



**TURUN
YLIOPISTO**

Matemaattis-luonnontieteellinen
tiedekunta

Globaalin etelän kaupunkijokien hydromorfologia

Tapaustutkimus Dar es Salaamin Msimbazi-joen vaikutuksesta sen tulvatasangolla
sijaitseviin slummeihin

Linda Sainio

Maantiede
LuK-tutkielma
Laajuus: 6 op

17.6.2024

Turku

Turun yliopiston laatu järjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu
Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Pääaine: Maantiede

Tekijä: Linda Sainio

Otsikko: Globaalin etelän kaupunkijokien hydromorfologia - Tapaustutkimus Dar es Salaamin Msimbazi-joen vaikutuksesta sen tulvatasangolla sijaitseviin slummeihin

Ohjaajat: Lauri Hooli ja Elina Kasvi

Sivumäärä: 39 sivua

Päivämäärä: 17.6.2024

Globaalissa etelässä jokien tulvat ja muutokset aiheuttavat vuosittain valtavia inhimillisiä ja taloudellisia vahinkoja niiden rannoille rakennetuilla asuinalueilla. Väestönkasvu ja ilmastonmuutos lisäävät jokien aiheuttamia katastrofeja. Kaupunkien läpi virtaavat joet kärsivät kovasta ympäristöllisestä paineesta ja kaupungistuminen aiheuttaa muutoksia jokien luonnollisessa toiminnassa. Nämä muutokset voivat voimistaa hydromorfologisia ilmiöitä, kuten tulvia ja törmän eroosiota. Nämä ilmiöt aiheuttavat ongelmia joen varrella asuville ihmisille, jos riskeihin ei varauduta.

Tässä tutkimuksessa tutkitaan Dar es Salaamin Msimbazi-jokea, joka on esimerkki globaalissa etelässä sijaitsevasta valuma-alueesta, johon ihmistoiminta on vaikuttanut voimakkaasti. Yhä useammin tulviva joki uhkaa sen rannoilla ja tulvatasangolla sijaitsevia slummeja. Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, mitkä alueet Msimbazi-joen varrella ovat tulvaherkkiä ja mitä muutoksia joen uomassa ja sitä reunustavassa asutuksessa on tapahtunut vuosien 2013 ja 2022 välillä.

Tutkimuksessa käytetään kahdenlaista kaukokartoitusaineistoa: COWI:n tuottamaa korkeusmallia sekä Airbusin korkearesoluutioisia satelliittikuvia. Korkeusmallista tuotetaan paikkatieto-ohjelmiston avulla suhteellinen korkeusmalli, joka kuvastaa tulvivia alueita eri vedenkorkeuksilla. Satelliittikuvista puolestaan tarkastellaan, miten uoma on siirtynyt ja muuttunut sekä miten asutus on muuttunut vuosien 2013 ja 2022 välillä.

Tutkimustulosten mukaan jo pieni nousu joen vedenpinnassa saa suuria alueita tulvimaan erityisesti joen alajuoksulla. Alajuoksulla joki on myös leventynyt tarkastelujakson aikana. Suuret tulvat peittävät myös joen yläjuoksulla merkittävän kokoisia alueita alleen. Yläjuoksulla joen uoma oli muuttunut tarkastelujakson aikana huomattavasti niin muodoltaan kuin sijainniltaan. Nämä muutokset vaikuttivat suoraan slummiasutukseen, sillä nykyinen uoma kulkee entisten asuinalueiden yli ja asukkaat ovat joutuneet siirtymään muualle. Myös alajuoksulla uoma oli siirtynyt reitille, jossa oli ennen asutusta. Suurin osa alajuoksun asutuksen muutoksesta oli kuitenkin kauempana joesta, missä tulvat ovat voineet vaikuttaa asuinalueiden hylkäämiseen. Kiihtyvän kaupungistumisen seurauksena sekä asuinkelpoisen maa-alan puutteen vuoksi asutus on myös levinnyt ja tiivistynyt kaupungin keskustan ulkopuolella.

