joonisel 3.2 on antud soovitusel, milliseid stsenaariumeid riskikaalutluse erinevates etappides on optimaalne rakendada. Riski tuvastamise etapis (etapp 1) kasutatav üldistustase ei luba analüüsida väga täpsete kliimamudelite mõju või kohanemismeetmete tulemuslikkust, seega on esimeses etapis põhjust baasstsenaariumi võrdluseks kasutada vaid planeeringulisi arengustsenaariumeid. Riski analüüsi etapis (etapp 2) kasutatavad meetodid võimaldavad juba täpsemate stsenaariumite kujundamist. Selles etapis toimub võimalike arenguteedega kaasnevate

arenguteede väljaselgitamine. Riski hindamise etapis (etapp 3) leitakse võimalikud vastumeetmed ning võrreldakse nende tulemuslikkust varem koostatud riskistsenaariumite suhtes.



Joonis 3.2 Soovitused riskistsenaariumite valikuks

## 3.3 Etapp 1: Linna sademeveeüleujutuse riskipiirkondade tuvastamine

### 3.3.1 Valgalade või süsteemiosade piiritlemine

Paljudes Eesti linnades on sademeveesüsteemi valgalad või süsteemiosad juba piiritletud, kuna seda on peetud vajalikuks ÜVKA protsessis või linna sademevee strateegia koostamisel. Kui valgalad piiritletud ei ole, siis võib analüüsi esimeses etapis rakendada valgalade piiritlemiseks mitmeid meetodeid, nt. [76, 77]. Olukorras, kus äravoolusüsteemi GIS andmestik on puudulik võib valgalad kaardistada vaid maapinnareljeefile tuginedes, kuid sellisel juhul peab teadvustama hilisemates etappides vajadust seda alusuuringute käigus korrigeerida. Alternatiivne viis on süsteemiosad kaardistada äravoolusüsteemi geomeetria kohaselt. Näiteks on sellisel moel piiritletud mitmete Tallinna ühisveevärgi- ja kanalisatsiooni arengukavas kirjeldatud sademevee süsteemiosad. Süsteemiosade piiritlemisel tuleb lähtuda sademeveekanaliseerimise paiknemisest (GIS), maapinna kõrgusmudelist (DEM – *digital*

*elevation model*), linna pinnaveekogude paiknemisest ja nendega seonduvatest süsteemiosade suublatega. Arvestada tuleb, et linnades ei sõltu äravoolurežiim ainult maapinna reljeefist, vaid ka linnaruumi elementidest nagu teetammid, tänavate äärekivid jms. Valgalad tuleb piiritleda lähtuvalt väljalasust, igal valgalal peab ideaalis olema ainult üks väljalask. Sademeveeüleujutuse riskihinnangu tarbeks valgalasid kaardistades, on vajalik piiritleda ka need linnaosad, kus täna sademeveesüsteemid puuduvad ja sademevee käitlemine toimub immutamise teel.

Valgalade piiritlemisega koos on vajalik andmetabelites kajastada neid iseloomustav info, mis peaks minimaalselt kajastama süsteemi iseloomu (lahkvoolne, ühisvoolne) ning valgala maakasutuse iseloomu standardvihma korduvuse / intensiivsuse määramiseks (EVS 848:2021 [24] järgi). Hilisemate stsenaariumianalüüside käigus võib olla põhjust valgala iseloomustavaid parameetreid analüüsitava stsenaariumi kohaselt täiendada, nt. arvutades valgalal oleva äravoolusüsteemi pikkuse, olemasolevate rohealade osakaalu vms.

### **3.3.2 Riskipiirkondade tuvastamise sammud**

Üldistatult koosneb riskipiirkondade tuvastamine järgnevatest sammudest:

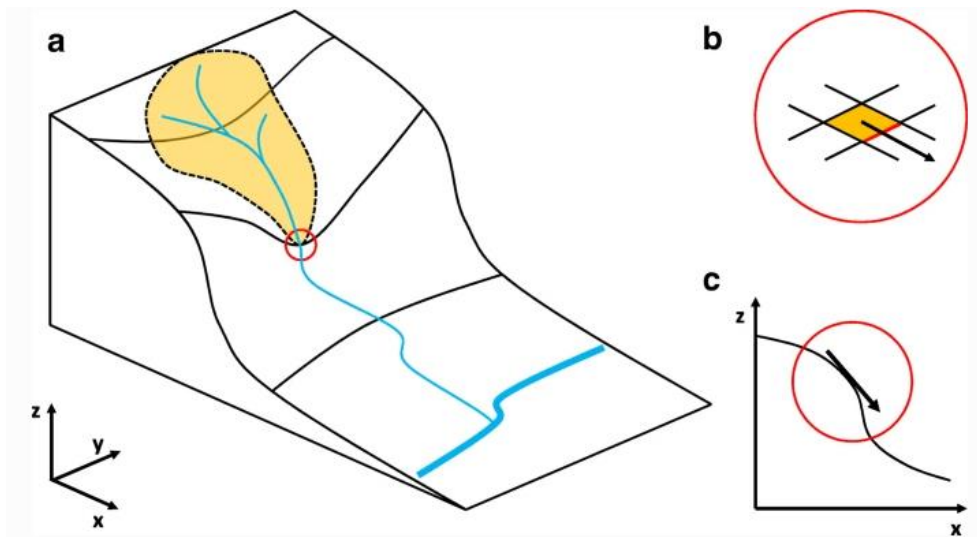
- 1) riskiparameetrite valik lähtuvalt hinnatavale stsenaariumile;
- 2) alusandmete päringud kaartidelt ja alamindikaatoritena kasutatavate rasterkaartide ettevalmistamine;
- 3) Riskiindeksi arvutamine valgaladele/süsteemiosadele ja tulemuste võrdlus.

#### **Samm 1.1: riskiparameetrite valik**

Riski tuvastamise etapis kasutatakse parameetritena laialt levinud ja vabalt kättesaadavaid andmeid. Riskipiirkondade ülevaatlikuks tuvastamiseks on kindlasti võimalik võtta arvesse erinevaid indikaatoreid, sh selliseid, mis eeldavad mahukaid eeluuringuid. Kuna linnade suutlikkus sademeveeüleujutuse riskipiirkondade määramisel on vähene, on pakutavas metoodikas leitud indikaatorite komplekt, mis annab esmase kiire riskihinnangu tuginedes avaandmetele ja linna kasutuses olevale planeeringulisele infole. Metoodika linnapõhisel juurdumisel on põhjust kaaluda täiendavate indikaatorite arvesse võtmist.

Tabelis 3.2 on toodud pakutud metoodika kohased indikaatorid, mis on võimalik genereerida lihtsate geopäringutega avalike registrite andmetelt. Mõnevõrra eristub toodud näitajatest topograafiline niiskusedeks (TWI – *topographic wetness index*). See alamindikaator leitakse samuti avaandmetena kättesaadava kõrgusmudeli andmetest ja

näitab maapinna reljeefist lähtuvat üleujutuse tekkemehhanismi [80]. Topograafilise niiskusindeksi arvutamist kirjeldab joonis 3.3 ja valem 4.1.



Joonis 3.3 Topograafilise niiskusindeksi arvutuselemendid (a) – valgala; (b) – DEM rastriruudu voolusuund; (c) – valgala kaldenurk ( $\tan\beta$ ).[81]

Olemuslikult on TWI GIS-is analüüsitav 1D pindmise voolu modelleerimise tulemus (igalt rastri ruudult saab vesi voolata ühes suunas). TWI leitakse GIS analüüsis töökäskude kombinatsiooni ning valemi 4.1 abil [80]. ArcGis-is leitakse TWI maapinna kõrgusmudeli põhjal kasutades ArcToolbox Spatial Analyst Hydrology erinevaid tööriistu.

$$TWI = \ln \frac{a}{\tan\beta} \quad (4.1)$$

$a$  ülesvooluala näitaja (rastriruutude arv, mis voolavad kindlasse ruutu)

$\tan\beta$  kindla ruudu nõlvust iseloomustav suurus

Tabel 3.2 Riski tuvastamise etapis kasutatavad alamindikaatorid

Alamindikaator	Riskiparameeter	Alusandmed ja klassifitseerimine	Alamindikaatori skaala	Soovituslik kaal
O <sub>1</sub> : ekstreemvihma intensiivsus	Oht (sademed)	Valgaladele arvatud kohalik arvutusvihma intensiivsus (EVS 848:2021[24]) vastavalt linnaruumi iseärasustele. Võib olla määratud ekspertotsusega või keskmistatud tulenevalt põhikaardi maakattetüüpidest.	Normeerimine maksimaalväärtusele / 0-1	1
O <sub>1</sub> : veekogude üleujutusohu	Oht (koosmõju)	Üleujutusdirektiivist lähtuv üleujutusohu esinemistõenäosus [48]	Normeeritud maksimaalväärtusele / 0-1	0,5-1
K <sub>1</sub> : TWI 0-1	Kokkupuude (reljeefist lähtuv)	Maaameti geoportaal DEM 1x1 [82] põhjal Topograafilise niiskusindeksi määramine [80]	Normeeritud maksimaalväärtusele / 0-1	1
K <sub>2</sub> : maakatte äravoolutegur	Kokkupuude (infiltratsioonist lähtuv)	Eesti põhikaart 1:10 000 [83] ja EVS 848:2021 äravoolutegur [24]  Maakatte atribuudi tüüp_t: põõsastik; mets – 5; haritav maa – 10; eraõu, aianduslik maa – 15; haljasala, rohumaa – 20; tootmisõu, tee sport, tee muu, muu lage – 30; tee liiklus, tee täitmata – 70; tee parkla, tee jalakäija - 80	Normeeritud maksimaalväärtusele / 0-1	1
H <sub>1</sub> -hooned	Haavatavus (majanduslik)	Eesti põhikaart 1:10 000 hoonete kiht [83]. Hoone atribuudi tüüp_t järgi rastro klassifitseerimine (väärtusklassid): Eluhoone/ärihoone - 3; Kõrvalhoone – 2; ehitatav hoone/vundament – 1; Vare – 0. Hoone väärtusklassid summeeritud 10x10m kaardiruudule	Normeeritud maksimaalväärtusele / 0-1	1
H <sub>2</sub> – asustustihedus	Haavatavus (sotsiaalne)	Statistikaameti [57] andmed asustustiheduse kohta, nt üleujutuse kaardirakendus 20x20 kaardiruudustikus [48] või linna andmebaasis olevad andmed.	Normeeritud maksimaalväärtusele / 0-1	1
H <sub>3</sub> - muinsuskaitse	Haavatavus (kultuuriline)	Muinsuskaitsealade võõndite kaardikiht [84]. Planeeringulised andmed miljöölade kohta.	0 – ei ole miljööala 1 – on miljööala	0,5
H <sub>4</sub> – süsteemi iseloom	Haavatavus (keskkond)	Süsteemiosade iseloom: ühisvoolne / lahkvoolne (ÜVKA andmed või ekspertotsus)	0,5 – lahkvoolne/immunamine 1 – ühisvoolne	0,5
KV – kohanemisvõime strateegia	Kohanemisvõime	Mõju suund vastavalt võrdlusstsenaariumile. Rakvere näites on analüüsitud rohefaktori stsenaarium Eesti põhikaardi 1:10 000 rohealade tüüpide põhjal	0-1 – risk suureneb; 1 neutraalne; 1-2 risk väheneb	1

### **Samm 1.2: Alusandmete päringud kaartidelt ja riskiindikaatorite arvutus**

Linnade sademevee üleujutusrisiki tuvastamine süsteemiosade kaupa tehakse kaarditöötarkvaras (antud töös Esri ArcMap 10.7.1) kasutades erinevaid rasteranalüüsi ja GIS modelleerimise võtteid. Peamised töövahendid on ArcMap Spatial Analyst tööpakettid Map Algebra, Reclass, Hydrology and Zonal pakettides. Vaja läheb ka rastri töötluse ja andmekihtide konverteerimise töövahendeid. Rasterarvutuse läbiviimiseks on vajalik kõik alamindikaatorite rasterkihid valmistada ette kogu analüüsitava piirkonna ulatuses, mis tähendab, et vaja on otsustada ka alamindikaatori väärtus andmete puudumise olukorras.

Indikaatorid määratakse valgaladele arvutustabelis GIS päringutele tuginedes või deterministlikult ekspertotsuse alusel. Analüüsikaartide tarvis on indikaatorid vaja normeerida. Võrdlusstsenaariumites alamindikaatorite muutust analüüsides, on oluline normeerida alamindikaatorid baasstsenaariumi maksimumile. Minimaalselt on baasstsenaariumi riskiindeksi arvutamiseks vaja valmistada ette 7-8 rasterkihti (tabel 3.2), mille kattuvusanalüüsil saab riskifunktsiooni valemit kasutades arvutada linna sademeveeüleujutuse riskikaardi baasstsenaariumi.

### **Samm 1.3: Riskiindeksite arvutamine valgaladele ja tuvastatud riskipiirkondade visualiseerimine**

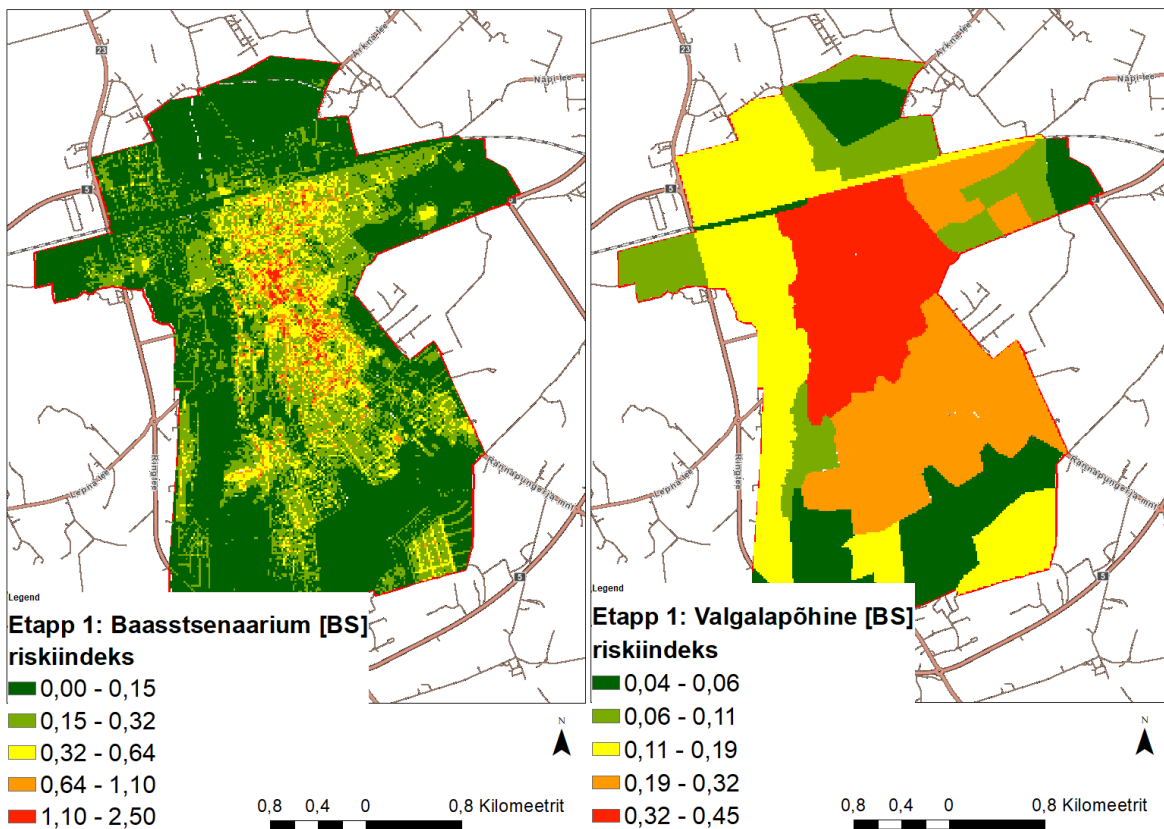
Kolmanda sammuna tuvastatakse valgalad, kus on põhjendatud sademeveeüleujutuse riski täpsem analüüs äravoolusüsteemi modelleerimise võtteid kasutades. Riskiindeksi leidmiseks kasutatakse kaarditarkvara rasterarvutuse võimekust. Seejuures on pt. 2.1.1 esitatud riskifunktsiooni valemikomplektiga (valemid 2.1-2.3) võrreldes antud võimalus alamindikaatorite arvesse võtmisel neid ekspertotsusele tuginedes kaaluda (valem 3.1). Baasstsenaariumi puhul jäetakse valemis ära kohanemisvõimekuse komponent. See, kas ohuindikaatori käsitus on baasstsenaariumis vaid standardvihma põhine või võtab arvesse ka muid ohufaktoreid, on vaja otsustada linna eripärast lähtuvalt. Saadud riskiindeksi tulemusi on võimalik visualiseerida erineval viisil, näiteks esitades üle rastri hajutatud riskigradiendi (joonis 3.4, vasakul). Kuna aga selline esitus võib lõppkasutajat eksitada, on soovituslik keskmistada riskihinnang eelnevalt ettevalmistatud süsteemiosadele ja visualiseerida tulemust üldistatuna (joonis 3.5, paremal).

$$Risk_{Etapp 1} = \frac{\sum(a_i \cdot O_i) \times \sum(b_j \cdot K_j) \times \sum(c_k \cdot H_k)}{\sum(d_m \cdot KV_m)} \quad (3.1)$$

$a_i, b_j, c_k, d_m$  –riskiparameetrite kaalud

$O_i, K_j, H_k, KV_m$  - riskiparameetri alamindikaatorite väärtus, vastavalt ohu, kokkupuute, haavatavuse ja kohanemisvõimekuse alamindikaator

Joonisel 3.4 on esitatud hajutatud riskivahemikud väärtuste loomulike vahemike optimeerimismeetodi (*Natural Jenks method* [73])alusel jaotatuna nii hajutatud riskile kui valgaladele keskmistatuna. Kuna riskituvastamise etapi üldistus on suur, lähtub meetodikakohane edasine analüüs just valgaladele keskmistatud riskitaseme loomuliku jaotuse riskitasemetest. Suure üldistusega üle-linnalise riskipiirkondade tuvastamise etapis ei ole põhjust analüüsida väga lokaalsete kohanemismeetmete mõju riskitasemetele. Ka ei annaks riskide tuvastamise etapis läbiviidav riskiarvutus piisavalt informatiivseid tulemusi kliimatsenaariumite tagajärgedest, vaid näitaks ainult proportsionaalset kasvu. Samas saab linnaülese riskipiirkondade tuvastamise etapis analüüsida suure ulatusega planeeringuliste otsuste mõju riskitaseme muutusele. Selleks, et riski tuvastamise etapis saaks hinnata kohanemismeetmete mõju piirkondade üleujutusriskile, on vaja selgitada välja alamindikaatorid meetme mõju suuna kirjeldamiseks.



Joonis 3.4 Sademeveeüleujutuse ülelinnane baasenaariumi (BS) riskikaart Rakvere linna näitel. Vasakul on esitatud riskifunktsiooni hajutatud rasterkaart, paremal on tulemus keskmistatud eelpiiritletud süsteemiosadele.

Kohanemis- või arengustsenaariumi mõjufaktori suuna väljaselgitamine eeldab kaardianalüüsil võrdlust baasenaariumiga. Analüüsikaardi ettevalmistamisel on vaja koostada kohanemistsenaariumi kaart, kus arenduspiirkonniti või sekkumismeetmete kaupa on määratud mõju suund kas deterministlikult (positiivne, neutraalne,



negatiivne) või kaardianalüüsile tuginedes (nt. rohealade % kasv või kahanemine). Näited võrdlevate riskistsenaariumite tuvastamiseks Rakvere linnas on toodud pt. 4.2.

Antud analüüsitaseme tulemusi ei tohi kasutada üksikute valgalade üleujutusrisiki määramiseks, vaid see on kasutatav vaid sarnastel alustel kaardistatud valgalade kiireks ja eriteadmisi mittenoõdvaks võrdlemiseks ja sõelumiseks, et selgitada välja, kus on vajalik läbi viia põhjalikumad alusuuringud ning modelleerimist eeldav riskianalüüs. Mõistma peab, et sel moel riskipiirkondi eristades ei väljenda riski tuvastamisfaasis kõrge riskitase otseselt seda, et alal võib esineda üleujutus. Selles etapis ei võeta veel arvesse sademevee äravoolusüsteemi toimivust ega ka erinevate parameetrite ilmnmisel tekkivat positiivset tagasisidet teistele parameetritele. Samuti ei ole suurte valgalade põhisel analüüsil eristatav see, kas kokkupuutealas tegelikult on haavatavaid väärtusi või kas kohanemismeetmed on päriselt suunatud teadaolevate probleemkohtade üleujutuste leevendamiseks või ei mõjuta neid üldse. Selliste küsimuste vastamiseks ongi vajalik liikuda edasi järgmisele tasemele, riskide alamvalgalade põhisele analüüsile. Samas võimaldab antud kiiranalüüs selgitada välja valgalad, kus ohutase on madal ja haavatavaid väärtusi vähe. Piiratud ressursside tingimustes, kus kogu linna sademeveesüsteemi modelleerimine pole realistlik, võimaldab meetod tuvastada alad, kus on suurem tõenäosus mitmik-mõjude avaldumiseks ja seega ka võimalikeks negatiivseteks tagajärgedeks. Selliste alade riskianalüüsi etapiks valitakse sobiv meetod lähtuvalt süsteemi iseloomust ja analüüsi eesmärgist. Antud töös esitatakse teise etapi analüüsimeetodina äravoolusüsteemi mudelil põhinevat lahendust. Kõrge tuvastatud riskiga valgaladel, kus äravoolusüsteem aga puudub, võib olla põhjust sademevee üleujutuse ohuolukorra tagajärgi analüüsida mõne teise meetodiga, nt. nt pindmise voolamise mudelitega, mille kasutust on näidanud edukalt Othmer *et al.* [16].

## **3.4 Etapp 2: Äravoolusüsteemi mudelil põhinev sademeveeüleujutuse riski analüüs**

### **3.4.1 Äravoolusüsteemi mudeli koostamine**

Etapis 2 on riskianalüüsi eesmärk mõista erinevate riskiparameetrite mõju üleujutusele ja luua seosed riskitaseme tõenäosuse ja tagajärgede vahel. Selleks on oluline valida õiged ja piisavalt täpsed meetodid. Nagu punktis 2.2.2 kirjeldati, on olemas mitmeid erinevaid meetodeid üleujutust defineerivate hüdrodünaamiliste nähtuste modelleerimiseks. Sealhulgas on olemas mitmeid töid pindmise äravoolu

modelleerimisvõtete kasutamisest sademevee üleujutusrisi hindamiseks [16,17], oluliselt vähem on riskimetoodikaid, kus võetakse arvesse ka äravoolusüsteemi mahutavust ja hüdraulilist toimivust. Riskifunktsiooniga ühilduvat lahendust töö autor ei tuvastanud. Antud töös ei anta terviklikku ülevaadet kõigist võimalikest meetoditest, kuid keskendutakse täpsemalt äravoolusüsteemi mudelil põhinevale meetodile [12].

Linnade äravoolusüsteemi mudelid hõlbustavad erinevaid otsustusprotsesse ning kindlasti ei ole sademeveesüsteemi digikaksikut vaja välja töötada pelgalt üleujutuse riskianalüüsi tõttu. Ideaalolukorras toimib mudelipõhiselt ka näiteks süsteemi haldamine ja arendustöö, ning olemasolev digikaksik on võimalik lihtsalt rakendada ka riskianalüüsi kasutusse. Kahjuks puudub täna enamikes Eesti linnades isegi asja- ja ajakohane sademeveesüsteemi geoinfo andmebaas, rääkimata piisava täpsusega ja kalibreeritud digikaksikust [85].

Uut mudelit koostama hakates on vaja otsustada, millised on kasutatavad ressursid (andmed ja arvutusvõimsus) ning milline on ootus mudeli täpsusele. Selle põhjal tuleb valida meetodid, tarkvarad ja planeerida vajalikud ressursid. Sademevee äravoolusüsteemi mudelite koostamiseks on koostatud erinevaid juhismaterjale, sh. tarkvara eripärast lähtuvaid [86], probleemipüstituse keskseid [85] või spetsiifilisi, modelleerimist hõlbustavaid ning töövõtteid selgitavaid [87] juhiseid. Üleujutuse riskianalüüsi läbiviimiseks on oluline, et mudel oleks piisavalt täpne, haarates kaasa ka hargtorusid ja väiksemaid süsteemielemente ning, et mudel oleks kindlasti kalibreeritud. Äravoolusüsteemi toimivust arvestava üleujutuse modelleerimiseks on vajalik kirjeldada [85]:

- Uuritaval valgalal maapealne voolamine (teekond valgalalt kaevu, so. kokkuvooluaeg, voolusuunad, voolu kiirus);
- Uuritavas süsteemis maa-alune voolamine (torude hüdrauliline toimivus, läbilaskevõime, takistustegurid jms.);
- Süsteempetsiifilised olulised tegurid (s.o. andmed pumpade, mahutite ja muude süsteemielementide kohta).

Riskianalüüsi vaates on olulisim alamvalgalade piiritlemise samm. Kui eelmises, riski tuvastamise faasis, on piisav kui valgalad piiritletakse (automaatgenereerimiseks sobilike andmete puudumise tõttu) käsitsi, siis probleempiirkondades riskianalüüsi läbiviimiseks on oluline lähtuda võimalikult täpsetest andmetest ja vältida võtteid, mis võivad põhjustada suurt määramatust/ebatäpsust. Kirjeldatud riskianalüüsi etapis rakendatavas mudelis kasutatavad valgalad on genereeritud automaatselt, kasutades GIStoSWMM rakendust [87] ning hiljem täpsustatud koos vee-ettevõtte spetsialistidega võttes arvesse kohalikke olusid.

### **3.4.2 Üleujutustundliku piirkonna riskianalüüsi läbiviimise sammud**

Sarnaselt üleujutusrisiki tuvastamise etapiga on ka riskianalüüsi käigus vaja tuvastada stsenaariumipõhised analüüsitavad parameetrid, valmistada ette alamindikaatoritena kasutatavad rasterkaardid ning arvutada riskiindeksid nüüd juba täpsematele alamvalgaladele. Riskianalüüsi eristab riski tuvastamise faasile lisaks kasutatavate andmete täpsusele ka see, et tulemuste puhul hinnatakse ohuolukorra tõenäosuse ja tagajärgede vahelisi seoseid. Kui eelmises, riski tuvastamise etapis, viidi kogu riski kaardistamine läbi GIS baasis, rakendatakse riskianalüüsi faasi nii GIS kui äravoolusüsteemi modelleerimistarkvara.

#### **Samm 2.1: Riskiparameetrite valik**

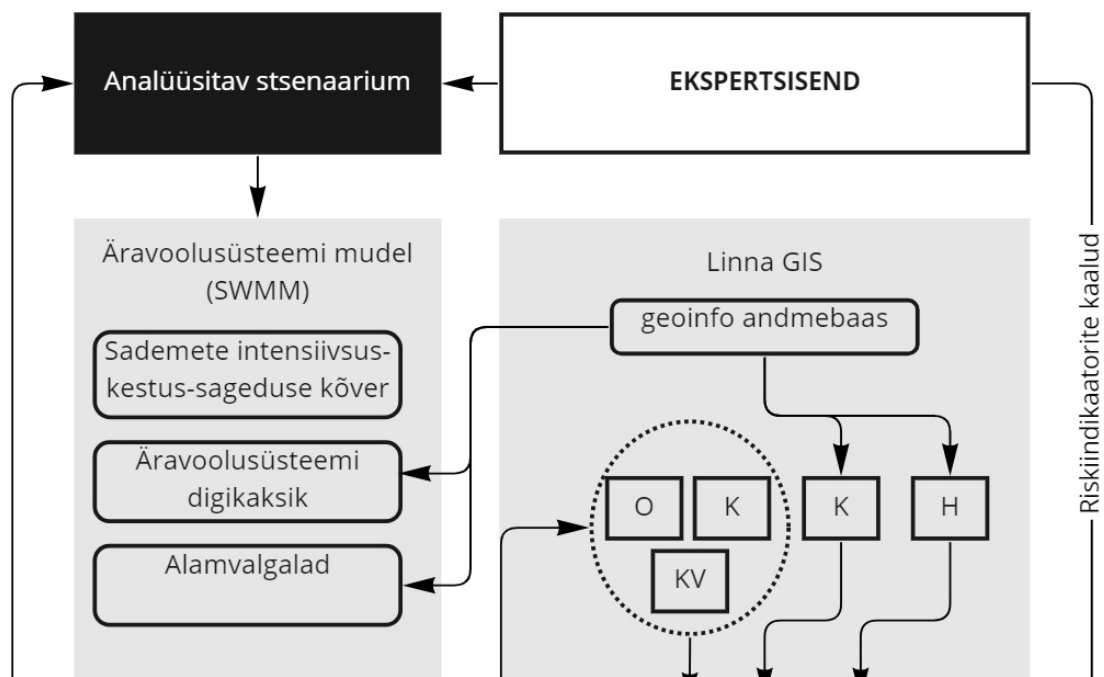
Kui riski tuvastamise etapis hüljati suures piires üleujutuse riskifaktorite omavaheline koosmõju (vt. eespool joonis 2.2) ja riskiparameetreid kirjeldati üksikute indikaatorite kaupa, on riskianalüüsi etapis oluline faktorite koosmõjuga arvestada. Üldistatult on riskianalüüsi etapis kasutusel samad riskiparameetrid, mis riski tuvastamiselgi. Analüüsi eesmärgist lähtuvalt on aga põhjust riskiparameetreid siin etapis täpsustada. Riski tuvastamisel kirjeldas ohuindikaatorit vaid süsteemiosade erinev arvutusvihma intensiivsus, kuid riskianalüüsil modelleeritakse ohuindikaatorina arvutusvihma järgi modelleeritud üleujutust kirjeldavad hüdrodünaamilised näitajad. Ohuolukorda kirjeldavad hüdrodünaamilised näitajad nagu üleujutuse kestvus, tänavale koguneva vee maht ja ka näiteks üleujutusala kõrgus arvutatakse mudelis lähtuvalt valgalade karakteristikutest. Need on aga selgelt seotud kokkupuuteala ja kohanemisvõimekusega. Riskianalüüsi staadiumis ei piirdu ohuparameeter pelgalt vihma erineva intensiivsuse kirjeldamisega nagu riskituvastamisel, vaid ohuparameetriks saavad ohusündmust defineerivad üleujutuse tunnused. Need saadakse äravoolusüsteemi mudeli simulatsioonist, mis võtab aga arvesse vihma-intensiivsust ja kestvust, valgala tunnuseid ja vajadusel ka rakendatavaid kohanemismeetmeid (muutused mudelis).

Kokkupuute ja haavatavuse parameetritena on võimalik rakendada ka esimeses etapis kasutatud näitajaid. Kuigi valgaspetsiifiline kokkupuutepotentsiaal saab arvesse võetud ka ohuindikaatori modelleerimiseks, siis see määrab vaid ohu suuruse (vee maht, üleujutuse kestvus). Kokkupuuteparameeter peab aga näitama, et kuhu see vesi vaadeldava alamvalgala piires koguneb. Haavatavuse hindamisel saab analüüsitava ala spetsiifilisi indikaatoreid kaasata, kuid üldistatuna saab riskitaseme selgitada välja ka linnaülestele haavatavuse näitajatele tuginedes. Siiski on riskianalüüsi staadiumis põhjust riskiparameetrite valikule ja kaalumisele olulisemat tähelepanu pöörata, kuna

analüüsi järeldamises tuleb otsustada mitte ainult riskiklassi vaid ka riskisündmuse tagajärgede osas.

### **Samm 2.2: Alusandmete genereerimine äravoolusüsteemi mudeli simulatsioonidest**

Riskikaalutluse teises etapis läbiviidavas analüüsis on põhjust täpsustada kõiki analüüsi haaratavaid parameetreid. Antud töö ei keskendu aga erinevate sotsiaalmajanduslike näitajate modelleerimisele ega kliimateadusele, mistõttu riskiindeksid arvutatakse ka analüüsetapis (etapp 2) riskituvastuse (etapp 1) kokkupuute ja haavatavuse indikaatoreid kasutades. Etapis 2 peab riskianalüüsi tulemuse määrama üleujutus kirjeldavad hüdrodünaamilised näitajad ja nende põhjal leitud alamindikaatorid. Need genereeritakse äravoolusüsteemi mudeli stsenaariumispetsiifiliste simulatsioonide tulemuste põhjal (joonis 3.5).



Joonis 3.5 Sademevee äravoolusüsteemi mudeli ja linna geinfosüsteemi kombineerimine linnalise üleujutusrisi hindamiseks. Tähisted O, K, H, KV tähendavad ohuparameetrit, kokkupuuteparameetrit, haavatavuse parameetrit ja kohanemisvõimekuse parameetrit. Oluline on mõista, et modelleerimise tulemusena saadakse ohuolukorda kirjeldav koondparameeter, mis sõltub nii analüüsitavast ilmasündmusest, linnaruumist kui ka kohanemismeetmetest.

Mudeli simulatsiooniarvutuse tulemusena saadakse süsteemi sõlmpunkte (kaevud, üleminekud vms.) kirjeldavad hüdrodünaamilised näitajad nagu üleujutuse kestvus, üleujutuse käigus tänavale jõudev vee maht või ka tekkinud üleujutuse veetase. Need näitajad on omakorda võimalik siduda GIS-is sõlmpunktiga seotud alamvalgala

kirjeldavasse andmetabelisse ning nendest genereerida omakorda riskianalüüsis kasutatavad normeeritud indikaatorite rasterkihid.

### Samm 2.3: Riskiindeksite arvutamine valgaladele ja tuvastatud riskipiirkondade visualiseerimine

Antud analüüsi tulemusena tuvastatakse alamvalgalade sademevee üleujutuse riskitase. Nagu ka etapis 1, kasutatakse alamvalgalapõhise riskiindeksi leidmiseks kaarditarkvara rasterarvutuse võimekust. Kasutatud valem erineb mõnevõrra etapis 1 kasutatavast. Lahus vaadeldavate parameetrite asemel on siin kasutusel ohu- ja kohanemistsenaariumi sisendeid arvestav modelleerimistulemustel põhinev kombineeritud indikaator (valem 3.2)

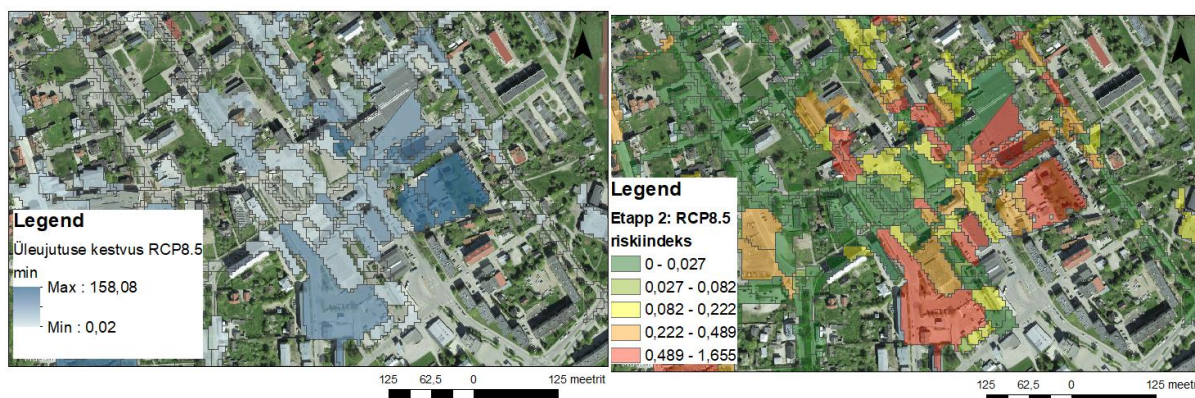
$$Risk_{Etapp\ 2} = \sum \left( a_i \cdot \frac{O_{K,i}}{KV_i} \right) \times \sum (b_j \cdot K_j) \times \sum (c_k \cdot H_k) \quad (3.2)$$

$a_i, b_j, c_k$  riskiparameetrite kaalud, vastavalt ohuparameetri alamindikaatorite, kokkupuute/kohanemisvõime kombineeritud alamindikaatorite, haavatavuse alamindikaatorite kaal.

$K_j, H_k$  riskiparameetri alamindikaatorite väärtus, vastavalt kokkupuute ja kohanemisvõimekuse alamindikaator

$\frac{O_{K,i}}{KV_i}$  modelleeritud ohuolukorra tekkimise potentsiaali esitav kombineeritud alamindikaator

Joonisel 3.6 on näidatud riskianalüüsi etapi tulemusel saadud riskikaardid, sh üleujutust defineeriv alamindikaatori raster (joonis 3.6, vasakul) kõrvutatuna linnaruumi haavatavust arvesse võtva riskikaardiga (joonis 3.6, paremal). On näha, et sarnase kestvusega üleujutus ei päädi samasuguse riskitasemega.



Joonis 3.6 Modelleerimistulemustel põhinev kombineeritud alamindikaatori rasterkiht (vasakul) kõrvutatuna riskiarvutuse tulemusena saadud riskitaseme rastriga (paremal)

Iga võrdlev riskistsenaarium eeldab analüüsi etapis uut simulatsiooni modelleerimistarkvaras. Simulatsioonide sisendparameetrid määratakse lähtuvalt

stsenaariumist mudeli lähtefailis ja simulatsiooni tulemused teisendatakse omakorda GIS tarkvaras riskiarvutuses kasutatavateks indikaatorrasteriteks. Alamindikaatorite normeerimisel on analüüsi võrreldavuse tagamiseks oluline normeerida võrdlusstsenaariumi modelleerimise tulemused baasstsenaariumi maksimumile.

Analüüsi järelmites on vaja iga stsenaariumi kohta kirjeldada tagajärgede olemus ja ulatus, seejuures kirjeldades nii üleujutuse iseloomu (modelleeritud parameetrid) kui ka selle mõju haavatavusele. Järelmite olulise osana antakse hinnang riskianalüüsi usaldusnivoole, mis tuleneb otseselt meetodite valikust ning kasutatud andmete täpsusest. Samuti kirjeldatakse stsenaariumis arvestatud analüüsivate nähtuste keerukus ja ühenduvus ning ajaga seonduvad tegurid ning nende volatiilsus. Riskianalüüsi tulemusena saadakse erinevate riskistsenaariumite võrdlevad riskikaardid ning stsenaariumite avaldumise tõenäosuse-tagajärgede seoseid iseloomustavad maatriksid. Nende andmete põhjal saab liikuda riskikaalutluse kolmandasse, ehk riskide hindamise etappi.

### **3.5 Etapp 3: Riski hindamine**

Riski hindamise etapp on mõeldud analüüsitud stsenaariumite kõrvutamiseks ja nende baasil riski käitlemise alaste otsuste tegemiseks ning selles etapis enam täiendavaid riskiarvutusi läbi ei viida. Riskianalüüsi etapis (etapp 2) selgitati alamvalgalade riskitase erinevates riskistsenaariumites, nende avaldumise tõenäosuse ja väljaselgitatud tagajärgede põhjal otsustatakse kolmandas etapis, kas riski ollakse valmis aktsepteerima või on vaja näha ette leevendusmeetmed.

Vastavalt ISO 31000:2018 riskijuhtimise standardile [6] on riski hindamise etapi eesmärk ebasoodsa sündmuse vastumeetmete alaste otsuste toetamine. See hõlmab riskianalüüsi tulemuste võrdlemist kehtestatud riskikriteeriumitega, mis võimaldab selgitada välja valmiduse riski taluda või vajaduse näha ette lisameetmeid. Riskihindamise järelmites jagatakse riskid aktsepteeritavateks (A), käideldavateks (K) või jääkriskideks (J). Hindamistulemuste järelmites võib otsustada ka täiendavate analüüsivate vajalikkuse või riskianalüüsi eesmärkide korrigeerimise kasuks (eespool, pt. 3.2).

Käesoleva meetodika järgi toimub riskide hindamine ekspertteadmisel. Käitlusklassid (A, K ja J) otsustatakse riski hindaja poolt.

Tabel 3.3 Riskide hindamisel analüüsitud valgalade kohta käsitletav info

Andmeväli	Baasstsenaarium	Võrdlusstsenaarium 1	Võrdlusstsenaarium 2
Arvutatud riskiindeks	$R2_{BS}$	$R2_{VS1}$	$R2_{VS2}$
Stsenaariumi ID	BS	VS1	VS2
Stsenaariumi avaldumise tõenäosus	%	%	%
Üleujutuse iseloom	Modelleerimise tulemus <sub>BS</sub>	Modelleerimise tulemus <sub>VS1</sub>	Modelleerimise tulemus <sub>VS2</sub>
Majanduslik haavatavus	Mõju <sub>BS</sub>	Mõju <sub>VS1</sub>	Mõju <sub>VS2</sub>
Sotsiaalne haavatavus	Mõju <sub>BS</sub>	Mõju <sub>VS1</sub>	Mõju <sub>VS2</sub>
Keskkonna haavatavus	Mõju <sub>BS</sub>	Mõju <sub>VS1</sub>	Mõju <sub>VS2</sub>
Kultuuriline haavatavus	Mõju <sub>BS</sub>	Mõju <sub>VS1</sub>	Mõju <sub>VS2</sub>
Käitlemisotsus	A / K / J		

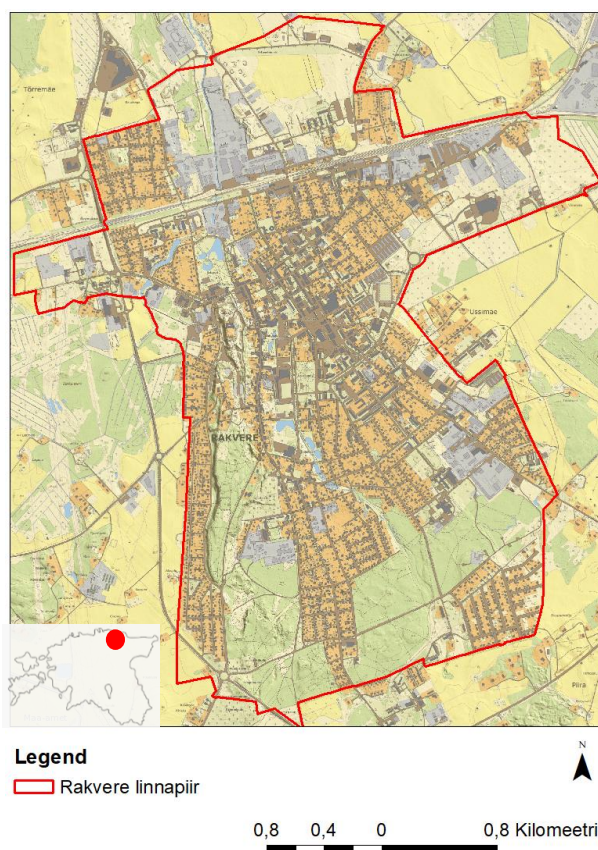
Riski hindamise etapis koondatakse alamvalgalade kohta stsenaariumite põhised riskiparameetreid kirjeldavad andmetabelid, mida saab hinnatavate sekkumispiirkondade kaupa võrrelda. Ideena on riskihindamise tabelites kajastatav info kirjeldatud tabelis 3.3. Riskihindamise staadiumis on võimalik käitlusalternatiivide põhjal arendada välja järgmisi stsenaariume, mida uute kordustena riskianalüüsi etapis simuleerida.