Avainsanat: tulvat, hydromorfologia, globaali etelä, slummit, kaupunkijoet

Sisällysluettelo

1	Johdanto	1
2	Tutkimuksen tausta ja teoreettinen viitekehys	3
2.1	Hydromorfologia	3
2.1.1	Valuma-alueen hydrologia	3
2.1.2	Tulvat	4
2.1.3	Jokiuoman morfologia	5
2.2	Ihmistoiminnan vaikutus hydromorfologiaan	6
2.2.1	Kaupunkiympäristön vaikutukset hydrologiaan	6
2.2.2	Kaupunkiympäristön vaikutukset morfologiaan	7
2.2.3	Ilmastonmuutos	8
2.3	Slummit	9
3	Tutkimusalueen kuvaus	12
4	Aineistot ja menetelmät	16
4.1	Aineistot	16
4.1.1	Korkeusmalli 5 m	16
4.1.2	Kaukokartoitusaineisto	16
4.2	Menetelmät	17
4.2.1	Suhteellinen korkeusmalli ja tulvaskenaariot	17
4.2.2	Uoman ja asutuksen muutosten digitointi ja tunnistaminen	18
5	Tulokset	20
5.1	Tulvivat alueet	20
5.2	Asutuksen ja joen muutokset vuosina 2013–2022	21
5.2.1	Asutuksen muutokset	21
5.2.2	Uoman muutokset	24
6	Keskustelu	26
6.1	Globaalin etelän kaupunkijokien tulvat	26
6.2	Jokiuoman geometrian aiheuttamat riskit	28
6.3	Slummien muutokset	29
6.4	Tutkimuksen rajoitteet ja jatko	30
7	Johtopäätökset	33

1 Johdanto

Jokien luonnolliseen toimintaan kuuluvat hydromorfologiset ilmiöt, kuten tulvat ja törmäeroosio, aiheuttavat kärsimystä miljoonille ihmisille vuosittain (Kam ym. 2021). Kun asutusta sijaitsee lähellä jokia, jokien luonnolliset ilmiöt voivat tuhota koteja ja infrastruktuuria. Tästä aiheutuu sekä inhimillistä että taloudellista vahinkoa. Suurimmat inhimilliset vahingot ilmenevät globaalissa etelässä, missä katastrofeihin varautumiselle ei ole riittäviä resursseja. Tulevien vuosikymmenten aikana tulvien aiheuttamien vahinkojen odotetaan kasvavan erityisesti Saharan eteläpuolisessa Afrikassa (Jongman ym. 2012). Tämä johtuu niin ilmastonmuutoksesta kuin alueella tapahtuvasta voimakkaasta väestönkasvusta ja kaupungistumisesta (Tellman ym. 2021). Kaikkein alttiimpia jokien vahingoille ovat kaupunkien köyhimmät väestöosat, jotka asuvat tulvaherkille alueille rakennetuissa slummeissa (Douglas 2008). Nämä slummit ovat yleisiä globaalin etelän suurkaupungeissa, joissa väestönkasvu on nopeaa sekä korkean syntyvyyden että kaupungistumisen vuoksi.

Väestönkasvu aiheuttaa kovaa ympäristöllistä painetta globaalin etelän kaupunkijoille, minkä seurauksena niiden luonnollinen dynamiikka on muutoksessa (Kayitesi ym. 2022). Ihmisen muuttaessa valuma-alueen maankäyttöä vettä läpäisemättömät pinnat ja infrastruktuuri muuttavat veden valuntaa ja sedimentin kulkeutumista (Santillan ym. 2019). Tämä puolestaan johtaa tulvien yleistymiseen ja voimistumiseen sekä voimakkaampaan törmäeroosioon. Kyseessä on siis noidankehä: kaupungistuminen voimistaa joen aiheuttamia riskejä, eikä sen rantoja asuttava heikommassa asemassa oleva väestö pysty reagoimaan niihin. Lisäksi ilmastonmuutos lisää sään ääri-ilmiöitä ja vähentää maaperää sitovaa kasvillisuutta, mikä taas ajaa lisää väestöä kaupunkiin maanviljelyn vaikeutuessa (Mahabir ym. 2016).