# 4 JUHTUMIUURING METOODIKA VALIDEERIMISEKS

## 4.1 Metoodika rakendamine Rakvere linnas

### 4.1.1 Rakvere linna kirjeldus

Rakvere linn (10,75 km<sup>2</sup>, joonis 4.1) asub Lääne-Virumaal, Pandivere kõrgustiku põhjaserval. Linnast voolavad läbi Soolikaoja ja sellesse suubuv Tobia peakraav [55]. Linn asub Ida-Eesti Vesikonnas, nitraaditundlikul ja kaitsmata põhjaveega alal [88]. Reljeefilt on Rakvere linn vahelduv, linna lääneosas paikneb järkude nõlvadega Vallimägi (suhteline kõrgus 15-20 m), idapoolsed linnaosad on laugema reljeefiga [55]. Asustustiheduselt on linn Tallinna järel Eestis teisel kohal (1394 in/km<sup>2</sup>) [89].



Joonis 4.1 Rakvere linna kaart

Rakveres on hästi esindatud erinevad sademevee käitlemislahendused: siin on jätkuvalt ühisvoolseid süsteemiosasid, lahkvoolseks viidud valgalasid ning ka nutikaid ja looduspõhiseid lahendusi. Rakvere linnavalitsus ja vee-ettevõtte on juba pikemat aega aktiivselt panustanud linna sademeveesüsteemi juhtimise täiustamisse – siin on heal tasemel linna äravoolusüsteemi GIS ning valitud piirkondadele on koostatud ka



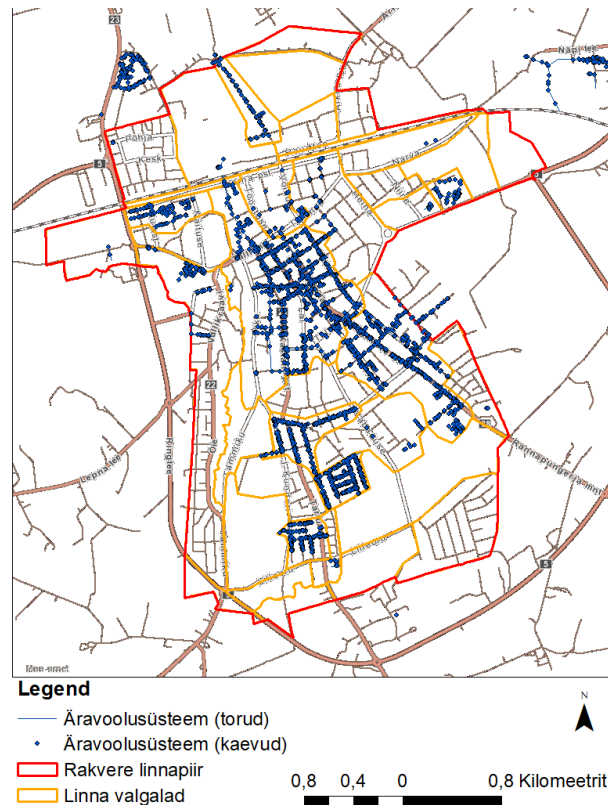
süsteemi hüdraulilised mudelid. Linn tervikuna on seadnud endale ambitsioonikad keskkonna- ja kliimaeesmärgid ja panustab nende täitmisse [90]. Kõik eelnev teeb Rakverest sademeveesüsteemide jaoks hea mudellinna.

Vastavalt Rakvere linna ühisveevärgi ja kanalisatsiooni arengukavale (Rakvere ÜVKA) on linna sademeveesüsteem valdavalt ühisvoolne [70]. See väide jätab aga arvesse võtmata suhteliselt suure osa linnast, kus sademevee äravoolusüsteem üldse puudub. Lahkvoolsetena on välja ehitatud märkimisväärne osa linnasüdamest. Kuna aga linnas on nõrgalt kaitstud põhjavee ja kõrge pinnaveetaseme tõttu looduslik immutusvõime nõrk ning ühisvoolse süsteemi vastuvõtuvõime valingvihmadele ebapiisav, on oluline lahkvoolse sademeveesüsteemi laiendamine. Ulatuslike investeeringute põhjenduseks ning võimalike lahendusalternatiivide kaalumiseks on oluline tuvastada nii ülelinnaline üleujutusrisk kui ka analüüsida lokaalsemaid riskialteid piirkondi.

#### **4.1.2 Etapp 1: Valgaladepõhine sademevee üleujutuse riski tuvastamine Rakveres**

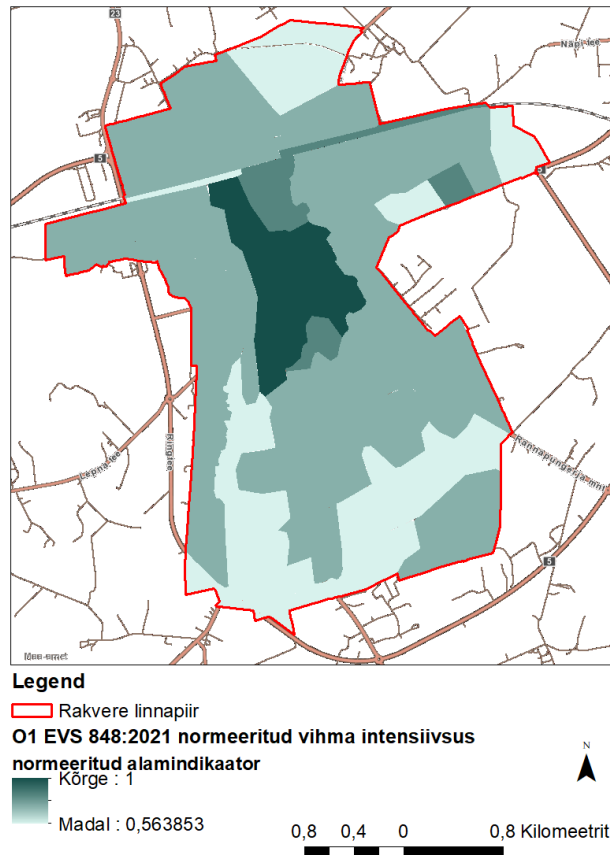
Üleujutuse riski tuvastamiseks Rakvere linnas kirjeldati linna äravoolusüsteemi valgalad, analüüsiti riski baasstsenaariumit ning selle võrdlusena linna rohealade suurendamise potentsiaali.

Rakvere linna süsteemiosade kaardistamisel (joonis 4.2) kasutati antud töös maapinna kõrgusmudeli põhiseaduse automaatset genereerimist (kasutades ESRI ArcMap 10.7.1 Toolbox Spatial Analyst Hydrology töövahendite võimalusi) [91]. Saadud tulemusi täpsustati linnaruumi ja sademeveesüsteemi GIS andmestiku põhjal. Pelgalt automaatselt genereeritud valgalasid ei saa linnaruumi analüüsil kasutada, kuna isegi 1x1 m täpsusega maapinna kõrgusmudel ei anna piisavat täpsust linna valgalade paiknemisest arusaamiseks. Käesolevas töös esitatav riskianalüüs tugineb Rakvere linnavalitsuse ja AS Rakvere Vesi andmebaasidele ning erinevatele avaandmetele. Ülelinnaliseks riskianalüüsiks koondati vajalikud alusandmed ning valmistati ette üleujutusriski indikaatoreid iseloomustavad rasterkaardid ohutõenäosuse, kokkupuuteala ja mõjutatavate nähtuste tuvastamiseks (joonised 4.3-4.8).



Joonis 4.2 Rakvere sademeveekäitluse süsteemiosad

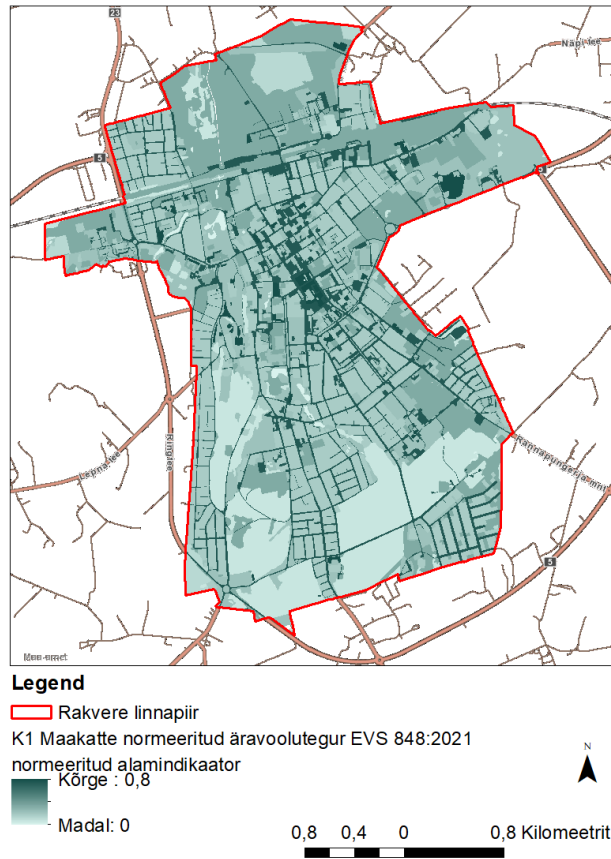
Riskituvastamise etapi baastsenaariumis kirjeldab ohuparameetrit arvutusvihma intensiivsus, mis on taandatud süsteemiosadele vastavalt EVS 848:2021 toodud metoodikale [24]. Valgalade maakasutusest lähtuvalt määrati arvutusvihma korduvus, mille põhjal omakorda määrati standardi arvutuspõhimõtteid ja Rakvere lokaalset kliimat arvestav vihma intensiivsus (joonis 4.3). Maakasutusest ja linnaruumi eripärast lähtuv arvutusvihma intensiivsus on tüüpiline ohuparameetrit iseloomustav indikaator. Rakvere süsteemiosad varieeruvad looduslikest aladest (kordussagedus 1) kuni tihedate linnakeskusteni (kordussagedus 5). Kasutades arvutusvihma intensiivsuse valemit, leiti 5 min Rakvere valingvihma intensiivsus, mis omakorda normeeriti maksimumile. Kuigi standardikohaselt ei rakendata väliskanalisatsioonivõrgu projekteerimiseks 5 minuti arvutusvihma, on riskianalüüsi esimesel tasemel hea kasutada alamindikaatori normeerimisel hästi eristuvat võrdlusbaasi. Riskifunktsioonis kasutatava alamindikaatorina on intensiivsuse näitaja normeeritud, mistõttu vihma kestvus absoluutväärtusena riskitaset ei mõjuta.



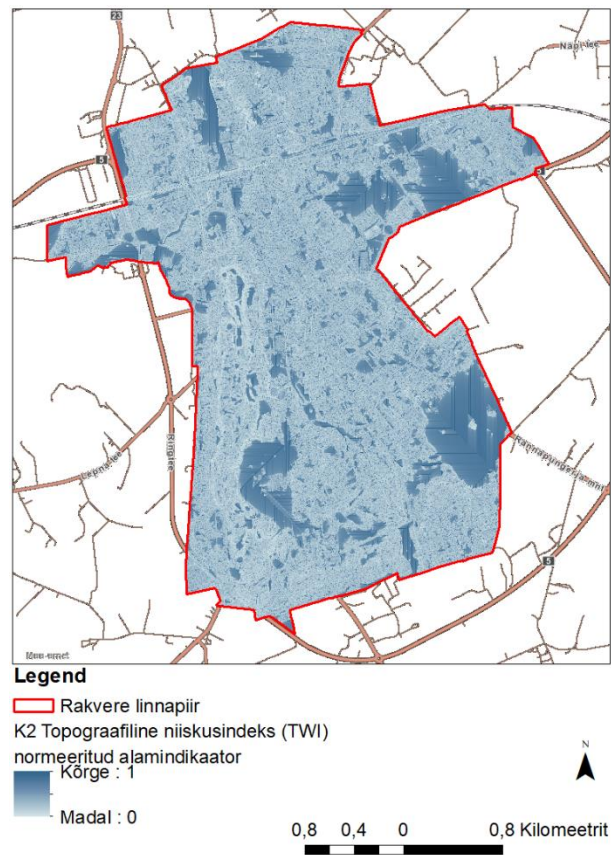
Joonis 4.3 Ohuparameetrit (O1) esitab arvutusvihma intensiivsus, mis on taandatud süsteemiosadele vastavalt EVS 848:2021 toodud meetoodikale [24]

Kokkupuuteparameetri alamindikaatorina kasutati kahte näitajat – maapinna äravoolutegurit ja topograafilist niiskusedekst. Maapinna äravoolutegur genereeriti Eesti põhikaardi 1:10000 maakasutustüübi (tyyp\_t) ja EVS 848:2021 äravooluteguri klassifitseerimise põhjal (joonis 4.4). See alamindikaator kirjeldab kokkupuuteala kujunemist lähtuvalt linnaruumi infiltreerumise võimest.

Teise alamindikaatorina kaasati kokkupuuteparameetrit kirjeldama topograafiline niiskusedeks (joonis 4.5). Topograafiline niiskusedeks kirjeldab alamindikaatorina kokkupuuteala tekkimist tulenevalt maapinna reljeefist.



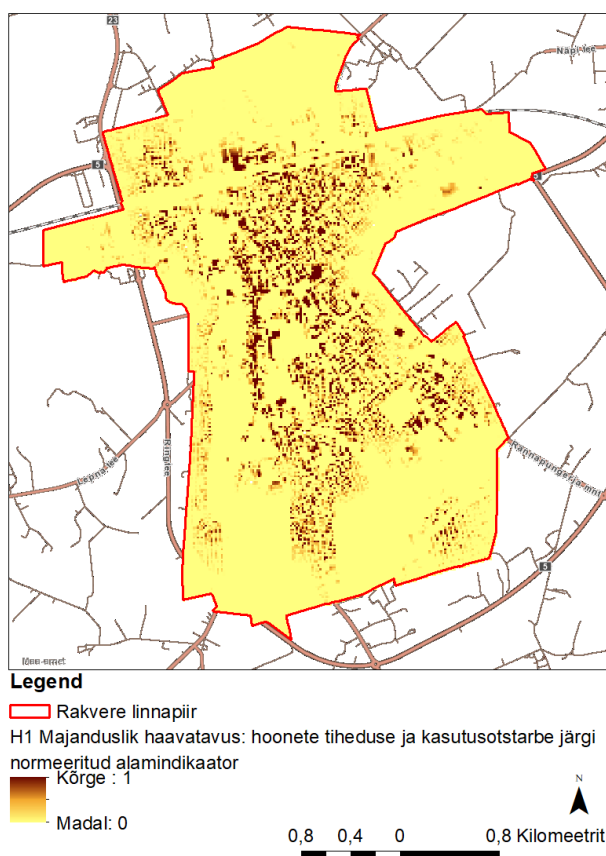
Joonis 4.4 Kokkupuuteparametri alamindikaator maakatte normeeritud äravoolutegur (K1)



Joonis 4.5 Kokkupuuteparametri teine alamindikaator (K2) topograafiline niiskusindeks (TWI)

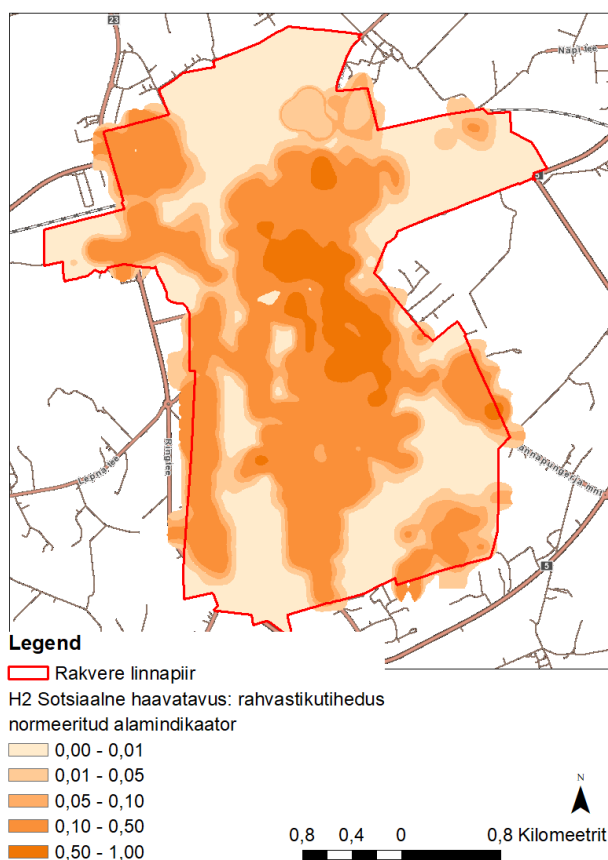
Haavatavuse parameetritena kasutati üelinnalises kaardistuses majandusliku haavatavuse näitajaks hoonestatud ala tihedust ja funktsioonist lähtuvat väärtust (joonis 4.7), sotsiaalse haavatavuse näitajaks rahvastikutihedust (joonis 4.8), keskkonna haavatavuseks süsteemiosade iseloomu (joonis 4.9) ja kultuurilise haavatavuse jaoks muinsuskaitsealade ja miljööväärtuslike piirkondade olemasolu (joonis 4.10). Seejuures kaaluti majanduslikku ja sotsiaalset haavatavust kaaluga 1, kuid keskkonna ja kultuurilist haavatavust meelevaldse kaaluga 0.5. Siin on töö edasiarendustena potentsiaali koostöökis linnakorralduse distsipliinidega avalikkuse üleujutustundlikkuse ning valitsemisotsustel põhinevate haavatavuse parameetrite kaalumise täpsustamiseks.

Joonisel 4.7 toodud hoonete haavatavuse alamindikaatori kaart näitab analüüsiaruudus summeeritud hoonete kasutusotstabe klassi (Eluhoone/ärihoone - 3; Kõrvalhoone - 2; ehitatav hoone/vundament - 1; Vare - 0). Selliselt kirjeldab analüüsikaart nii hoonete tihedust, kui ka nende funktsiooni, suunates riskihinnangut kõrgemaks alades, kus on rohkem eluhooneid ning pidades vähemoluliseks riski varemetele ning üldse hoonestamata aladele.



Joonis 4.6 Majanduslikku haavatavuse indikaatoriks on kasutatud hoonestatud alade tihedust ja funktsiooni kirjeldav rasterkaart, kus Põhikaardi [83] hoonete kihi hoone tüübi (tyyp\_t) tärkinfo järgi on antud hoonete funktsioonist lähtuv klassifitseering ning see summeeritud 10x10m kaardiruudustikule.

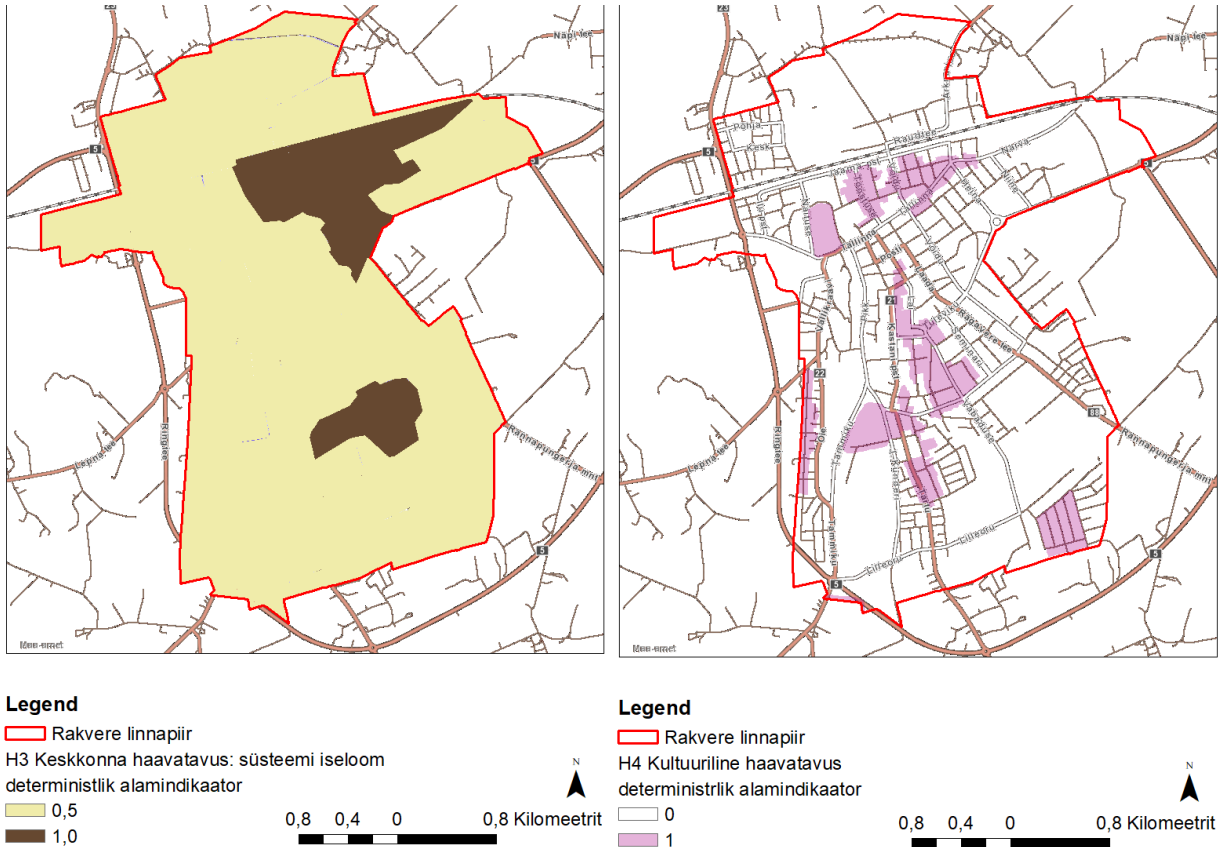
Sotsiaalse haavatavuse alamindikaatorina (joonis 4.8) on antud meetodikas kasutusel rahvastikutihedust kirjeldav näitaja, mis ei võta arvesse erinevate inimeste varieeruvat haavatavust üleujutusrisi tingimustes ning seda, et haavatavamad elanikurühmad võivad koonduda kindlatesse linnapiirkondadesse. Alusandmetena kasutati haavatavuse alamindikaatori kaardi genereerimiseks Rakvere üldplaneeringu rahvastikutiheduse kaardikihti, mis kirjeldas linna rahvastikutihedust 7 klassina (0, 1-5, 5-10, 10-25, 25-50, 50-75, 75-100, 100 ja enam inimest hektari kohta). Antud klassid normaliseeriti iga vahemiku alampiiri järgi kõige kõrgema tihedusega vahemiku alampiiri järgi. Tulemuseks on saadud Rakvere rahva üleujutuse haavatavuse kaart, mis näitab seda, millistes piirkondades kahjustab üleujutus kõige enam inimeste kodusid.



Joonis 4.7 Sotsiaalse haavatavuse näitajaks on normeeritud Rakvere linna rahvastikutiheduse andmed [69]

Kultuurilise ja keskkonnakaitselise haavatavuse indikaatoritena kasutati kiiranalüüsile sobivalt lihtsaid andmekogumeid. Keskkonna haavatavuse indikaatoriks kasutati süsteemi iseloomu kirjeldavat analüüsikaarti, kus lahkvoolne süsteemiosa (mis toimib eraldiseisva sademevee äravoolusüsteemina või loodusliku äravoolu ja immutamisalana) on hinnatud keskkonnakaitseliselt vähemhaavatavamaks kui ühisvoolne süsteemiosa (joonis 4.8, vasakul). Valgala iseloom määrati valgalade kirjeldamisel äravoolusüsteemi kaardandmete ja Rakvere ÜVKA andmetele tuginedes

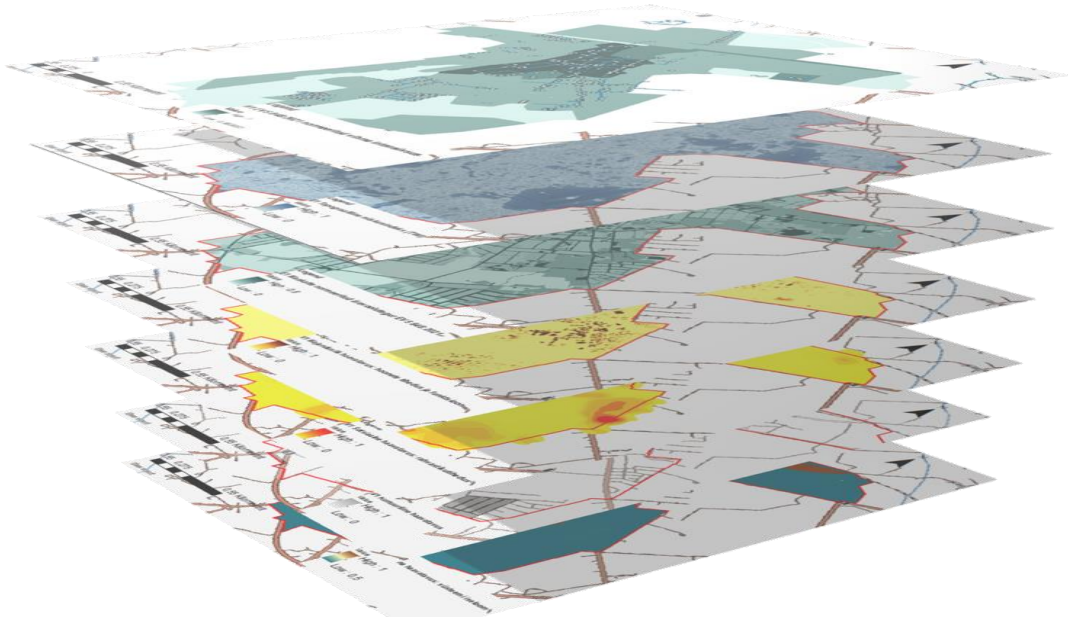
[70]. Kultuurilise haavatavusena (joonis 4.8, paremal) on võrdse osakaaluga võetud arvesse nii muinsuskaitseala võõndite esinemist [84] kui linna üldplaneeringus toodud miljööväärsete piirkondade esinemist [69]. Valdav osa linnas kultuurilist haavatavust ei eristata.



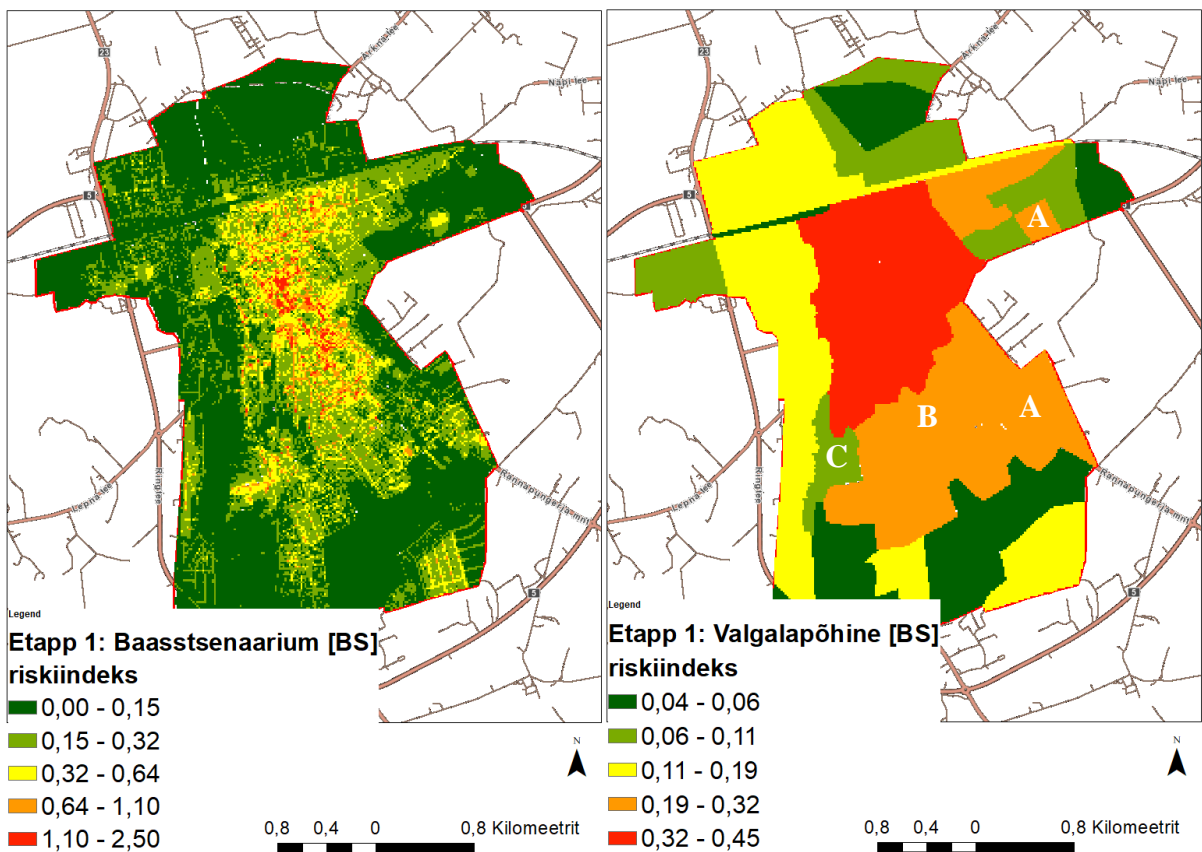
Joonis 4.8 Ülelinnalise keskkonna haavatavuse indikaatorkaart – H3 (vasakul). Ülelinnalise kultuurilise haavatavuse indikaatorkaart – H4 (paremal)

Ettevalmistatud indikaatorite rasterkihte rakendatakse riskifunktsiooni valemis (3.1) ja arvutus viiakse läbi GIS rasterarvutuse võimalusi kasutades (ArcGIS MapAlgebra RasterCalculation tööriist). Ideena esitab läbi erinevate kaardikihtide toimuvat arvutust joonis 4.9. Arvutuse tulemusena saadakse hajutatud riskikaart (joonis 4.10, vasakul). Taoline tulemus on riskialüüsiks eksitav, kuna ei näita tegelikke üleujutusalasid vaid ainult tuvastab riskialtid piirkonnad. Seetõttu on oluline keskmistada riskitasemed varem ettevalmistatud valgaladele (joonis 4.10, paremal).





Joonis 4.9 Algstsenaariumi kattuvusanalüüsiks kasutatakse kaarditarkvaras rasteranalüüsi meetodeid (ESRI ArcMap 10.7.1 Toolbox'is Spatial Analyst valikus Map Algebra ->Raster Calculation [93])



Joonis 4.10 Üleujutusrisi baasstsenaarium, visualiseeritud hajutatud riskindeksi rastrina (vasakul) ja valgaladele keskmistatuna (paremal)

Riskitasemed klassifitseeriti ArcGIS loomuliku jaotuse optimeerimismeetodiga. Selle põhjal liigitub kolm valgala kõrgeima riski tasemele (punane ala), piirkond mis kattub



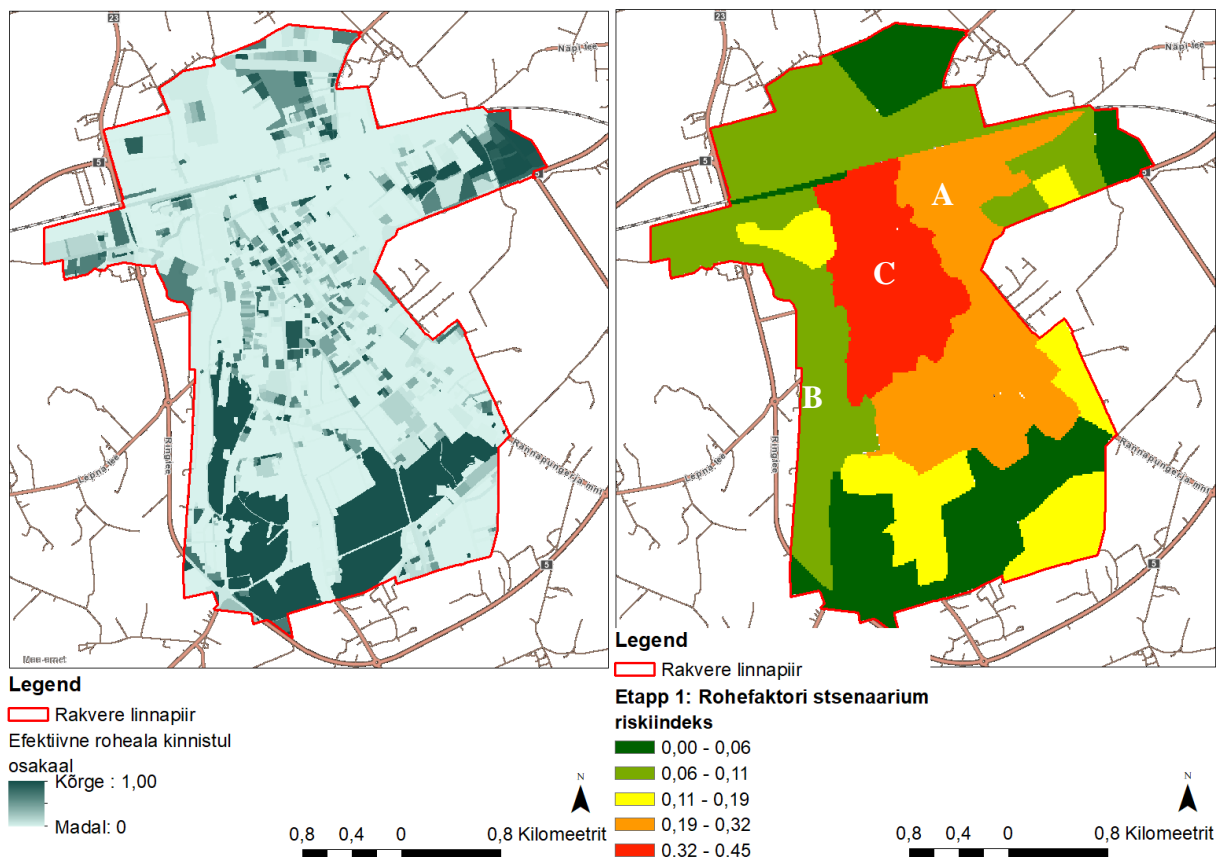
Rakvere südalinnaga. Üheksal valagalal riski ei tuvastatud (tumeroheline), need on Rakvere linna looduslikud alad (puhkemetsad, pargid ja arendamata rohealad). Kaheksal valgalal on risk madal (heleroheline), need on enamasti hõredalt asustatud elamu- või ärimaad. Ligikaudu pool linnast on keskmise (kollane) ja olulise (oranž) riski piirkonnad. Nende liigitumine erinevatesse klassidesse varieerub, nt on osade alade oluline riskitase tingitud sellest, et tihedalt hoonestatud alad paiknevad reljeefi madalatel aladel (joonis 4.9 paremal, alad A). Osad alad liigituvad kõrgemasse riskiklassi, kuna seal paiknevad kultuuriväärtused (joonis 4.9 paremal, ala B). Pelgalt muinsuskaitseväärtus aga riskitaset ei näita, sest Rakvere linnus (joonis 4.9 paremal, ala C) liigitub madala riski alaks, kuna asub linnamäel ja sinna vesi ei kogune.

### **Rohefaktori stsenaarium**

Võrdlusstsenaariumina testiti riskide tuvastamise etapis rohefaktori stsenaariumit. Linnade mitmetahuliste kliimakohanemise väljakutsete lahenduseks peetakse mitmik-kasusid pakkuvaid looduspõhiseid lahendusi. Nii on ka sademeveekäitluse kliimakohanemiseks pakutud välja rohefaktori rakendamine, kus kinnistutele seatakse kohustuseks tagada kinnistu sihtotstarbest lähtuv efektiivse roheala osakaal [94]. Efektiivseks rohealaks loetakse kinnistu osa, mis panustab sademevee äravoolu vähendamisse. Terviklikul kujul haarab rohefaktori meetodika kinnistul efektiivse roheala hulka ka rohekatused ja suured puud, kuid käesolevas analüüsis loetakse kinnistu rohefaktori hulka kinnistu osad, mis liigituvad põhikaardi maakasutustüübi järgi haljasaladeks, rohumaadeks, metsadeks ja põõsastikeks ning põldudeks ja aianduslikuks maaks. Rohefaktori nõudega kehtestatakse kohustuslik minimaalne rohealade osakaal kinnistutel ning lisaks sellele ka eesmärktase. Näiteks on Helsingis ärimaadele kehtestatud 20% rohealade miinimum, samas kui elamualadel 50% rohealade miinimum [94].

Rohefaktori rakendamise tõhususe esialgseks hindamiseks tuvastati Rakvere linna jaoks ülelinnaline üleujutusrisi muutus, kui baastaset võrrelda stsenaariumiga, mille juures Rakveres kehtiks kõigile kinnistutele minimaalselt 30% rohealade osakaalu nõue. Antud juhul ei arvestata arendusstsenaariumit, kus täna 100% rohealade osakaaluga kinnistud vähendaks rohelist 70%, küll aga kõigil kinnistutel, kus täna rohelahtused puuduvad, tekiks neid vähemalt nõude ulatuses. Rohefaktori stsenaariumi riskitaseme leidmiseks koostati kõigepealt Rakvere kinnistute rohealade osakaalu analüüsikaart (joonis 4.11, vasakul). Kaart on koostatud kinnistute ja põhikaardi rohealade kaardi kattuvusanalüüsi põhjal ja täitab ennekõike eesmärki tutvustada riskituvastamisemeetodit, mitte ei pretendeeri Rakvere täiuslikule rohefaktori teemakaardile. Rohealade osakaalu põhjal koostati kohanemistsenaariumi analüüsikaart, milles määrati kinnistupõhine kohanemise alamindikaator, mis näitab puudujääki rohefaktori nõude (30%) lävendist.

Kasutades valemit 3.1, arvutati rohefaktori riskitase ja keskmistati see süsteemiosadele (joonis 4.11, paremal). On näha, et mitmetel aladel vähendab rohefaktori rakendumine riskitaset (joonis 4.11, paremal alad A, B), kuid linnasüdames riskitase oluliselt ei muutu (joonis 4.11, paremal ala C).



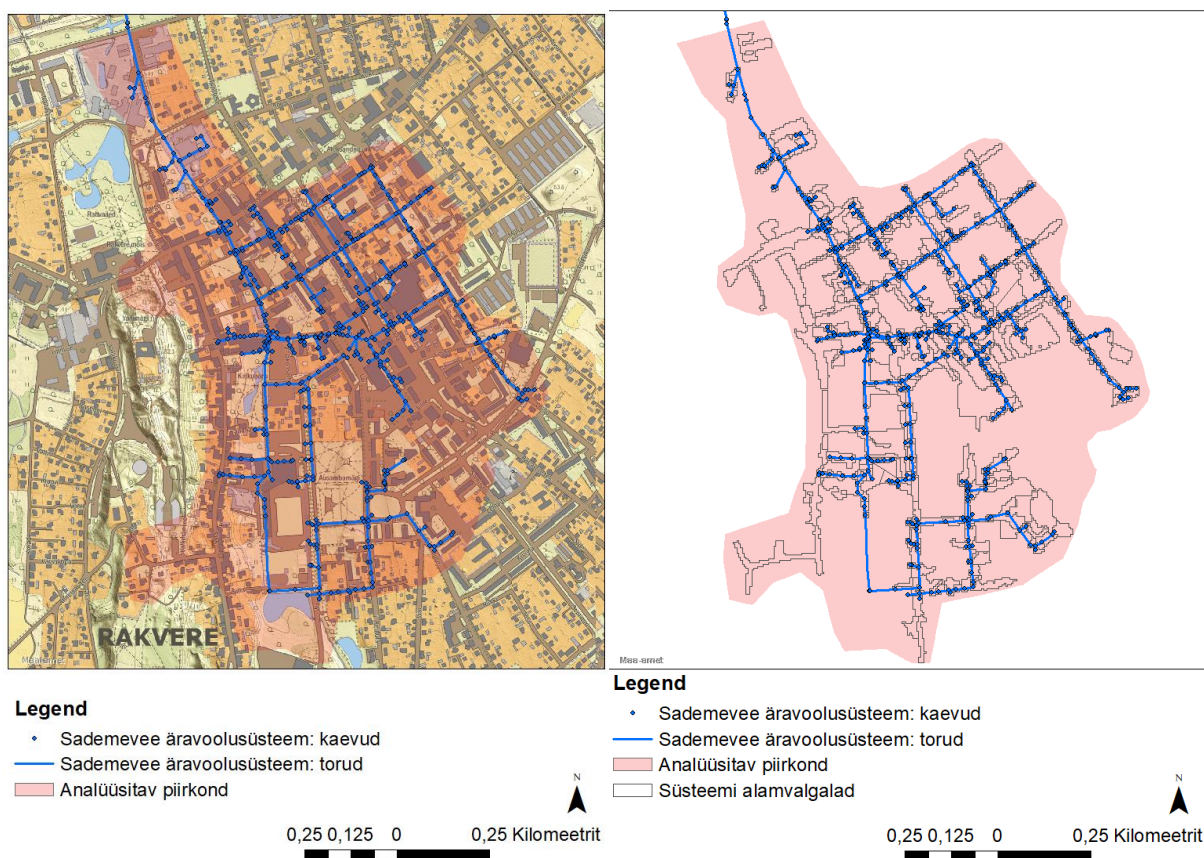
Joonis 4.11 Efektiivse roheala osakaalu kaart Rakveres (vasakul) ja rohefaktori nõude rakendumisel muutuv riskitase (paremal).

Oluline on erinevate stsenaariumite riskitasemete kõrvutamisel kasutada sama skaalat baasstsenaariumiga. Alternatiivsel juhul (nt. riskivahemikke automaatselt kuvades), ei ole võrdlevat analüüsi võimalik rakendada.