Ihmistoiminnan monimutkaisuus ja väestönmuutoksen nopeus tekevät globaalin etelän kaupunkijokien hallinnasta erittäin hankalaa. Vaikka globaalin etelän kaupunkijokiin liittyvät ongelmat, kuten tulviminen, ovat yleensä viranomaisten tiedossa, ei kaupungeilla ole ollut resursseja vaadittavaan kaupunkisuunnitteluun tai tulvariskeihin varautumiseen, etenkin hallitsemattoman kaupungistumisen kiihtyessä. Lisäksi globaalin etelän kaupunkijokien hydromorfologisista muutoksista on saatavilla liian vähän laadukasta tietoa. Slummien ja kaupunkijokien dynamiikasta ei ole tehty riittävästi laadukasta tutkimusta varsinkaan Afrikassa, missä jokien riskeille alttiin väestön kasvu on erityisen nopeaa (Jongman ym. 2012; Kayitesi 2022). Hydromorfologisesta näkökulmasta erityisesti jokien morfologian

vaikutuksia slummeihin on tutkittu erittäin vähän, vaikka uoman muutokset voivat suoraan vaikuttaa kaupunkien asutukseen.

Itä-Afrikan maista Tansania kärsii tulvista eniten (Erman ym. 2019: 2). Tansanian suurin kaupunki, Intian valtameren rannikolla sijaitseva Dar es Salaam, on yksi maailman nopeimmin kasvavista kaupungeista. Kaupungilla ei ole valmiuksia kohdata kaupungistumisen haasteita, ja valtaosa sen asukkaista asuu slummeissa. Ilmastonmuutos ja El Niño-ilmio tuovat kaupunkiin yhä useammin rankkasateita, jotka saavat kaupungin joet ja asuinalueet tulvimaan (Maailmanpankki 2019: 23). Slummien suuri asukastiheys ja puutteellinen infrastruktuuri voimistavat näitä tulvia. Yksi merkittävä slummialue on kaupungin läpi virtaavan Msimbazi-joen varsi ja tulvatasanko.

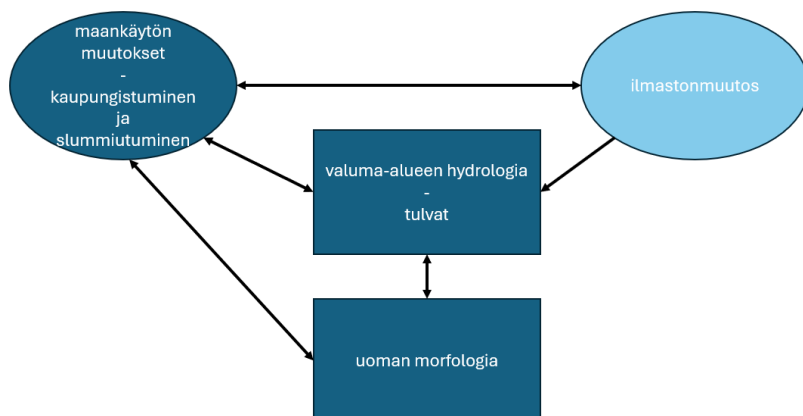
Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää, miten globaalin etelän kaupungeille tyypilliset hydromorfologiset ilmiöt näkyvät Msimbazi-jokea ympäröivillä slummialueilla.