### 4.1.3 Etapp 2: Sademevee üleujutuse riskianalüüs Rakvere südalinnas

Töös väljapakutud meetoodika riski tuvastamise etapis selgitati välja, et suurim üleujutuse risk on Rakvere südalinna piirkonnas (joonis 4.12). Arvestades, et antud piirkonnas on lahkvoolne sademeveekanaliseatsioon, on etapis 2 põhjendatud üleujutusrisiki detailne analüüs kasutades äravoolusüsteemi mudelit. Rakvere südalinna sademevee äravoolusüsteemi mudel on koostatud ja kalibreeritud Interreg BSR projekti

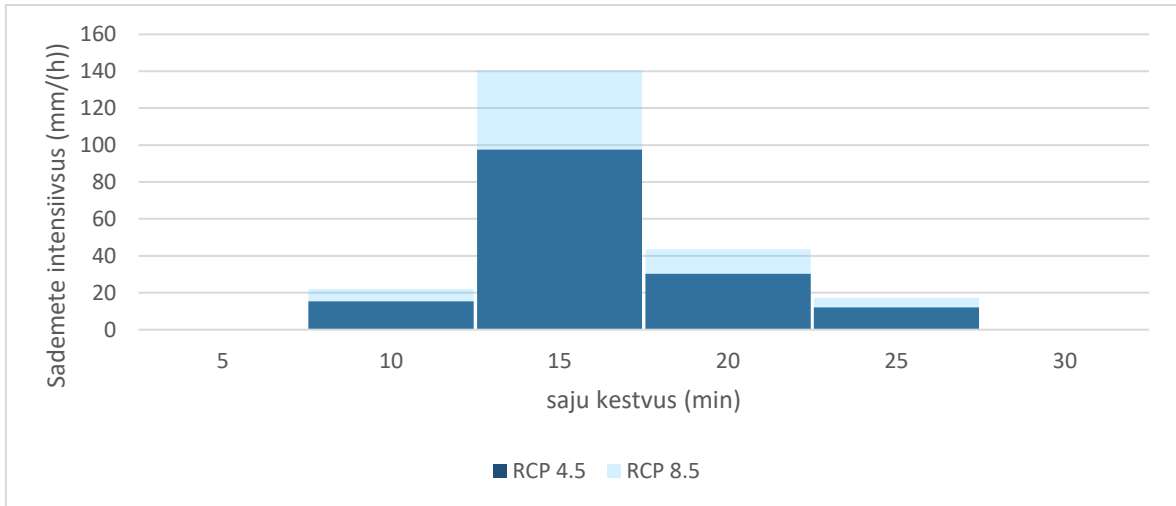
NOAH raames [11] ja antud töö tarbeks mudelit ei täiustatud. Mudeli ettevalmistamisel genereeriti äravoolusüsteemi valgala automaatselt kasutades GISToSWMM tööriista [87]. See lahendus aitab maakatte parameetrite ning maapinnamudeli põhjal luua ja kirjeldada iga restkaevu jaoks valgala. Automaatselt genereeritud valgala kontrolliti ja parandati Rakvere Vee ja linnavalitsuse spetsialistide tagasiside põhjal. Mudelit rakendati riskianalüüsis kliimamuutustega kaasneva üleujutusrisi väljaselgitamiseks. Mudelipõhise üleujutusohu valgalapõhist kaardistamise lahendus on juba välja pakutud Truu et al. 2021 [12] poolt, kuid see töö ei võta arvesse linnaruumi erinevat haavatavust. Antud töös on see puudujääk kõrvaldatud.



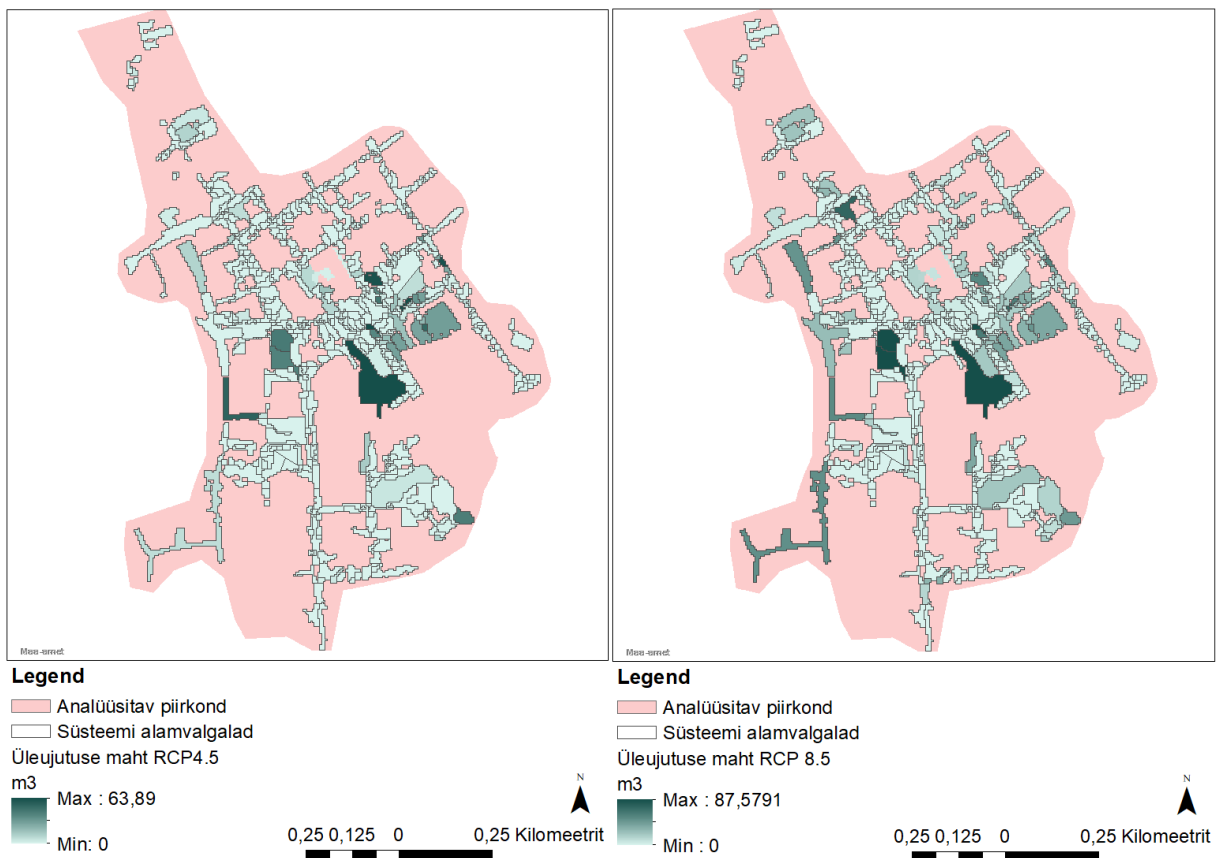
Joonis 4.12 Rakvere linnaülese sademeveeüleujutuste riskianalüüsi tulemusena tuvastati kõige suurema riskiga piirkonnaks südalinna piirkond (vasakul). Detailse riskianalüüsi aluseks on piirkonna äravoolusüsteemile genereeritud alamvalgala (paremal).

Riskikaalutluse teise etapi ehk analüüsi võimaluste tutvustamiseks analüüsiti Rakvere südalinna üleujutusrisi lähtuvalt erinevatest kliimastsenaariumitest (RCP4.5 ja RCP8.5). Antud kliimastsenaariumid on Eesti riikliku kliimamuutustega kohanemise arengukavas kirjeldatud arenguteed [77]. Riikliku tasandi kliimastsenaariumite taandamine Rakverele toimus läbi standardkohase arvutusvihma, mida võimendati kliimastsenaariumi projektsiooniga, vastavalt Soomes kasutatud metodikale [25]. Riskianalüüsil valiti baasstsenaariumiks RCP4.5 ja võrdlusstsenaariumiks RCP8.5.

Võrdlusstenaariumites analüüsiti tuleviku kliimariske tänase linnaruumi tunnuste suhtes, arvestamata valgalade sisendparameetrites linna tihenemise või rahvaarvu muutusega seonduvaid sisendparameetrite muutust, mida meetodika ka võimaldaks. Kliimastenaariumites arvesse võetav keskpika perioodi sademete intensiivsuse prognoos on esitatud joonisel 4.13.

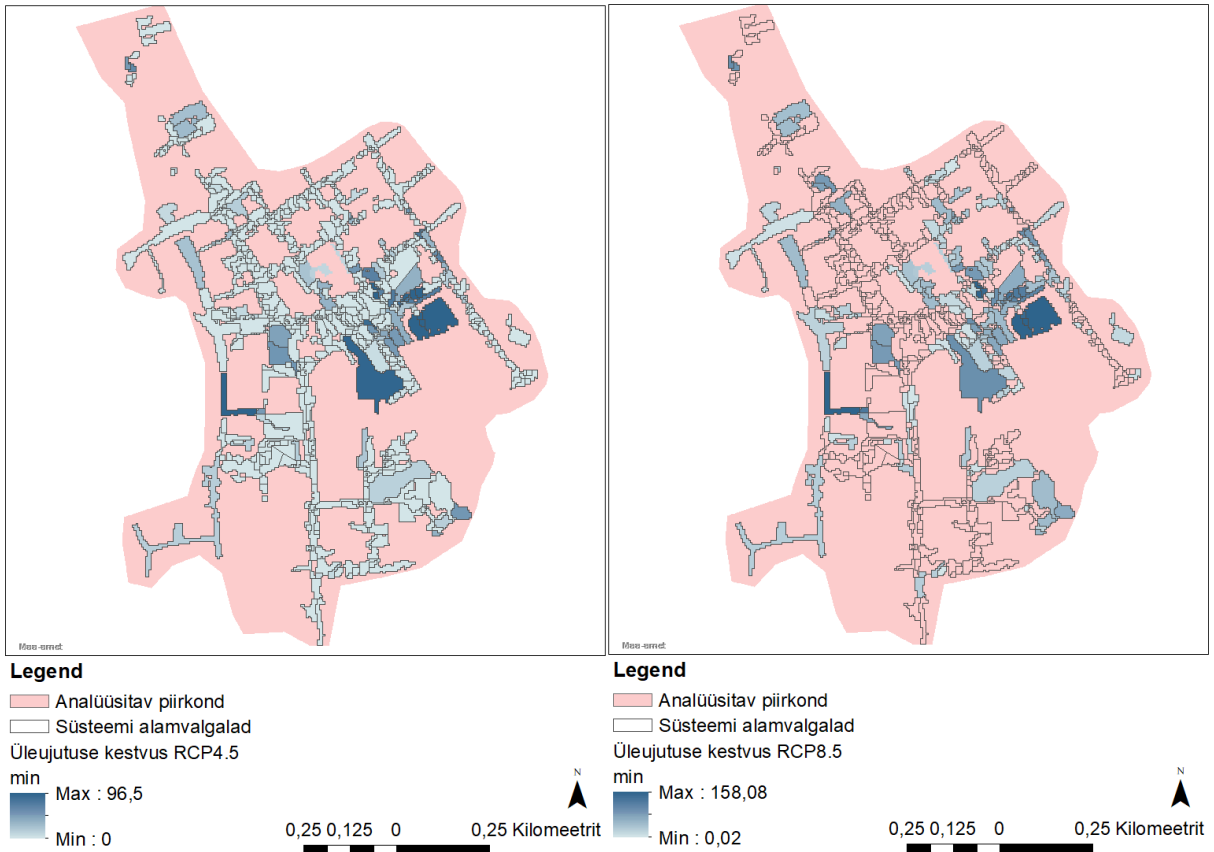


Joonis 4.13 Riskistsenaariumitena kirjeldatakse erinevad kliimastenaariumid võetakse mudelis arvesse sademete intensiivsuse kestvuse graafik.



Joonis 4.14 Üleujutuse käigus tänavale koguneva vee modelleeritud maht (m<sup>3</sup>). Vasakul RCP4.5, paremal RCP8.5 (NB! skeemidel on erinevad väärtuste skaalad).

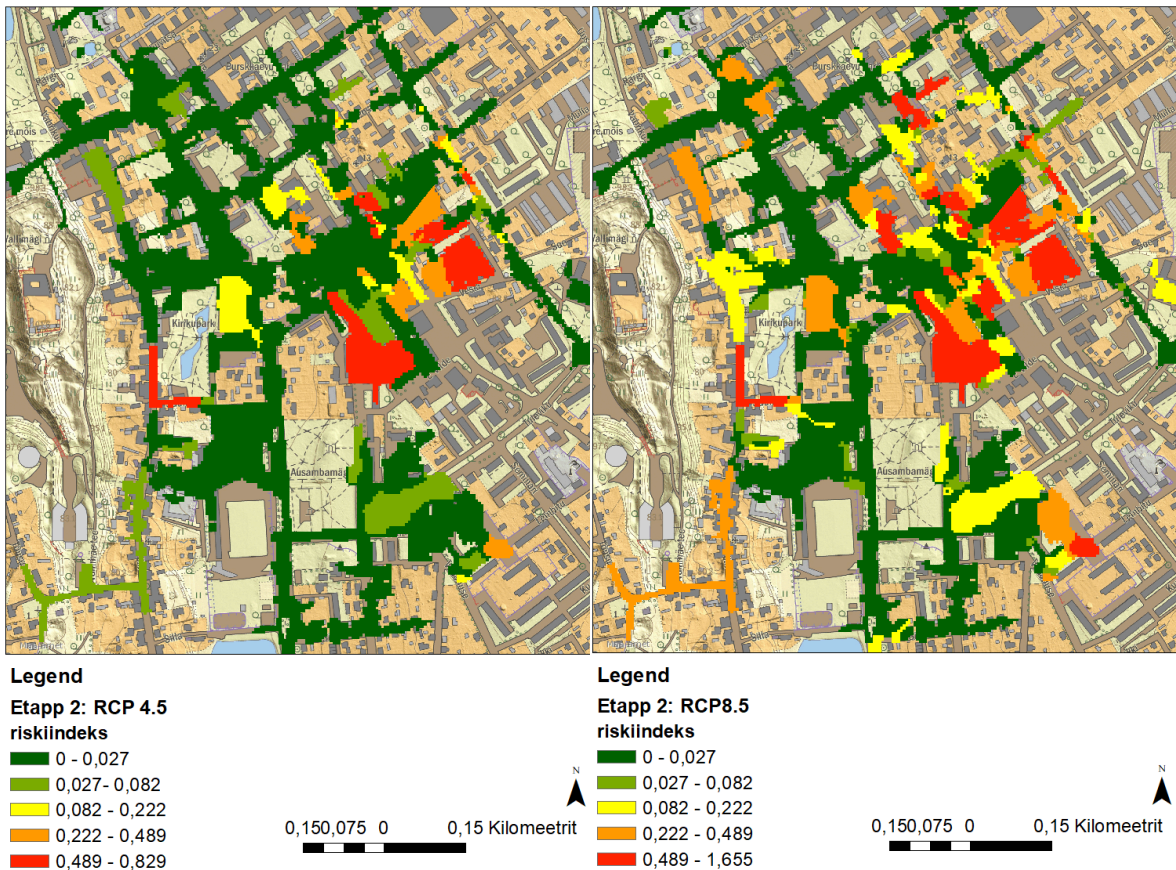
Alamindikaatoritena täpsustati sademevee mudeli põhjal ohuparameetrid, kokkupuuteala ja haavatavuse parameetritena kasutati riski tuvastamise etapis kasutatud mõõdikuid (vt Etapp 1 punktis 4.2). Modelleerimise tulemustest kasutati riskiparameetri alamindikaatoritena mudeli poolt tuvastatud äravoolusüsteemi üleujutatavate restkaevude andmeid, sh üleujutuse kestvust (*flood duration, s*) ja süsteemist väljunud vee kogust (*flood volume, m<sup>3</sup>*). Modelleerimise tulemusena on saadud üleujutuseohtu defineerivad ohukaardid, mis kirjeldavad üleujutuse käigus tänavale koguneva vee hulka (joonis 4.14) ja üleujutuse kestvust (joonis 4.15)



Joonis 4.15 Üleujutuse modelleeritud kestvus (min). Vasakul RCP4.5, paremal RCP8.5 (NB! skeemidel on erinevad väärtuste skaalad)

Ohukaartide põhjal koostati riskifunktsioonis kasutatavad alamindikaatorid, mida normeeriti baasstsenaariumi maksimumile – antud juhul, RCP4.5 maksimumile. Sellega lahendati joonistel 4.14-4.15 esitatud erinevate skaalade küsimus, mis raskendab analüüsitulemuste võrdlemist. Saadud alamindikaatorite rasterkaardid haarati riskifunktsiooni valemisse (valem 3.2), mille tulemusena arvutati valgalade riskitase (joonis 4.16, tabel 4.1).





Joonis 4.16. Rakvere südalinna sademevee üleujutuse riskitase võrrelduna erinevate kliimastsenaariumite realiseerumise korral. Vasakul RCP4.5 ja paremal RCP8.5.

RCP4.5 kliimastsenaariumi avaldumisel jäaks Rakvere südalinna äravoolusüsteemi alamvalgaladest üleujutusriskist puutumata 73%, RCP8.5 kliimastsenaariumi korral väheneks selliste alade pindala 56%. Kõrge riskiga on RCP4.5 korral 7% alamvalgaladest, RCP8.5 korral juba 11%. Kõigi valgalade keskmine riskitase on vastavalt  $R_{RCP4.5}=0,073$  ja  $R_{RCP8.5}=2,124$ . Keskmisest kõrgema riskiga on RCP4.5 korral 18% ja RCP8.5 korral 31% südalinna äravoolusüsteemi mõjualast.

Vastavalt Eesti riikliku kliimamuutustega kohanemise arengukavale on tõenäosus, et stsenaariumi avaldumisel sagenevad keskpikal perioodil (2041-2070) ööpäevas üle 30mm ületavad sademed RCP4.5 puhul 167% ja RCP8.5 puhul 188% [77]. RCP4.5 on peetud IPCC baasstsenaariumiks, mille avaldumise tõenäosus on 42%, optimistliku maailmavaatega hindajad on halvema arengutee RCP8.5 hinnanud vähemtõenäoliseks määrates tõenäosuseks 12%. Riskide hindamise staadiumis, kus vaagitakse ka riskikäitlusmeetmete kulu-optimaalsuse suhet, on põhjust kliimastsenaariumite avaldumistõenäosus põhjalikumalt arvesse võtta.

Tabel 4.1 Rakvere südalinna sademevee üleujutuse riskianalüüsi tulemus

Riskiklass	Riskiindeksi vahemik	Südalinna alamvalgalade riskiklass	
		RCP4.5%	RCP8.5%
Riskita	0-0,029	73%	56%
Madal risk	0,029-0,107	13%	7%
Keskmine risk	0,107-0,253	4%	16%
Oluline risk	0,253-0,487	3%	10%
Kõrge risk	0,487-1,655	7%	11%
Stsenaariumi keskm riskiindeks		0,07309	0,18372
Keskmisest kõrgema riskiga alad		18%	31%

#### 4.1.4 Etapp 3: Riskide hindamine

Rakvere südalinna sademevee alamvalgaladepõhise riskianalüüsi tulemusena on ligikaudu viiendik südalinnast keskmisest kõrgema sademevee üleujutuse riskiga. Riski hindamise etapis tuleb iga alamvalgala kohta otsustada, kas tegemist on aktsepteeritava (A), käideldava (K) või jääkriskiga (J). Esmasel riskikaalutlusel tuleb määrata käitlemisotsused ekspertteadmisele tuginedes. Kui riskikaalutus saab olema juba linna kaasava riskijuhtimise osa, kus protsessi seire ja kogukonna riskivalmiduse põhjal saab riskide käitlustasemetele määrata kindlad lävendid.

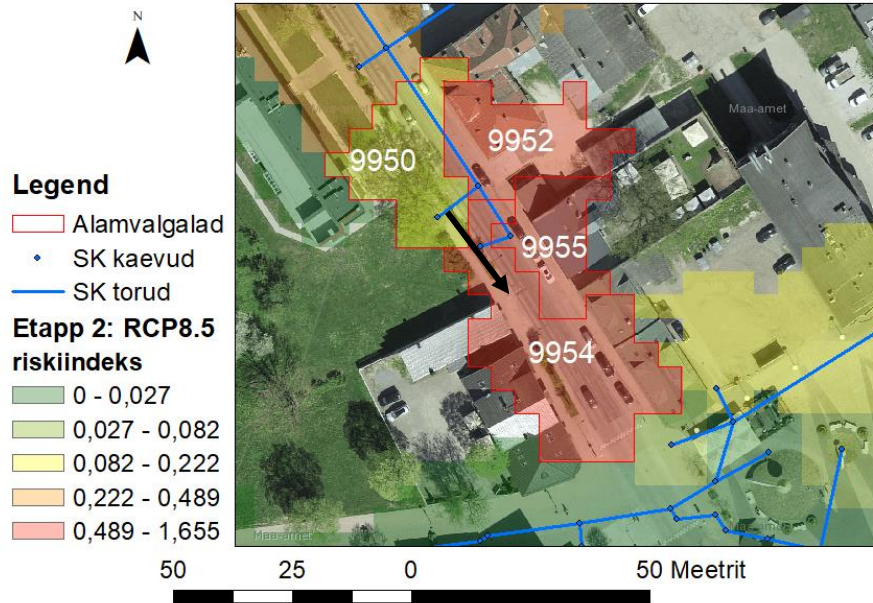
Riski hindamise etapis tuletatakse käitlusalternatiivid, millele omakorda võib olla vajalik kujundada järgmised stsenaariumid, mida saab uue kordusena riskianalüüsis etapis simuleerida. Metoodikast lähtuvalt on riski hindamise etapis sekkumispirkonna kaupa vaadata kõigi riskiparameetrite mõju ja selle põhjal otsustades teha järeldusi, kas riski käitlemine käib läbi aktiivse sekkumise, et ohuolukorda vältida või läbi erinevate mittestruktuursete meetmete linnaruumi haavatavust vähendades. Kui riskiindeks kujundati normaliseeritud alamindikaatorite abil, on nüüd põhjust vaadelda uuesti alamindikaatorite väärtuste aluseks olevaid andmeid.

Näitepiirkonnana on antud töös analüüsitud riskianalüüsi käigus väljaselgitatud kõrge riskiga valgala (Laiäl tänaval Posti ja F.G. Adoffi tänava vaheline lõik) riskide hindamist (joonis 4.17). Antud tänavalõigul on valingvihmade tagajärjel varem üleujutusi esinenud (joonis 4.18). Hinnatavate valgala riskianalüüsi tulemuste andmed on toodud tabelis 4.2.

Joonis 4.17 R

Joonis 4.18 V

suund.