Tutkimuksessa pyritään tunnistamaan kaukokartoitusaineiston perusteella, millä alueilla joki uhkaa asutusta sekä minkälaisia muutoksia joessa ja asutuksessa on tapahtunut näillä alueilla vuosien 2013 ja 2022 välillä. Tarkemmat tutkimuskysymykseni ovat seuraavat:

- 1) Mitkä alueet Msimbazi-joen varrella ovat eniten alttiita tulville?
- 2) Mitä muutoksia joen uomassa on tapahtunut vuosien 2013 ja 2022 välillä?
- 3) Miten asutus on muuttunut tulville ja törmäeroosiolle alttiilla alueilla vuosien 2013 ja 2022 välillä?

2 Tutkimuksen tausta ja teoreettinen viitekehys

Hydromorfologia kuvastaa jokisysteemin hydrologisia ja geomorfologisia prosesseja, sekä niiden vuorovaikutuksia, alueellista jakautumista ja vaihtelua (JBA 2021). Maankäytön muutokset sekä muutokset ilmastossa vaikuttavat suoraan tai välillisesti näihin prosesseihin ja muuttavat jokisysteemin tasapainoa (Kayitesi ym. 2022). Eri tekijät muodostavat monimutkaisen vuorovaikutusten verkoston (kuva 1).



Kuva 1. Maankäytön muutokset ja ilmastonmuutos vaikuttavat suoraan ja välillisesti jokien hydrologiaan ja morfologiaan. Lisäksi näiden välillä toimivat takaisinkytkentämekanismit voimistavat vaikutuksia. Kayitesi ym. 2022 mukailten.

2.1 Hydromorfologia

2.1.1 Valuma-alueen hydrologia

Valuma-alueella tarkoitetaan maanpinnan muotojen rajaamaa aluetta, jolta satanut vesi laskee yhden tietyn uoman kautta esimerkiksi mereen (Charlton 2008: 3, Vakkilainen 2016: 73).

Valuma-alue on perusyksikkö, jonka avulla voidaan kuvata hydrologista kiertoa tietyllä alueella (Yu & Duffy 2018: 1). Yksinkertaistettuna hydrologiseen kiertoon kuuluvat sadanta (P), haihdunta (E), valunta (Q) sekä veden varastoituminen (S) (Vakkilainen 2016: 73) joista voidaan muodostaa vesitaseyhtälö (2.1). Vesitaseyhtälön avulla voidaan kuvata näiden suureiden suhdetta tietyssä ajanjaksossa.

$$P = Q + E \pm \Delta S \quad (2.1)$$

Sadanta tarkoittaa tietyssä ajassa maahan sataneen veden määrää ja haihdunta veden muuttumista vesihöyryksi ja siirtymistä ilmakehään. Valunta on se osa sadannasta, joka valuu maan pinnalla tai maaperässä kohti uomaa (Leopold ym. 2020: 58). Se voidaan jakaa kolmeen

muotoon: pintavaluntaan, pintakerrosvaluntaan ja pohjavesivaluntaan (Vakkilainen 2016: 87). Pintavalunta on sadannan osa, joka kulkeutuu pintavetenä vesistöön, koska se ei haihdu tai imeydy maaperään. Pintakerrosvalunta taas imeytyy maaperään ja kulkeutuu pintakerroksissa vesistöön. Pohjavesivalunta imeytyy maaperään ja poistuu pohjavesien kautta vesistöön. Valuma-alueen ominaispiirteet, kuten koko, järvisyys, maaperä ja sen läpäisevyys sekä kasvillisuus, määrittelevät valunnan määrän, muodon ja ajallisen jakautumisen. Valunnan muotoon vaikuttavat eniten maaperän ominaisuudet, joita ihmistoiminta merkittävästi muokkaa.

Virtaamalla tarkoitetaan sitä vesimäärää, joka kulkee aikayksikössä uoman poikkileikkauksen läpi (Vakkilainen 2016: 74). Virtaama koostuu pohjavirtaamasta sekä välittömästä virtaamasta, jonka pinta- ja pintakerrosvalunta muodostavat. Pohjavirtaamana sadanta kulkeutuu pohjavetenä hitaasti ja tasaisena määränä uomaan. Välitön valunta puolestaan aiheuttaa virtaamassa äkillisempiä muutoksia lyhyen viiveen jälkeen sadannasta. Viive on sitä lyhyempi ja virtaamahuippu sitä suurempi, mitä suurempi osa valuma-alueen valunnasta on pintavaluntaa (Holden 2018: 484). Alueilla, joilla on selkeä kuiva ja sadekausi, pohjavalunta on vähäistä kuivan kauden aikana ja sateiden alkaessa välitön valunta aiheuttaa suuria piikkejä virtaamassa.

2.1.2 Tulvat

Joet tulvivat, kun pintavalunnan määrä ylittää jokiuoman kapasiteetin ja kyvyn sopeutua veden määrään (Charlton 2008: 30; Jha & Lamond 2012: 58). Tällöin vesi ylittää uoman reunat ja tulvii sitä reunustavalle alavalle joen sedimenttien muodostamalle tulvatasangolle (Charlton 2008: 205). Tulvat ovat luonnollinen osa jokien vuosikiertoa ja vesi peittääkin tulvatasangon säännöllisesti. Tulvan suuruutta voidaan kuvata maksimivirtaaman arvona, tulvan korkeutena tai tulvan toistuvuutena (Charlton 2008: 31; Smith & Petley 2009: 239). Tulvan toistuvuus tarkoittaa sitä, minkä ajanjakson välein vesi keskimäärin nousee tiettyyn tulvakorkeuteen, esimerkiksi kerran 20 vuodessa.

Tulvien syyt voidaan jakaa kahteen kategoriaan: primäärisiin ja sekundaarisiin (Smith & Petley 2009: 239–240). Primääriset syyt ovat yleensä säähän liittyviä ja sään ääri-ilmiöt, erityisesti rankkasateet, ovat yleisin tulvien syy. Sekundaariset syyt ovat puolestaan valuma-alueiden tulvia voimistavia ominaisuuksia, jotka voivat olla luonnollisia tai ihmisen

aiheuttamia. Luonnollisiin ominaisuuksiin lukeutuu mm. valuma-alueen muoto, kun taas ihmislähtöisiä ominaisuuksia ovat esimerkiksi maankäyttö ja ojitukset. Maaperän läpäisevyyttä heikentävä maankäyttö voi johtaa myös hulevesitulvien yleistymiseen (Holden 2018: 489).

2.1.3 Jokiuoman morfologia

Joen muoto on jatkuvassa muutoksessa, sillä virtaava vesi kuluttaa, kuljettaa ja kasaa kiintoainesta. Joen uomilla on taipumus muuttaa paikkaansa tulvatasangolla (Holden 2018 501). Valuma-alueen mittakaavalla joen muutoksen dynamiikkaa hallitsee kaksi muuttujaa: veden virtaama ja kiintoainevirtaama (Charlton 2008: 128–131; Malavoi & Bravard 2010: 17). Kiintoainevirtaama on uoman poikkileikkauksen läpi veden mukana liikkuvan sedimentin määrä aikayksikössä. Kiintoaines on peräisin valuma-alueelta tai uoman reunalta tai pohjasta. Mitä voimakkaampaa veden virtaus on, sitä enemmän liike-energiaa siinä on ja sitä suurempia määriä kiintoaineista se pystyy kuluttamaan ja kuljettamaan. Hitaassa virtauksessa puolestaan kiintoainesta kasautuu. Veden kulutusvoima on riippuvainen uoman kaltevuudesta sekä veden määrästä eli virtaamasta. Suurien tulvien aikana virtaavan veden eroosiovoima ja kuljetuskyky kasvavat ja ne aiheuttavatkin suuria muutoksia jokiuoman geometriassa (Charlton 2008: 6). Myös pienet, yleiset huippuvirtaamat muokkaavat jokiuomaa merkittävästi (Charlton 2008: 32).