Tabel 4.2 Laia tänava üleujutusriskipiirkonna hindamistabel. Hinnanguskaala: A – aktsepteeritav ris; K – käideldav risk; J – jääkrisk

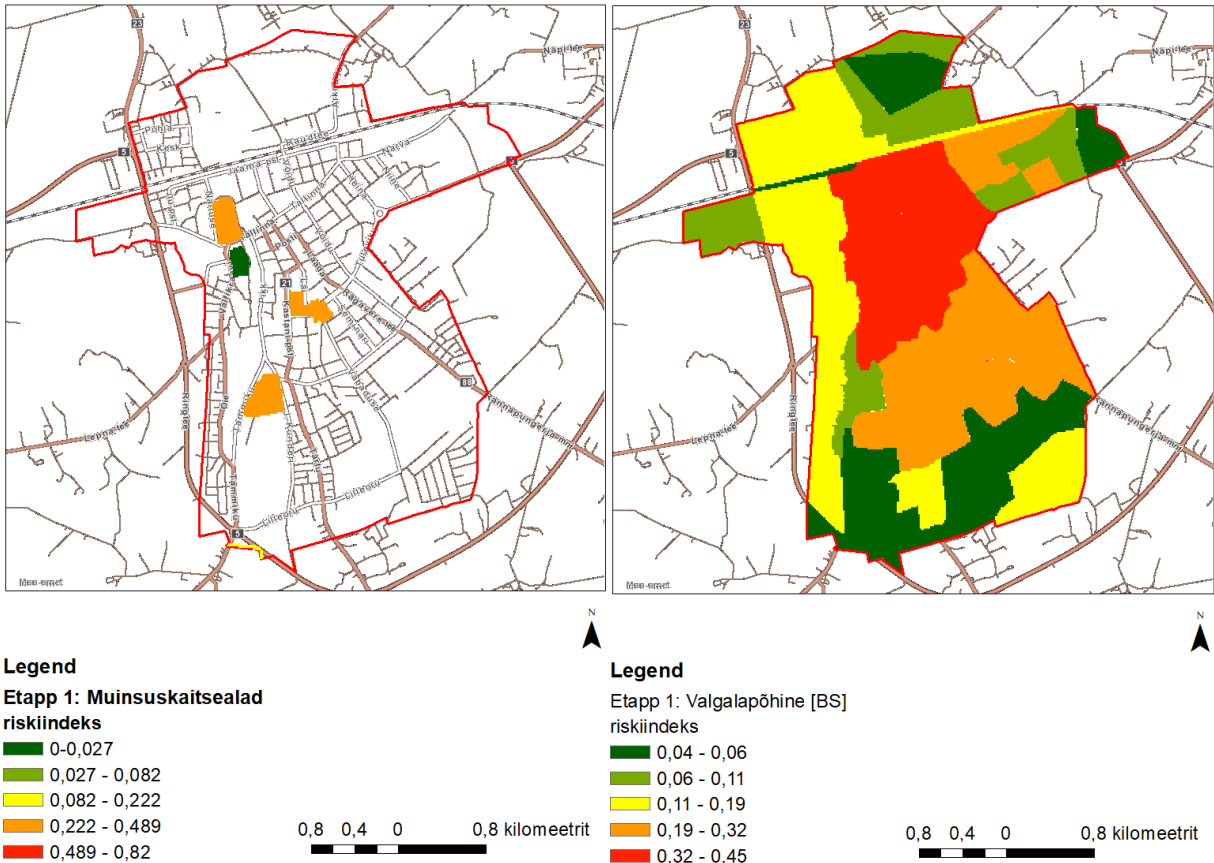
Valgala tunnus (NodeID)	9954		9955		9952		9950	
	Oluline	Kõrge	Madal	Kõrge	Oluline	Kõrge	Riskita	Keskmine
Riskitase								
Valgala keskmine riskiindeks	0,284	0,549	0,004	0,517	0,477	0,888	0,001	0,206
Stsenaariumi ID	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
Stsenaariumi avaldumise tõenäosus	42%	12%	42%	12%	42%	12%	42%	12%
Üleujutuse iseloom: keskmine üleujutuse kestvus valgaladel (min)	19,02	35,90	0	30,65	6,30	11,84	0	22,23
Üleujutuse iseloom: keskmine üleujutuse maht valgaladel (m <sup>3</sup> )	3,56	8,27	0	3,36	18,62	35,22	0	0,90
Valgalast mõjutatud hooned (EHR kood)	108008548 108008557 108008547		108008554 120577740		108008551		108011723 108008551	
Rahvaarv in/ha	min 50 in/ha		min 75 in/ha		min 100 in/ha		min 100 in/ha	
Keskkonna haavatavus	Lahkvoolne valgala		Lahkvoolne valgala		Lahkvoolne valgala		Lahkvoolne valgala	
Kultuuriline haavatavus	Miljööala		Miljööala		Miljööala		Miljööala	
Riski hinnang	K		K		K		A	

Riskihinnangu tulemusena asutakse otsima kohaspetsiifilisi käitlemislahendusi. Siin on hea potentsiaal kombineerida riskikaalutluse protseduuri erinevate sekkumislahenduste tuvastamise töövahenditega.

#### 4.1.5 Tulemuste visualiseerimine riski hindamise lihtsustamiseks

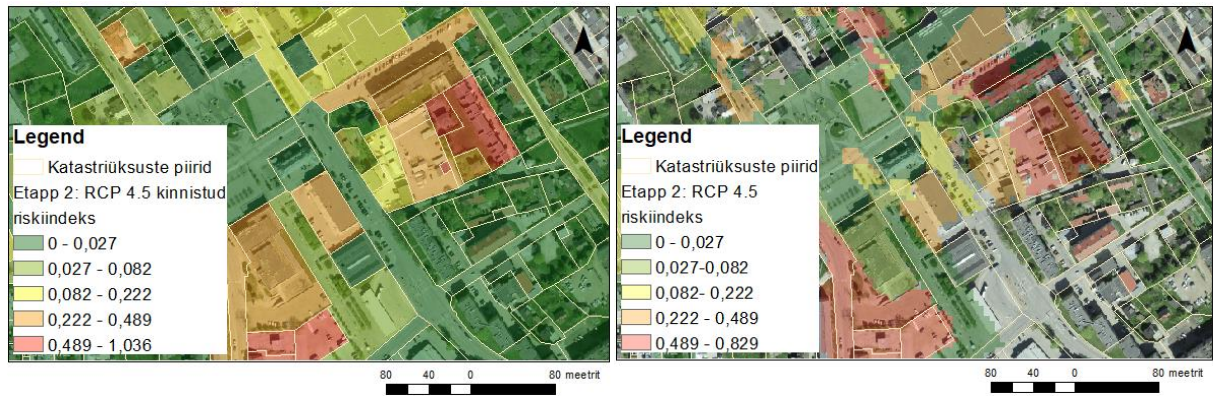
Eelnevalt on töös näidatud riskikaalutluse protsessi tulemusi eelkõige valgalale (etapp 1) või alamvalgalale (etapp 2) taandatuna. Integreerides ja institutsionaliseerides sademevee üleujutusriski erinevatesse linnavalitsemise protseduuridesse, saab kaalutusprotsessis saadud riskiindeksite põhjal hinnata erinevate tegevuste mõju. Seda saab lihtsustada tulemuste eesmärgipärane visualiseerimine. Näiteks on ülelinnaliselt

tuvastatud riskitaset taandada mitte ainult eelnevalt määratud süsteemiosadele, vaid ka näiteks linnaosadele või suvalistele huvi pakkuvatele piirkondadele (arenduslald, kaitsealad vms). Näitlikustamiseks on kuvatud muinsuskaitsealade riskitase (joonis 4.19, vasakul). Tuvastatud riskitase näitab, et mäe otsas asuv Rakvere linnus on riskita, kuid teistes muinsuskaitsealustes piirkondades (kultuurimälestistena käsitletavad Rakvere kalmistu, Rakvere juudi kalmistu, Torma kalmistu ja Rakvere mõisapark) on sademeveeülejutusrisk oluline. Kui võrrelda vaid süsteemiosade riski, võib kindlama piirkonna riskitase olla valgala keskmisest erinev (joonis 4.19, paremal).



Joonis 4.19 Rakvere linna kultuurimälestistena kaitstavate alade üleujutusrisk (vasakul) võrrelduna linna valgalade üleujutusriskiga (paremal)

Nagu öeldud, ei ole esmatasandi riskituvastus siiski piisavalt täpne väikeste alade riskianalüüsiks, nii et näiteks kinnistute riskitaset ei ole antud kaalutlustasemel otstarbekas eristada. Kinnistupõhiste riskide hindamiseks on otstarbekas kasutada etapis 2 saadud riskianalüüsi tulemusi. Siin on vaja lähtuda hajutatud riskiindeksi kaardist, mitte valgaladele taandatud riskiindeksist. Hajutatud riskiindeks tuleb keskmistada kinnistutele (joonis 4.20, vasakul), mis võimaldab eristada maaüksuseid, kus üleujutusriskimeetmete arvestamine on eriti oluline.

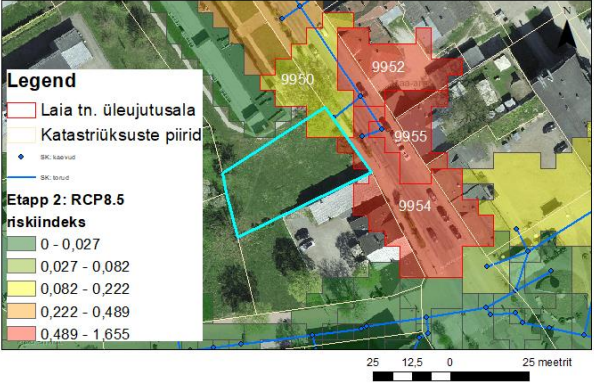

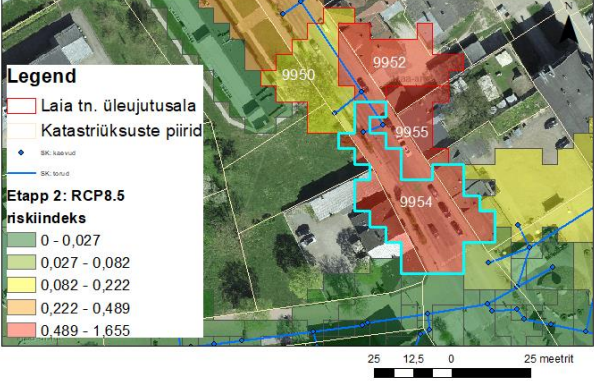


Joonis 4.20 Südalinna kinnistute keskmine riskitase (vasakul) võrrelduna sama piirkonna alamvalgalade keskmise riskitasemega.

Tulemuseks saadav riskikaart erineb mõnevõrra alamvalgalapõhisest riskitasemest (joonis 4.20, paremal), sest kinnistutel tekivad äravoolid ei ole sageli juhitud ära ühe alamvalgala kaudu. Kinnistupõhine riskitaseme visualiseerimine võimaldab eristada riskitaseme erinevusi näiteks tugeva kaldega valgala, kus ülesvoolu asuvad kinnistud on väiksema üleujutusriskiga kui allavoolu asuvad (kokkupuuteparametri alamindikaator K2 - TWI alusel) või alamvalgaladel asuvate sillutatud ja sillutamata piirkondade riski erinevust (kokkupuuteparametri alamindikaatori K1 – äravoolutegur alusel).

Riskihindamise käitlusotsus sõltub lisaks riskitasemest ka käitlusalternatiivide olemasolust. Riskikaalutluse tulemuste põhjal on ka neid lihtsam tuletada. Punktis 4.4 kirjeldatud piirkonnas on näiteks riskitaset, maaomandit ja linnaruumi iseärasust arvestades võimalik tuletada erinevaid käitluslahendusi (tabel 4.3). Iga valgala riski iseloomu arvestades (üleujutuse iseloom, haavatavad väärtused, kokkupuudet määravad näitajad) saab hinnata võimalike käitlusalternatiivide tulemuslikkust. Kuna aga käitlusalternatiivide üle otsustamine eeldab ka kulu-optimaalsuse hinnangut, on käesolev riskimetoodika lõplike valikute jaoks piiratud. Samuti on käitlusalternatiividele võimalik koostada võrdlevad kohanemistsenaariumid ja viia läbi uued analüüsi simulatsioonid. Käesoleva töö mahust jääb aga selle protsessi näitlikustamine välja.

Tabel 4.3 Riskitaset leevendavad sademevee käitluse lahendused hinnataval alal

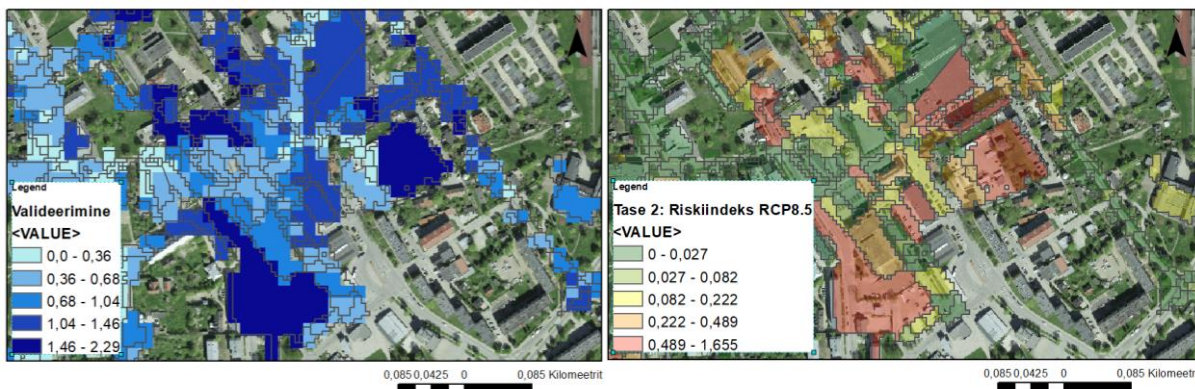
Nr	Lahendus	Joonis
1	<p>Väljaehitamata eramaa kinnistu (66301:001:0233) projekteerimistingimustega tuleb tagada, et kinnistu sademevee käitlemine tuleb lahendada 100% kinnistu põhiselt.</p>	
2	<p>Laia tänava teemaal laiendada olemasolevaid haljasribasid ning lahendada vertikaalplaneerimisega haljasribade kasutus viibekraavidena</p>	
3	<p>Alamvalgalalt 9954 sademevee ärajuhtimine hinnatava ala lõunaosas olevasse sademeveesüsteemi. Lõuna suunas lisatava eesvoolu stsenaariumil on vajalik hinnatava kasutatava torustiku läbilaskevõimet. Hetkel on antud piirkond riskita, kuid lisatav vee kogus võib riskitaset muuta.</p>	
4	<p>Nutikate viibesüsteemide projekteerimine (mahutite kaskaadi ja reaalajas juhitava kontrollsüsteemi rajamine)</p>	<p>Eeldab projekteerimist</p>



## 4.2 Sademeveeüleujutuste riskihindamise meetodika valideerimine ja piirangud

Väljapakutud meetodika eesmärk on lihtsustada sademeveest tingitud üleujutusrisiki juhtimisel andmepõhist otsustamist. Meetodika koosneb erinevatest riskikaalutluse etappidest, milles võetakse arvesse erineva detailsusega alusandmeid, mille tulemusena erineb ka kirjeldatud etappide tulemuste täpsus. Meetodi valideerimine toimus Rakvere linna näitel. Riskiparameetrite kirjeldamisega paralleelselt testiti Rakvere linna andmetel nende toimivust riskifunktsiooni kirjeldamisel, vajadusel arvutuspõhimõtteid korrigeerides.

Riskituvastamise etapi (1. etapp) tulemused valideeriti Rakvere äravoolusüsteemi mudelile tuginedes. 1. etapis läbiviidud riskituvastamise käigus kaardistatud riskipiirkonnad langesid üldistatuna kokku mudeli simulatsioonide tulemustega (joonis 4.21). Kokkulangevusel ei tohi vaadata riskiindeksi taset, vaid pigem riskipiirkondade paiknemist. Tuvastatavad erinevused on tingitud sellest, et esmatasandi riskituvastus ei võta arvesse äravoolusüsteemi toimivust, mida aga tihedalt asustatud linnapiirkondades tingimata tarvis teha on. Esmatasandi riskituvastus leiab üles suuremad üleujutusohuga valgalad, väiksemate puhul jääb kasutatav üldistus liiga suureks, et saadavad tulemused oleks kasutatavad. See on ka põhjus, miks tuvastamise etapi tulemusi tuleb esitada süsteemiosade kaupa, mitte hajutatud riskikaardina.



Joonis 4.21 Esmatasandi riskituvastuse käigus selgitatud linnaruumi üleujutusrisk on taandatud teises, analüüsi etapis vaadeldavatele valgaladele (vasakul). Tulemus on kõrvutatud teises riskikaalutluse etapis modelleerimise tulemustel põhineva riskikaardiga (paremal).

Riskianalüüsi etapis (2. etapp) määrab riski suure kaaluga üleujutusohu koondparameetri (valem 3.2) väärtuse mudeli kvaliteet. Mudeli kvaliteedi defineerib omakorda modelleerimisel kasutatud üldistus ning mudeli kalibreerimine tegelike mõõtmiste põhjal. Rakvere äravoolusüsteemi mudel on kalibreeritud normaaltingimustes, so. kuiva ilma vooluhulga mõõtmiste ning lokaalsete lühiajaliste

sademetete mõõtmiste ja vooluhulga mõõtmiste põhjal [96], kuid ei ole kalibreeritud ekstreemse intensiivsusega vihmasündmusega. Arvestades, et riskikaalutlust ei viida läbi projekteerimisülesandena, vaid laiapõhjalisemate otsuste tegemiseks, on kirjeldatud moel kalibreeritud mudel piisavalt täpne, et tulemusi saab pidada adekvaatseks. Riskikäitluse etapi (3. etapp) riskikäitlusvahemike määramist soovitab metoodika alustuseks teha ekspertotsusena. Sellealase kogemuse kasvades saab arendada edasi käitluslävendite määramist.

Antud töö raames ei toimunud riskifunktsiooniga leitud tulemuste valideerimist Rakvere linna spetsialistidega, mida on plaanis rakendada jätkutegevusena. See on eriti oluline riskiparameetreid kirjeldavate alamindikaatorite kaalumisel. Linnaülese üldistatud üleujutusriskiindeksi arvutamiseks ei pruugi sel moel kaalumine tähendust omada, kuid see on märkimisväärselt olulisem erinevate valdkondlike riskide analüüsiks ja hindamiseks. Rakvere linnaplaneerimise valdkonna spetsialistid on olnud kaasatud südalinna äravoolusüsteemi mudeli valgalade valideerimisse.

Arvestades Rakvere linna üleujutuse tekkemehhanismi, ei ole rakendunud kogu pakutud metoodika funktsionaalsus. Kuna Rakvere linna pinnaveekogud ei ole üleujutusohhtlikud, ei haaratud riskikaalutlusse ohtude koosmõju alamindikaatoreid. See vajab edasist analüüsi mõne teise linna näitel. Metoodika kasutatavust on osaliselt näitlikustatud peatükis 4, mille põhjal saab väita, et metoodika kohase riskikaalutluse tulemusi saab edukalt kasutada andmepõhise otsustamise alusena. Metoodika funktsionaalsuse terviklik valideerimine eeldab siiski ulatuslikumat riskikaalutluse läbiviimist kui magistritöö maht võimaldab, samuti on metoodika täisfunktsionaalsuse saavutamiseks oluline tulemused integreerida kohaliku omavalitsuse otsustusprotsessidesse.

# **5 SADEMEVEE ÜLEUJUTUSRISKI HINDAMISE METOODIKA KASUTAMINE JA EDASIARENDUSVÕIMALUSED**

Käesolevas töös tutvustatav sademeveeüleujutuste riskihindamise meetoodika on hästi kohaldatav Eesti linnaliste omavalitsuste üleujutusriskide kaalutlemiseks. Seejuures on avaandmetele tuginevat riskituvastamist (etapp 1) võimalik rakendada juba praegu. Seoses sellega, et Eesti käesoleva eelarveperioodi struktuurivahendite eelarves on kohalikele omavalitsustele suunatud märkimisväärsed ressursid sademevee üleujutuste probleemistiku lahendamiseks [97], võib otsustajatele sellisest riskituvastusest eelarvekasutuse suunamisel kasu olla. Riskituvastamise etapi tulemusi saavad linnad kasutada ka erinevate kohalike omavalitsuste strateegiliste dokumentide koostamisel.

Avaandmed, mida töös riskituvastamisel kasutatakse uuenevad erineva regulaarsusega. Maa-ameti poolt koordineeritavas Eesti geoportaalis [98] uuenevad katastriandmed kord ööpäevas, topograafia andmekogu kord nädalas, maapinnamudel uueneb iga nelja aasta tagant. Viimane on sademeveeüleujutuse riskiparameetrite tuletamiseks ka määrava tähtsusega. Seega, kuigi riskikaalutlust on võimalik pakutud meetoodika kohaselt korrata vabalt valitud hetkel, ei pruugi see anda uues korduses samade stsenaariumite kasutamisel märkimisväärselt erinevaid tulemusi anda. Sellest tulenevalt on otstarbekas riskikaalutluse korduste kavandamisel hinnata andmete uuendamise staatust. Üleujutustundlikes piirkondades on aga uusi võrdlevaid riskistsenaariumeid põhjust analüüsida (etapp 2) kasvõi kinnistupõhiste projekteerimistingimuste väljastamise vajadusest lähtudes. See eeldab aga äravoolusüsteemi mudeli olemasolu, mis on täna valdavale osale Eesti linnadest oluliseks barjääriks. Linnadel puuduvad täna ka adekvaatsed geoinfosüsteemid oma äravoolusüsteemide kohta, andmed paiknevad killustunult süsteemide teostusjoonistel või on koondatud üldistatud kujul ÜVKA lisades asuvates staatilistel kaartidel. Eesti Veeettevõtete Liidu (EVEL) eestvedamisel on tehtud märkimisväärsed pingutusi, et kõigis Eesti linnades ühisveevärgi ja kanalisatsiooni süsteemide GIS-andmebaase arendataks [99], kuid linnad pole kaugeltki oma andmebaase soovitud tasemele suutnud veel arendada. Siin on põhjust jällegi valdkonda lisaressurssi suunata, sest lisaks riskijuhtimise otsusteks vajalikele alusandmetele, on linnade vee- ja kanalisatsiooni GIS süsteemid vajalikud ka teisteks süsteemi haldamisega seondud andmepõhisteks otsusteks.