Joessa kiintoaineen kasautumisen ja poistumisen välillä vallitsee tasapaino, joka määrittää joen geometrian muutosnopeuden (Charlton 2008: 97). Muutokset virtauksessa tai sedimentin saatavuudessa johtavat siihen, että uoman täytyy sopeutua muutoksiin. Tämä voi ilmetä neljällä eri tavalla: uoman poikkileikkauksen, kaltevuuden, muodon (engl. *planform*) tai uoman pohjamateriaalin karkeuden muutoksina. Näistä uoman poikkileikkauksen sekä uoman muodon muutoksia on mahdollista havaita tässä tutkimuksessa käytettyjen kaukokartoitusmenetelmien avulla. Nämä muutokset ilmenevät muun muassa uoman leventymisenä, sivuttaissiirtymisenä (engl. *lateral migration*), meanderikaarteiden siirtymisenä ja särkkien muutoksina. Tyypillisesti jokiuoma on jyrkempi ja kapeampi yläjuoksulla, jolloin virtausnopeus ja kulutus keskittyykin sinne. Alajuoksulla profiili on taas loivempi ja virtausnopeus hitaampi, jolloin sedimenttiä kasautuu.

Tutkimuksen mukaan on monia tekijöitä, jotka määrittävät kuinka herkästi uoma muuttuu tulvatilanteessa (Todd-Burkeley ym. 2021). Niistä tärkein on uoman rajoittuneisuus (Todd-Burkeley ym. 2021). Uomaa voivat rajoittaa luonnolliset syyt, kuten kallioperä, mutta myös ihmislähtöiset syyt, kuten tulvatasangolle rakentaminen, uomassa sijaitsevat rakenteet tai uoman muokkaus. Muita tekijöitä ovat mm. kiintoaineen saatavuus, kasvillisuus, maankäytön muutokset sekä virtauksen ominaisuudet. Muutokset ovat suurimpia silloin, kun useampi näistä tekijöistä yhdistyy.

2.2 Ihmistoiminnan vaikutus hydromorfologiaan

2.2.1 Kaupunkiympäristön vaikutukset hydrologiaan

Valuma-alueiden maankäytön muutokset, erityisesti kaupungistuminen, muuttavat valuma-alueiden hydrologiaa ja uomien morfologiaa. Muutokset maankäytössä vaikuttavat siihen, miten valuma-alue reagoi sadantaan (Santillan ym. 2019: 41). Tämä vaikuttaa puolestaan vesitaseeseen, jossa sadannan, infiltraation eli maahan imeytymisen, haihdunnan ja vesivarastojen suhde muuttuu. Tutkimuksissa on todettu, että ihmisen aiheuttamat maanpeitteen muutokset johtavat siihen, että pintavalunta lisääntyy ja huippuvirtaamat yleistyvät.

Kaupungistumisen vaikutuksia hydrologiaan on tutkittu laajalti, ja vaikutukset ovat selviä ja yhdenmukaisia (Walsh ym. 2005; Chin 2006: 469). Kaupunkialueiden laajeneminen lisää vettä läpäisemätöntä pintaa. Kun vesi ei pysty läpäisemään maanpintaa tai tämä tapahtuu hitaammin, maaperään imeytyvän veden määrä vähenee ja pintavalunnan osuus valunnasta kasvaa (Smith & Petley 2009: 240). Lisäksi kaupunkien sileä maankäyttö, viemärointi ja sadevesikanavat nopeuttavat sadeveden pääsyä uomaan. Nämä muutokset vaikuttavat valuma-alueen hydrologiaan merkittävästi. Ne lisäävät sekä välitöntä valuntaa että huippuvirtaamien suuruutta ja esiintyvyyttä, lyhentävät valunnan viivettä ja muuttavat kokonaisvalunnan määrää. Pienten huippuvirtaamien esiintyvyys voi jopa kymmenkertaistua. Toisaalta puutteelliset sadevesikanavat lisäävät hulevesitulvia, kun vesi ei pääsekään imeytymään maaperään tai virtaamaan kohti uomaa (Smith & Petley 2009: 240). Läpäisemättömän pinnan sijainnilla on myös vaikutusta hydrologiaan. Jos läpäisemätöntä maata on aivan uoman lähellä tai pinnalle kertynyt sadevesi johdetaan putkistoa pitkin suoraan jokeen, sadannan vaikutus virtaaman kasvuun voimistuu (Vietz ym. 2016: 485). Veden nopeampi pääsy uomaan sekä

maapinnan läpäisemättömyys johtavatkin tulvien yleistymiseen ja voimistumiseen kaupunkialueilla (Santillan ym. 2019: 41; Wantzen ym. 2019: 19).

Erityisesti kaupunkien reunoilla maanviljely on merkittävä elinkeino ja jokien tulvatasankojen hedelmällinen maaperä tarjoaa hyvät edellytykset sille. Globaalissa etelässä pienviljely on yleistä myös kaupunkialueiden sisällä ja asukkaat hyödyntävätkin kuivan kauden aikana joen pohjaa viljelyssä. Tällä on vaikutuksia joen hydromorfologiaan. Metsään verrattuna viljelty maa on huonosti vettä läpäisevää ja pintavalunta onkin nopeaa. Samoin sedimentin kuljetus on nopeaa ja viljellyillä valuma-alueilla joki usein kaivaa itselleen syvän uoman ja törmän eroosio on voimakasta (Katyiesi 2019: 3).

2.2.2 Kaupunkiympäristön vaikutukset morfologiaan

Jo 1960-luvulla Wolman (1967: 386) totesi, että valuma-alueen maankäytön muutokset johtavat uoman geometrian muutoksiin. Uoma sopeutuu virtaamaolojen (engl. *flow regime*) ja kiintoaineen saatavuuden muutoksiin muuttamalla leveyttään ja syvyyttään (Walsh ym. 2005: 710). Kaupungistumisesta johtuvat muutokset hydrologiassa, erityisesti virtaamien nopea kasvu sadantatilanteissa, lisäävät uoman eroosiota. Yksittäiset suuret tulvatilanteet aiheuttavatkin suuria muutoksia jokiuoman geometriaan, mutta myös pienempien huippuvirtaamien lisääntyvä esiintyvyys kasvattaa uoman eroosiota merkittävästi.

Valuma-alueen kaupungistumisen aiheuttama muutos kulkeutuvan kiintoaineen määrään ei ole yhtä yksiselitteinen kuin kaupungistumisen vaikutus valuntaan ja virtaukseen (Vietz ym. 2016: 487). Kaupunkialueen kasvaessa valuma-alueelta erodoituvan sedimentin määrä sekä jokiuoman sedimenttivirtaama yleensä ensin moninkertaistuvat (Wolman 1967; Chin 2006: 470). Valuma-alueelta ja joen yläjuoksulta erodoitunut sedimentti kasautuu alajuoksulle sekä uoman kapeisiin kohtiin, kuten siltojen kohdalle, mikä pienentää paikoitellen joen kapasiteettia ja lisää tulvia (Trimble 1997). Pitkään päällystettynä olleelta kaupunkialueelta irtoaa puolestaan huomattavan vähän kiintoainesta (Vietz ym. 2016: 487). Toisaalta lisääntynyt valunta lisää uoman kuljetus- ja eroosiokapasiteettia, ja itse uoman pohjan ja sivujen eroosio voi lisääntyä ja uoman muoto muuttua merkittävästi (Gregory & Chin 2002: 318). Kaupungistumisen vaikutusta jokien geomorfologiaan on kuitenkin tutkittu trooppisilla alueilla huomattavan vähän (Chin 2006: 474; Kayitesi 2022).