Ettevaatlik peab olema meetoodika osalisel rakendamisel. Kuigi etapp 1 tulemusel tuvastatud riskipiirkonnad annavad aimu, millised alad Eestis väärivad antud küsimuses

suuremat tähelepanu, ei saa selle etapi tulemustest teha põhjanevaid järeldusi üleujutuste tagajärgede kohta. Etapp 1 riskituvastus võib olla piisav riiklikul tasemel ja muudel suure üldistusega otsustustasanditel üleujutusohu kaalumiseks, kuid linnade investeringute kuluoptimaalsuse üle otsustamiseks või linnaarenguliste stsenaariumite analüüsiks, on üldistustase liiga suur.

Sõltuvalt sademeveeüleujutuste teema olulisusest ja linna üldisest GIS võimekusest, võib olla põhjust riskikaalutluse etappe linnapõhiselt automatiseerida. Antud metodikas kirjeldatud protseduur on selleks suure potentsiaaliga. Analüüsil kasutatavate alamindikaatorite rasterkihtide genereerimiseks saab ArcPy [100] skriptidena kirjeldada üksteisele järgnevad töökäskud, mis saavad lähteandmed automaatselt uuenevatest andmebaasidest (nt. Maa-Ameti põhikaart, DEM vms.). Selliselt on võimalik riskikaalutus teha ametnikele nupuvajutusega korratavaks.

Nagu töös varem ka rõhutatud, ei olnud antud töö fookuses haavatavuse parameetrite alamindikaatorite väljatöötamine, mistõttu sellele töös ka põhjalikult ei keskenduta. Töös pakutakse linnaruumi haavatavuse kirjeldamiseks Eestis vabalt kättesaadavatel andmetel põhinevaid indikaatoreid. Metodika aga ei välista, et haavatavuse näitajatena võetakse linna suutlikkusest lähtuvalt arvesse hoopis spetsiifilisemaid indikaatoreid. Eesti riikliku kliimakohanemise arengukava [77] uuendamise käigus on põhjust kaaluda üle-eestilise kliimamuutuste haavatavuse kaardistamise läbiviimist, koostades vastavad valdkondlikud kaardikihid erinevatele kliimarisikidele. Siin on potentsiaali linnaplaneerimise, keskkonnavaldkonna ja sotsiaalteadlaste koostöök. Samas protsessis võib olla põhjust riskituvastamise tasemel selgitada välja ka erinevate kliimamuutuste tagajärjel avalduvate ebasoodsate sündmuste ühis-riskid. Lisaks võib sarnast etapiviisilist riskikaalutlust olla relevantne rakendada ka näiteks erosoositundlike piirkondade riskikaalutluseks, kuumasaartega seonduvate riskide hindamiseks jms.

Töös on varem ka rõhutatud, et metodika riskiparameetrites kasutatavaid alamindikaatorid on üleujutuse tekkemehhanismide või tagajärgede osas tekkivate uute teadmiste põhjal võimalik asendada või täiendada. Seega on metodika avatud üleujutuste hüdrodünaamiliste näitajate ja hüdroloogilise iseloomu modelleerimise meetodite arendustele. Väga spetsiifiliste alamindikaatorite kasutamine vähendab linna riskitaseme võrreldavust teiste linnadega, kuid seda riskikaalutluse eesmärgis arvesse võttes, ei piira see piirkonnapõhise riskitaseme hindamist.

Antud magistritöö selgem edasiarenduse suund on hoonestatud keskkonna üleujutusriskide küsimus. LIFE IP BUILDEST projektis [101] on nähtud ette töötada välja üleujutuse riskimetoodika, mis keskendub hoonetega seonduva üleujutusrisiki



väljaselgitamisele ning selle käitlemisele. LIFE IP BUILDEST eesmärk on suurendada Eesti suutlikkust hoonete energiatõhusaks renoveerimisel. Hoonete üleujutusrisiki mõistmine ja vajalike üleujutusvastaste meetmete rakendamine tagab energiatõhususinvesteeringute jätkusuutlikkuse. Käesolevas töös väljapakutud meetodika võimaldab juba praegu analüüsida kinnistupõhist üleujutusrisiki, kuid on piiratud hoone haavatavuse eristamisel. Siin on märkimisväärne potentsiaal rakendada analüüsi Ehitisregistri andmestikku [102] ning tuletades haavatavuse parameetrite alamindikaatoritena välja hoonete geometriast, piirdetarinditest ja tehnosüsteemidest tulenevad mõõdikud. Antud projektis kasutatakse hoonestatud keskkonna sademevee üleujutuse riskimetoodika väljatöötamiseks Rakvere ja Võru linna äravoolusüsteemi andmeid.

# KOKKUVÕTE

Valingvihmana linnatänavatele sadanud vesi on järjest suurem probleem üha enamatele linnadele. Ühelt poolt on linnade jaoks tegemist kontrollimatu välismõjuga, sest ekstreemseid vihmahoogusid ja kliimamuutusi, mis nende sagenemisele kaasa aitavad, on ühe linna piires võimatu ohjata. Teisalt sõltuvad aga intensiivsete vihmade tagajärjed linnades just sellest, mismoodi linnad selle ohuga ümber käivad. Sademeveeüleujutustest tulenevat riski tuleb seetõttu võtta arvesse järjest rohkemates linnaruumi otsustes – nii strateegilistes kui ka operatiivsetes. Valingvihmadest tulenevate uputuste vältimiseks on vaja üleujutusriskiteadlikke valitsemisotsuseid nii üldplaneeringu tasemel maakasutust suunates kui ka ühisveevärgi ja kanalisatsiooni arengukavalisi eesmärke seades. Üleujutusrisiki tuleb arvestada ka igapäevastes otsustes.

Sademeveeüleujutuste kontekstis on riskikäsitlus alles arenemas. Üleujutusdirektiivi riskipiirkondade hindamise juhised võimaldavad äravoolusüsteemi häiringutest tulenevad riskid hindamata jätta. Ka puuduvad kohalikel omavalitsustel linnaülesel tasemel riskide hindamiseks enamasti piisavad alusandmed. Ja lõpuks on omajagu segadust sellega, mida tähendavad riskipiirkonnad – kas pelgalt kohti, kus vesi valingvihma ajal tänavale jääb, või seda, kus tekkiv liigvesi linna toimimist päriselt ohustab.

Käesolev töö pakub välja meetodika ja protseduuri, kuidas linnades sademevee üleujutusrisiki tuvastada, analüüsida ja hinnata. Meetodika väljatöötamisel on kasutatud ISO 31000:2018 Riskijuhtimisstandardi protseduuri ja põhimõtteid ning ÜRO Katastroofiohu Vähendamise ameti riskikontseptsiooni. Kombinatsioon neist kahest annab etapiviisilise riskikaalutluse protseduuri, kus erineval täpsusastmel rakendatakse erinevaid parameetreid riskifunktsiooniga leitava riskitaseme määramiseks. Töö eesmärgiks on pakkuda lahendus, mis aitab tuvastada kõrge üleujutusriskiga piirkonnad linnades, analüüsida riskialtites piirkondades täpsemalt üleujutusrisiki komponente ning teha hindamise käigus järeldused, kuidas risike käidelda.

Väljatöötatud meetodika tugineb maksimaalselt vabalt kättesaadavatele avaandmetele ja rakendab kõrge automatiseerimispotentsiaaliga töövõtteid. See on eriti oluline linnaülese üleujutusrisiki tuvastamise etapis. Valingvihmade üleujutusrisk on Eesti ja Põhja-Euroopa linnade jaoks universaalne probleem, kusjuures aga on linnade teadlikkus oma sademevee äravoolusüsteemist madal ning ressursid piiratud. Seetõttu on oluline leida kõige kriitilisemad kohad, kuhu suunata uuringute, modelleerimise ja

möödistuste ressursi. Eesti olude jaoks väljatöötatud metoodika kohaselt pakutakse riskituvastamise etapis riskifunktsiooni parameetriteks:

- Ohuindikaator: Standardkohase arvutusvihma intensiivsus lähtuvalt linnaruumi eripärast;
- Kokkupuute alamindikaator: Topograafiline niiskusindeks, mis arvestab reljeefist tulenevat kokkupuuteala tekkimise võimalikkust;
- Kokkupuute alamindikaator: Maakattest lähtuv standardkohane äravoolutegur;
- Haavatavuse indikaator: kombinatsioon majanduslikust, sotsiaalsest, kultuurilisest ja keskkonnakaitselisest alamindikaatorist.

Riskifunktsiooni abil leitakse riskiindeks ohu-, kokkupuute- ja haavatavuse indikaatorite normeeritud alamindikaatorite summade korrutustehte läbi ja riski hindamine toimub ainult erinevate valgalade või erinevate riskistsenaariumite võrdlemise teel. Töö pakub juhised baasstsenaariumi kirjeldamiseks ning ka stsenaariumite väljatöötamiseks, kuid möönab, et selles on palju linnaspetsiifilist. Metoodika võimaldab haarata alamindikaatoritena linnapõhiseid täiendavaid mõõdikuid, mille kaasamine ja vastavalt ka funktsioonis kasutamise jaoks kaalude andmine on ekspertülesanne riskihindamise läbiviijale. Ideena pakub metoodika välja ka linnaülese riskituvastamise etapis kohanemismeetmete arvesse võtmise. Linnaülese üleujutusrisiki tuvastamise etapis on võimalik suhteliselt suure usaldusväärsusega leida piirkonnad, mis on üleujutuste suhtes tundlikud, kuid riski identifitseerimise etapp ei anna hindajale aimu üleujutuse põhjuste-tagajärgede seostest. Sademevee üleujutuse tegelik tekkemehhanism võetakse arvesse riski analüüsi staadiumis.

Riski analüüsi staadiumi eesmärk ongi selgitada välja ohuolukorra tagajärjed, mille jaoks on vajalik üleujutusolukorra hüdrodünaamiliste näitajate modelleerimine. Töö annab lühiülevaate erinevatest modelleerimisvõtetest, millest sobiva valik sõltub süsteemi iseloomust. Antud töö esitab riskianalüüsiks äravoolusüsteemi mudeli põhiste meetodit, mis ei pruugi aga sobida näiteks äärelinnades, kus äravoolusüsteem puudub. Ka riskianalüüsi tasemel kasutatakse riskitaseme määramiseks varem kirjeldatud riskifunktsiooni, nüüd aga on ohuindikaatorina kasutusel kombineeritud parameeter, mis võtab lisaks kliimaandmetele arvesse ka analüüsitava alamvalgalade iseloomulikke näitajaid. Kombineeritud ohuparameeter saadakse modelleerimise teel, seejuures on mudeli erinevate sisendandmete põhjal simulatsioonikordusi läbi viies võimalik analüüsida erinevaid stsenaariumeid. Antud töö esitab Rakvere näitel erinevate kliimastsenaariumite avaldumisega kaasnevat üleujutusrisiki.

Riskianalüüsi tulemuste järelmittega tuleb pakutud metoodika kohaselt liikuda riskide hindamise etappi, ehk faasi, kus toimub riski käitlemisotsuste tegemine. Kui riski

tuvastamise ja analüüsisasemetel saadi normeeritud indikaatorite kaudu riskifunktsioonist tulemuseks võrreldavad piirkondlikud riskiindeksid, siis kolmandas etapis pöörduakse tagasi riski algparameetrite kaalumise juurde. Lihtsate geopäringutega saab kõrge riskiga alamvalgade kohta genereerida info, milline on üleujutuse iseloom (kestvus, maht) ning mis on üleujutusega kaasnevad tagajärjed – kui palju hooneid jääb üleujutusalasasse, kui suur on üleujutusest mõjutatud inimeste hulk, kas piirkonnas on kultuuri või miljööväärtuslikke objekte ja kas valgalasse jääb keskkonnaohtu tekitavaid nähtusi. Kõrvutades riskitaset ohuolukorra tunnusparameetrite ning haavatavuse näitajatega on võimalik teha järeldused, kas tekkiv risk on aktsepteeritav, vajab käitlemist või pole täna teadaolevate lahendustega leevendatav ning sellega tuleb jääkriskina lihtsalt arvestada.

Metoodikat näitlikustatakse töös Rakvere linna juhtumiuuringul. Rakvere näide tutvustab üheltpoolt metoodika funktsionaalsust, kuid valideerib ka selle kasutatavust. Töö järeldustes antakse lisaks valideerimise ülevaatele lugejale ka ideed, kuidas väljatöötatud metoodikat rakendada ja mis võiks olla selle edasiarendusvõimalused. Oluliste edasiarendussuundadena nähakse protsessi automatiseerimist, aga ka alamindikaatorite arendamist kaalutusprotsessi tulemuste täiustamiseks. Konkreetsemalt kirjeldab töö ka LIFE IP BUILDEST projektis planeeritud jätkutegevusi, mis asuvad lahendama antud metoodika raamistikus hoonestatud keskkonna sademeveeüleujutuse riski temaatikat.

Töös pakutav metodoloogiline raamistik kirjeldab sademevee üleujutusrisiki hindamise protseduurid, mis kergesti korratavatena aitavad linnadel saada aja- ja asjakohase sisendi üleujutusriskiga seonduvateks otsusteks.

## SUMMARY

To different extents, most urban areas in Europe are exposed to pluvial floods. The local communities, as well as city governments have to find measures either to cope with the consequences or to look for solutions to prevent the possible damage of the floods. Moreover, in most cases cities cannot be transformed to be flood resilient with single isolated interventions, but need an adaptive approach for flood-conscious governance and management. For this, cities require up-to-date information on the flood risk, to make data-based decisions on how to avoid disastrous events, plan for flood resilient high-quality living environment, and where relevant, design and implement transformative interventions.

The conventional definition of disaster risk combines the likelihood of potential hazard, exposure magnitude, and the level of vulnerability. However, when considering the multifaceted challenge of assessing the susceptibility and damage potential of urban pluvial flooding, this three-dimensional risk assessment methodology is not yet widely implemented. Additionally, a standardized risk management framework proposes an iterative risk assessment procedure, which could be well-suited for an adaptive governance approach. However, until now, the pluvial flood risk assessment has not been fitted to this framework.

The current thesis presents a tiered pluvial flood risk assessment methodology, which can be applied to any urban area. The proposed solution couples the disaster risk function with the standardized iterative risk assessment procedure. This allows cities in various entry-level preparedness to improve their understanding of the city-wide pluvial flood susceptibility and identify the flood-prone urban watersheds in which more specific risk analyses are required. And as those are identified carry out more precise analyses for determining both the consequences as well as probability of the pluvial flood disasters.

The pluvial flood risk is a universal problem for many towns and cities in Estonia and Northern Europe. While the risk is high and rising, the capacity of municipalities of municipalities in data-based decision making is still relatively low. Cities lack adequate data on the performance of the urban drainage systems, they lack adequate GIS systems and have limited resources for carrying out needed surveys for set the systems up for the whole territory. The proposed methodology exploits publicly available datasets and applies procedures with high automation potential Simple analysis that does not require thorough preliminary surveys or measurements helps cities to identify

the most flood prone districts within the municipality and thus direct the optimal use of the limited analysis resources.

The methodology developed mainly for Estonian towns and cities, defines the pluvial flood risk as a function combining hazard, exposure, vulnerability and coping capacity parameters. On the different tiers of risk assessment the level of detail for baseline data and complexity of the used methods varies. The risk identification can be carried out fully using a GIS software, the risk analysis level couples the GIS with a digital twin of an urban drainage system (UDS)). By integrating the pluvial flood risk assessment procedure in the city GIS the cities can automatically determine the potential hazard and coping capacity of exposed areas, and analyse the concurrent vulnerabilities.

Risk function which multiplies the sums of normalized sub-indicators for the parameters describing the hazard, exposure and vulnerability. In tier 1, the coping capacity can be considered as a separate parameter, which turns the described risk function into fraction by setting the sub-indicator into equation as denominators. The sub-indicators need to be normalized and generated for the whole territory of the analysed area. The assessment of the risks is carried out by comparing either different analysed watersheds or juxtaposing alternative scenarios. Risk levels need always to be classified based on the baseline scenario, otherwise the risk distribution is not comparable.

The thesis gives short overview about different modelling techniques, suitable for tier 2 risk analysis. The fitness of the suitable model depends on the character of the urban watershed analysed. The thesis also proposes a method for modelling the combined hazard parameter taking into account the different climate hazards and cityscape characteristics. The method is well suited to dense urban areas, with urban drainage systems. For peri-urban districts with no urban drainage systems, other surface flow modelling techniques should be applied.

In tier 3 the results of risk identification and analysis are applied to evaluate the risks. In this stage the risk management decisions are made. While in the tier 1 and tier 2 the risk assessment exploits various risk factors as normalized indicators, then here in the risk evaluation tier the resulting risk level is again deconstructed for understanding the probability and consequences. In high risk level watersheds it is necessary to evaluate, what is the potential damage to the homes and businesses, how many people are affected, what kind of environmental damage is possible and if the cultural heritage is at threat. Risk evaluator, either a municipality officer or external consultant has to then decide based on the expert knowledge, whether the risks are acceptable or need to be treated. Also, an option is that if city has done everything in its capacity to mitigate the risk, but the risk still remains higher than acceptable, the risk is considered residual.

The proposed methodology and procedure have been applied in the Rakvere case study area, using data available from public registries and the local municipal datasets. The risk assessment procedure carried out in Rakvere firstly demonstrates the functionality of the tiered risk assessment methodology, but also validates its fitness for purpose. Conclusions of the thesis gives ideas for further exploitation of the methodology and discusses the fields in which the current solution could be upgraded. One of the most specific follow-ups for the current thesis is the development of a Plot-based pluvial flood risk assessment methodology for Estonian building stock, which is foreseen in an ongoing LIFE IP BUILDEST project.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] IPCC, Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022, [Online] [https://report.ipcc.ch/ar6wg2/pdf/IPCC\\_AR6\\_WGII\\_FinalDraft\\_FullReport.pdf](https://report.ipcc.ch/ar6wg2/pdf/IPCC_AR6_WGII_FinalDraft_FullReport.pdf), viimati külastatud 12.04.2022.
- [2] EEA, Urban adaptation in Europe: how cities and towns respond to climate change, European Environment Agency, 2020, [Online] <https://www.eea.europa.eu/publications/urban-adaptation-in-europe>, viimati külastatud 09.04.2021.
- [3] Kreienkamp, "Scientific-report-Western-Europe-floods-2021-attribution.pdf", 2022, [Online]. <https://www.worldweatherattribution.org/wp-content/uploads/Scientific-report-Western-Europe-floods-2021-attribution.pdf>, viimati külastatud 01.05.2022.
- [4] L. Cea, P. Costabile, "Flood Risk in Urban Areas: Modelling, Management and Adaptation to Climate Change. A Review," *Hydrology*, vol. 9, no. 3, 2022, doi: 10.3390/hydrology9030050.
- [5] UNDRR, "GAR2022: Our World at Risk." <https://www.undrr.org/gar2022-our-world-risk>, viimati külastatud 28.04.2022.
- [6] EVS-ISO 31000:2018, Riski juhtimine, [Online] <https://www.evs.ee/et/evs-iso-31000-2018>, viimati külastatud 01.05.2022.
- [7] B. R. Rosenzweig, L. McPhillips, H. Chang, C. Cheng, C. Welty, M. Matsler, D. Iwaniec, C. Davidson, Pluvial flood risk and opportunities for resilience, *WIREs Water* - Wiley Online Library, vol. 5, no. 6, <https://doi.org/10.1002/wat2.1302>.
- [8] COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS Forging a climate-resilient Europe - the new EU Strategy on Adaptation to Climate Change. 2021.[Online] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2021:82:FIN>, viimati külastatud 01.05.2022.
- [9] Current practice in flood risk management in the European Union - Publications Office of the EU.[Online] <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/21d8c5c2-2199-11ec-bd8e-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-232431484>, viimati külastatud 01.05.2022.
- [10] UNDRR, Understanding Risk, [Online] <https://www.undrr.org/building-risk-knowledge/understanding-risk>, viimati külastatud 01.05.2022.
- [11] BSR NOAH | Protecting the Baltic Sea, [Online] <https://sub.samk.fi/projects/noah/>, viimati külastatud 03.05.2022.
- [12] M. Truu, I. Annus, J. Roosimägi, N. Kändler, A. Vassiljev, K. Kaur, Integrated Decision Support System for Pluvial Flood-Resilient Spatial Planning in Urban Areas, *Water*, vol. 13, no. 23, 2021, doi: 10.3390/w13233340.
- [13] Y. Imamura, Development of a Method for Assessing Country-Based Flood Risk at the Global Scale, *Int. J. Disaster Risk Sci.*, vol. 13, no. 1, pp. 87–99, 2022, doi: 10.1007/s13753-021-00388-w.
- [14] Scopus - Document search, [Online] <https://www.scopus.com/search/form.uri?display=basic&zone=header&origin=#basic>, viimati külastatud 01.03.2022.
- [15] G. La Loggia, V. Puleo, G. Freni, Floodability: A New Paradigm for Designing Urban Drainage and Achieving Sustainable Urban Growth, *Water Resources*



Management, Vol. 34, p. 3411–3424, 2020, <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02620-6>.

[16] F. J. Othmer, D. Becker, L. M. Schulte, S. Greiving, A Methodological Approach to Municipal Pluvial Flood Risk Assessment Based on a Small City Case Study, *Sustainability*, vol. 12, no. 24, 2020, doi: 10.3390/su122410487.

[17] S. Szewrański, J. Chruściński, J. Kazak, M. Świąder, K. Tokarczyk-Dorociak, R. Żmuda, "Pluvial Flood Risk Assessment Tool (PFRA) for Rainwater Management and Adaptation to Climate Change in Newly Urbanised Areas," *Water*, vol. 10, no. 4, 2018, doi: 10.3390/w10040386.

[18] A. Sperotto, S. Torresan, V. Gallina, E. Coppola, A. Critto, and A. Marcomini, A multi-disciplinary approach to evaluate pluvial floods risk under changing climate: The case study of the municipality of Venice (Italy), *Sci. Total Environ.*, vol. 562, pp. 1031–1043, 2016, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.03.150.

[19] C. Di Salvo, F. Pennica, G. Ciotoli, and G. P. Cavinato, A GIS-based procedure for preliminary mapping of pluvial flood risk at metropolitan scale, *Environ. Model. Softw.*, vol. 107, pp. 64–84, 2018, doi: 10.1016/j.envsoft.2018.05.020.

[20] IPCC, AR5 Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability — IPCC. [Online] <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>, viimati külastatud 01.04.2022.

[21] G. Cremen, C. Galasso, J. McCloskey, Modelling and quantifying tomorrow's risks from natural hazards, *Sci. Total Environ.*, vol. 817, p. 152552, 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152552.

[22] V. Norén, B. Hedelin, L. Nyberg, and K. Bishop, Flood risk assessment – Practices in flood prone Swedish municipalities, *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, vol. 18, pp. 206–217, 2016, doi: 10.1016/j.ijdrr.2016.07.003.

[23] Member States' examples of Flood Hazard and Flood Risk Maps, 2014. [Online]. [https://ec.europa.eu/environment/water/flood\\_risk/pdf/MS%20examples.pdf](https://ec.europa.eu/environment/water/flood_risk/pdf/MS%20examples.pdf), viimati külastatud 20.04.2022.

[24] EVS 848:2021, Väliskanaliseerimise nõuanded, [Online] <https://www.evs.ee/et/evs-848-2013>, viimati külastatud 10.05.2022.

[25] D. Jato-Espino, N. Sillanpää, S. M. Charlesworth, J. Rodriguez-Hernandez, A simulation-optimization methodology to model urban catchments under non-stationary extreme rainfall events, *Environ. Model. Softw.*, vol. 122, p. 103960, 2019, doi: 10.1016/j.envsoft.2017.05.008.

[26] Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks, [Online]. <http://data.europa.eu/eli/dir/2007/60/oj/eng>, viimati külastatud 01.04.2022;

[27] T.M. Õispuu, Kuumalained Eestis aastail 1951-2018, Eesti Geograafia Seltsi aastaraamat, aprill 2019, [Online] <https://dea.digar.ee/cgi-bin/dea?a=d&d=JVestgeograafiaselts201904.2.13&e=-----et-25--1--txt-txIN%7ctxTI%7ctxAU%7ctxTA----->, viimati külastatud 20.03.2022.

[28] S. J. Brown, Future changes in heatwave severity, duration and frequency due to climate change for the most populous cities, *Weather Clim. Extrem.*, vol. 30, p. 100278, 2020, doi: 10.1016/j.wace.2020.100278.

[29] Joint Research Centre, Urban water atlas for Europe. LU: Publications Office of the European Union, 2017. [Online]. <https://data.europa.eu/doi/10.2788/114518>, viimati külastatud 10.05.2022.

[30] H. de Moel, J. van Alphen, and J. C. J. H. Aerts, Flood maps in Europe &ndash; methods, availability and use, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 9, no. 2, pp. 289–301, 2009, doi: 10.5194/nhess-9-289-2009.

- [31] G. Guo, L. Liu, Y. Li, J. Gao, S. Lin, S. Wu, A Vulnerability Curve Method to Assess Risks of Climate-Related Hazards at County Level, *Atmosphere*, vol. 12, no. 8, Art. no. 8, 2021, doi: 10.3390/atmos12081022.
- [32] F. I. Khan, P. R. Amyotte, Md. T. Amin, Chapter One - Advanced methods of risk assessment and management: An overview, in *Methods in Chemical Process Safety*, vol. 4, 2020, doi: 10.1016/bs.mcps.2020.03.002.
- [33] U. C. Nkwunonwo, M. Whitworth, B. Baily, A review of the current status of flood modelling for urban flood risk management in the developing countries, *Sci. Afr.*, vol. 7, p. e00269, 2020, doi: 10.1016/j.sciaf.2020.e00269.
- [34] D. T. Bulti, B. G. Abebe, "A review of flood modeling methods for urban pluvial flood application, *Model. Earth Syst. Environ.*, vol. 6, no. 3, pp. 1293–1302, 2020, doi: 10.1007/s40808-020-00803-z.
- [35] H. Brirhet, L. Benaabidate, "Comparison Of Two Hydrological Models (Lumped And Distributed) Over A Pilot Area Of The Issen Watershed In The Souss Basin, Morocco," *Eur. Sci. J. ESJ*, vol. 12, no. 18, 2016, doi: 10.19044/esj.2016.v12n18p347.
- [36] R. Barati, S. Rahimi, G. H. Akbari, Analysis of dynamic wave model for flood routing in natural rivers, *Water Sci. Eng.*, vol. 5, no. 3, pp. 243–258, 2012, doi: 10.3882/j.issn.1674-2370.2012.03.001.
- [37] E. Tate, M. A. Rahman, C. T. Emrich, C.C. Sampson, Flood exposure and social vulnerability in the United States, *Natural Hazards*, vol.106, p. 435–457, 2021, Accessed: May 01, 2022. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-020-04470-2>
- [38] P. B. R. Alves, S. Djordjević, a A. A. Javadi, "An integrated socio-environmental framework for mapping hazard-specific vulnerability and exposure in urban areas," *Urban Water J.*, vol. 18, no. 7, pp. 530–543, Aug. 2021, doi: 10.1080/1573062X.2021.1913505.
- [39] J. Chen, W. Chen, and G. Huang, "Assessing urban pluvial flood resilience based on a novel grid-based quantification method that considers human risk perceptions," *J. Hydrol.*, vol. 601, p. 126601, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126601.
- [40] S. L. Cutter, B. J. Boruff, and W. L. Shirley, "Social Vulnerability to Environmental Hazards," *Soc. Sci. Q.*, vol. 84, no. 2, pp. 242–261, 2003. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04470-2>.
- [41] Social Vulnerability Index (SoVI) | Adaptation Clearinghouse. [Online] <https://www.adaptationclearinghouse.org/resources/social-vulnerability-index-sovi.html>, viimati külastatud 03.05.2022.
- [42] Protecting Building Utilities From Flood Damage. [Online] [https://www.fema.gov/pdf/fima/pbuffd\\_complete\\_book.pdf](https://www.fema.gov/pdf/fima/pbuffd_complete_book.pdf), viimati külastatud 20.05.2022.
- [43] Flood Resistance of the Building Envelope, Engineering For Change. [Online] <https://www.engineeringforchange.org/solutions/product/flood-resistance-building-envelope/>, viimati külastatud 20.05.2022.
- [44] Hawkesbury-Nepean Floodplain Management Steering Committee, New South Wales, and Department of Natural Resources, Reducing vulnerability of buildings to flood damage: guidance on building in flood prone areas. 2006. [Online] [https://www.ses.nsw.gov.au/media/2247/building\\_guidelines.pdf](https://www.ses.nsw.gov.au/media/2247/building_guidelines.pdf), viimati külastatud 20.05.2022.
- [45] J. Kind, W. J. W. Botzen, J. C. J. H. Aerts, Social vulnerability in cost-benefit analysis for flood risk management, *Environ. Dev. Econ.*, vol. 25, no. 2, pp. 115–134, 2020, doi: 10.1017/S1355770X19000275.

- [46] RT I, 22.02.2019, 1, Veeseadus, [Online] <https://www.riigiteataja.ee/akt/122022019001>, kehtiv 22.05.2022.
- [47] Üleujutused | Keskkonnaministeerium. [Online] <https://envir.ee/keskkonnakasutus/vesi/uleujutused>, viimati külastatud 20.04.2022.
- [48] Maa-ameti üleujutuste kaardirakendus. [Online] <https://xgis.maaamet.ee/xgis2/page/app/yua>, viimati külastatud 20.04.2022.
- [49] T. Kooskora, M. Viirma, P. Tamm, H. Kalberg, Kombineeritud sademevee strateegia. [Online]. [https://www.etag.ee/wp-content/uploads/2019/02/Sademevesi\\_L%C3%B5pparuann\\_KEM.pdf](https://www.etag.ee/wp-content/uploads/2019/02/Sademevesi_L%C3%B5pparuann_KEM.pdf), viimati külastatud 20.04.2022.
- [50] Tartu linna üldplaneering. [Online] [https://gis.tartulv.ee/yldplaneering2040/loodus/?page=page\\_27](https://gis.tartulv.ee/yldplaneering2040/loodus/?page=page_27), viimati külastatud 28.04.2022.
- [51] Üldplaneering - Kohtla-Järve Linnavalitsus. [Online] <https://www.kohtla-jarve.ee/uldplaneering>, viimati külastatud 07.05.2022.
- [52] Tallinna sademevee strateegia aastani 2030, [Online] <https://www.riigiteataja.ee/akt/409032013041>, viimati külastatud 07.05.2022.
- [53] "Pärnu sademevee strateegia." [https://parnu.ee/failid/arengukavad/sademevee\\_strateegia\\_2026.pdf](https://parnu.ee/failid/arengukavad/sademevee_strateegia_2026.pdf) (accessed May 07, 2022).
- [54] "TARTU LINNA ÜHISVEEVÄRGI JA -KANALISATSIOONI ARENDAMISE KAVA AASTATEKS 2022-2040." Tartu Linnavalitsus, 2021. [Online]. Available: [https://tartu.ee/sites/default/files/uploads/Uudised/Tartu%20linna%20%C3%9CVKA%202022-2040\\_seletuskiri\\_0.pdf](https://tartu.ee/sites/default/files/uploads/Uudised/Tartu%20linna%20%C3%9CVKA%202022-2040_seletuskiri_0.pdf)
- [55] "Rakvere ÜVKA eelnõu." [https://rakvere.ee/documents/821815/2896951/Rakvere+linna+%C3%9CVKA\\_2022-2035.pdf/49da6508-c959-4fba-81db-3e2837580c2c](https://rakvere.ee/documents/821815/2896951/Rakvere+linna+%C3%9CVKA_2022-2035.pdf/49da6508-c959-4fba-81db-3e2837580c2c) (accessed May 03, 2022).
- [56] "Narva üvka." <http://web.narva.ee/files/11723.pdf> (accessed May 07, 2022).
- [57] "RV0282U: RAHVASTIK SOO, VANUSERÜHMA JA 2017. AASTA HALDUSREFORMI JÄRGSE ELUKOHA JÄRGI, 1. JAANUAR," PX-Web. [https://andmed.stat.ee:443/pxweb/et/stat/stat\\_\\_rahvastik\\_\\_rahvastikunaitajad-ja-koosseis\\_\\_rahvaarv-ja-rahvastiku-koosseis/RV0282U.px/](https://andmed.stat.ee:443/pxweb/et/stat/stat__rahvastik__rahvastikunaitajad-ja-koosseis__rahvaarv-ja-rahvastiku-koosseis/RV0282U.px/) (accessed Apr. 28, 2022).
- [58] "Tallinna üldplaneeringu kehtestamine-Riigi Teataja." <https://www.riigiteataja.ee/akt/412092013004> (accessed May 07, 2022).
- [59] "Tallinna ühisveevärgi ja -kanalisatsiooni arendamise kava 2010-2021-Riigi Teataja." <https://www.riigiteataja.ee/akt/421052013035> (accessed May 07, 2022).
- [60] "Tartu kliimakava." <https://tartu.ee/sites/default/files/uploads/Linnavarad/SECAP/Tartukliimakava2030.pdf> (accessed May 03, 2022).
- [61] "Narva LV Arhitektuuri- ja Linnaplaneerimise Amet." <http://www.narvaplan.ee/?menu=2&page=2> (accessed May 07, 2022).
- [62] "Pärnu Linnavalitsus." <https://edok.parnu.ee/public/index.aspx?itm=944525&o=924&u=-1&o2=-1&hdr=hp&tbs=all> (accessed May 07, 2022).
- [63] "Pärnu linna ühisveevärgi ja -kanalisatsiooni arendamise kava aastateks 2022-2036-Riigi Teataja." <https://www.riigiteataja.ee/akt/429122021004> (accessed May 07, 2022).

- [64] "Kohtla-Järve linna ühisveevärgi ja -kanalisatsiooni arendamise kava aastateks 2015-2026 kinnitamine–Riigi Teataja." <https://www.riigiteataja.ee/akt/405122014027> (accessed May 07, 2022).
- [65] "Põhilahendus - Viljandi linnavalitsus." <http://www.viljandi.ee/pohilahendus> (accessed May 07, 2022).
- [66] "Viljandi linna ühisveevärgi ja -kanalisatsiooni arendamise kava aastateks 2020-2031–Riigi Teataja." <https://www.riigiteataja.ee/akt/405062020022> (accessed May 07, 2022).
- [67] "Üldplaneering (kehtiv) - Maardu Linnavalitsus." <https://maardu.ee/uldplaneering> (accessed May 07, 2022).
- [68] "Maardu linna ühisveevärgi ja -kanalisatsiooni arendamise kava aastateks 2020-2033 kinnitamine–Riigi Teataja." <https://www.riigiteataja.ee/akt/427112020035> (accessed May 07, 2022).
- [69] "w3.rakvere.ee - /yldplaneering/." <http://w3.rakvere.ee/yldplaneering/> (accessed May 03, 2022).
- [70] "Rakvere ÜVKA." [https://www.riigiteataja.ee/akt/4081/1201/8026/RakvereLVK\\_m32\\_lisa.pdf](https://www.riigiteataja.ee/akt/4081/1201/8026/RakvereLVK_m32_lisa.pdf) (accessed May 03, 2022).
- [71] "ETIS - Protecting the Baltic Sea from Untreated Waste Water Spillages. Handbook of the NOAH Concept." <https://www.etis.ee/Portal/Publications/Display/8cad5a37-f8dd-4d30-b2cc-f8aaaf34e3f1> (accessed Apr. 12, 2022).
- [72] RT I, 22.06.2017, 15, Hädaolukorra riski hindamise nõuded ja riskianalüüsi koostamise kord. [Online] [https://www.riigiteataja.ee/akt/122062017015?dbNotReadOnly=true&RIIGITEATAJA\\_ADDRESS=https%3A%2F%2Fwww.riigiteataja.ee&RIIGITEATAJA\\_ADDRESS\\_HALDUS=https%3A%2F%2Fwww.riigiteataja.ee](https://www.riigiteataja.ee/akt/122062017015?dbNotReadOnly=true&RIIGITEATAJA_ADDRESS=https%3A%2F%2Fwww.riigiteataja.ee&RIIGITEATAJA_ADDRESS_HALDUS=https%3A%2F%2Fwww.riigiteataja.ee) (Kehtetu al. 30.06.2021).
- [73] FAQ: What is the Jenks optimization method?, [Online] <https://support.esri.com/en/technical-article/000006743>, viimati külastatud 20.05.2022.
- [74] Geospatial Analysis 6th Edition, 2021 update, de Smith, Goodchild, Longley and Colleagues. [Online] <https://www.spatialanalysisonline.com/HTML/index.html> viimati külastatud 20.05.2022.
- [75] Data classification methods—ArcGIS Pro | Documentation. [Online] <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.8/help/mapping/layer-properties/data-classification-methods.htm>, viimati külastatud 20.05.2022.
- [76] Kohalike omavalitsuste ametnike ja töötajate kompetentside kaardistamine ja koolitusvajaduse hindamise analüüsi läbiviimine, [Online] <https://www.fin.ee/media/2781/download>, viimati külastatud 15.05.2022.
- [77] Keskkonnaministeerium, Kliimamuutustega kohanemise arengukava.[Online] <https://envir.ee/kliimamuutustega-kohanemise-arengukava>, viimati külastatud 01.05.2022.
- [78] 2NDNATURE, Guidance for Creating Catchment Boundaries and Attributes, 2NDNATURE 2020., Final v5.1, 2020. Accessed: [Online] [https://www.2ndnaturewater.com/documents/MS4\\_Mapping\\_Guidance.pdf](https://www.2ndnaturewater.com/documents/MS4_Mapping_Guidance.pdf), viimati külastatud 04.05.2022.
- [79] PADEP-GIS, Sewershed Delineation, 2016. [Online] <https://www.chesco.org/DocumentCenter/View/35884/PADEP-GIS-Sewershed-Delineation2016?bidId=>, Viimati külastatud 07.05.2022.

- [80] C. Kelleher, L. McPhillips, Exploring the application of topographic indices in urban areas as indicators of pluvial flooding locations, *Hydrol. Process.*, vol. 34, no. 3, pp. 780–794, 2020, doi: 10.1002/hyp.13628.
- [81] P. Mattivi, F. Franci, A. Lambertini, G. Bitelli, TWI computation: a comparison of different open source GISs, *Open Geospatial Data Softw. Stand.*, vol. 4, no. 1, p. 6, 2019, doi: 10.1186/s40965-019-0066-y.
- [82] Maa-amet, Laadi kõrgusandmed alla. [Online] [https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Korgusandmed/index.php?lang\\_id=1&page\\_id=614](https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Korgusandmed/index.php?lang_id=1&page_id=614), viimati külastatud 06.05.2022.
- [83] Maa-amet, Eesti põhikaart 1:10 000.[Online] [https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Topokaardid-ja-aluskaardid/index.php?lang\\_id=1&page\\_id=30](https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Topokaardid-ja-aluskaardid/index.php?lang_id=1&page_id=30), viimati külastatud 06.05.2022.
- [84] Maa-amet, Kitsenduste andmete allalaadimine. [Online] [https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Kitsenduste-andmed/index.php?lang\\_id=1&page\\_id=624](https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Kitsenduste-andmed/index.php?lang_id=1&page_id=624), viimati külastatud 05.05.2022.
- [85] I. Annus, M. Truu, N. Kändler, H. Rissanen, V. Vorne, S. Waara, K. Ramm, R. Ulanczyk, K. Kolecka, G. Dakša, Handbook of the NOAH Concept. [Online] <https://www.etis.ee/Portal/Publications/Display/8cad5a37-f8dd-4d30-b2cc-f8aaaf34e3f1>, viimati külastatud 16.05.2022.
- [86] US EPA, Storm Water Management Model (SWMM), 2014. <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm> viimati külastatud 12.05.2022..
- [87] L. Warsta, T. J. Niemi, M. Taka, G. Krebs, K. Hahti, H. Koivusalo, T. Kokkonen, Development and application of an automated subcatchment generator for SWMM using open data, *Urban Water J.*, vol. 14, no. 9, pp. 954–963, 2017, doi: 10.1080/1573062X.2017.1325496.
- [88] Keskkonnaministeerium, Veemajanduskavad, [Online] <https://envir.ee/keskkonnakasutus/vesi/veemajanduskavad>, viimati külastatud 05.05.2022.
- [89] Statistika juhtimislauad. [Online] <https://juhtimislauad.stat.ee/et/piirkondlik-statistika-3/tallinn-17/graaфик-57>, viimati külastatud 05.05.2022.
- [90] Rakvere linna arengukava, [Online] [https://www.riigiteataja.ee/aktiis/4091/0202/0002/Rakvere\\_linna\\_arengukava\\_2020-2030.pdf](https://www.riigiteataja.ee/aktiis/4091/0202/0002/Rakvere_linna_arengukava_2020-2030.pdf), viimati külastatud 05.05.2022.
- [91] Basin (Spatial Analyst)—ArcMap | Documentation. [Online] <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/basin.htm>, viimati külastatud 05.05.2022.
- [92] TWI.[Online] <https://www.isws.illinois.edu/pubdoc/CR/ISWSCR2017-02.pdf>, viimati külastatud 18.04.2022.
- [93] Raster Calculator (Spatial Analyst)—ArcMap | Documentation. [Online] <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/raster-calculator.htm>, viimati külastatud 18.04.2022.
- [94] S. Juhola, Planning for a green city: The Green Factor tool, *Urban For. Urban Green.*, vol. 34, pp. 254–258, 2018, doi: 10.1016/j.ufug.2018.07.019.
- [95] VIDEO: vihmavaling muutis Rakveres Laia tänava järveks - 112 - Virumaa Teataja. [Online] <https://virumaateataja.postimees.ee/2801812/video-vihmavaling-muutis-rakveres-laia-tanava-jarveks>, viimati külastatud 05.05.2022.

[96] N. Kändler, I. Annus, A. Vassiljev, Controlling peak runoff from plots by coupling street storage with distributed real time control, *Urban Water J.*, vol. 19, no. 1, pp. 97–108, 2022, doi: 10.1080/1573062X.2021.1958235.

[97] Riigi Tugiteenuste Keskus, 2021-2027 planeerimine, [Online] <https://www.rtk.ee/toetusfondid-ja-programmid/euroopa-liidu-valisvahendid/2021-2027-planeerimine>, viimati külastatud 21.05.2022.

[98] Maa-amet, Geoportaal | [Online] <https://geoportaal.maaamet.ee/est/>, viimati külastatud 15.05.2022.

[99] A. Kärk, K. Saul, EVEL Geoinfosüsteemi (GIS) andmemudeli loomine, Eesti Vee-ettevõtete Liit, [Online] [https://evel.ee/wp-content/uploads/2018/10/Andmemudeli\\_seletuskiri\\_25052018.pdf](https://evel.ee/wp-content/uploads/2018/10/Andmemudeli_seletuskiri_25052018.pdf), viimati külastatud 09.05.2022.

[100] P. McKinney, ArcPy. 2022. [Online]. <https://github.com/pmacMaps/ArcPy>, viimati külastatud 04.05.2022.

[101] BuildEST | Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium. [Online] <https://www.mkm.ee/ehitus-ja-elamumajandus/elamud-ja-hooned/buildest>, viimati külastatud 08.05.2022.

[102] Ehisregister. [Online] <https://livekluster.ehr.ee/ui/ehr/v1>, viimati külastatud 03.05.2022.