Ihmistoiminta rajoittaa paikoitellen jokisysteemin mahdollisuutta reagoida muutoksiin veden ja kiintoaineen virtaamissa. Tämä johtaa siihen, että reaktiot voimistuvat toisilla joen

osuuksilla. Esimerkiksi kaupunkien infrastruktuuri, kuten sillat tai rakennukset, voivat vaikuttaa uoman kapasiteettiin ja eroosioon (Vietz ym. 2016: 485). Rajoittunut kapasiteetti lisää tulvien esiintyvyyttä esteen yläjuoksun puolella. Ihmistoiminta rajoittaa usein kaupungistuneilla valuma-alueilla sijaitsevien uomien tulvatasankojen kokoa ja toimintaa (Vietz ym. 2016: 487). Luonnontilassa uoma voi muuttaa vapaasti sijaintiaan tulvatasangolla sekä varastoida vettä ja sedimenttiä tulvatasangolle. Tämän liikkumavaran ja varaston rajoittaminen voi johtaa eroosion lisääntymiseen ja tulvien kasvuun (Trimble 1997: 1443). Trimblen (1997) mukaan uoman eroosion aiheuttamista ongelmista puhuttaessa keskitytään liikaa alajuoksulle koituviin ongelmiin eli tulvimiseen, vaikka myös itse eroosio voi olla yhteiskunnallinen riski. Tutkimusten mukaan kaupungeissa jokien uomat voivat leventyä ja muuttua syvemmiksi (Walsh ym. 2005: 708). Uoman suureneminen tai migraatio leveys suunnassa poistaa maa-alueita, jota on voitu käyttää asutukseen tai muihin toimintoihin sekä tuhoaa infrastruktuuria, kuten siltoja (Das ym. 2014)

2.2.3 Ilmastonmuutos

Ilmastonmuutos vaikuttaa merkittävästi hydrologiseen kiertoon muuttamalla lämpötiloja ja sadantaa. Nämä muutokset vaikuttavat suoraan haihduntaan ja valuntaan. Ilmastonmuutoksen myötä hydrologisen kierron ennustaminen vaikeutuu entisestään (Wanzen ym. 2019: 5–6), sillä ilmastomallit tarjoavat vain arvioita tulevista olosuhteista. Kuitenkin yleisesti ääritilanteiden, kuten tulvien ja kuivuuden, ennustetaan voimistuvan, mikä asettaa lisää haasteita kaupunkien vesistöille (Wanzen ym. 2019: 5–6). Myös ennustettu pienempien huippuvirtaamien yleistymisen lisää joki-uoman eroosiota (Wolman 1967).

Kasvillisuuden väheneminen ilmastonmuutoksen seurauksena johtaa jokiympäristöjen kannalta haitallisiin vaikutuksiin, erityisesti pintavalunnan kasvuun ja eroosion lisääntymiseen. Muuttuvat olosuhteet ja pidentyvät hellejaksot vaikuttavat kasvillisuuteen ja heikentävät kasvien kykyä sitoa maaperää juuristollaan. Kasvittomat alueet ovat alttiimpia sateen ja virtaavan veden aiheuttamalle eroosiolle. Lisäksi ilmastonmuutos ja kaupungistuminen toimivat synergisesti. Kaupunkien lämpötila on usein ympäristöään korkeampi johtuen kaupungin lämpösaareke -ilmiöstä ja ilmastonmuutoksen aiheuttamat lämpötilojen nousu ja yleistyvät helleaallot koetaan voimakkaampina kaupungeissa

(Marcotullio ym. 2021:3). Ilmaston lämpeneminen voi olla nopeampaa kaupungeissa kuin ympäröivillä alueilla.

Slummi-alueiden tulvat ovat yksi konkreettinen esimerkki ilmastonmuutoksen ja kaupungistumisen yhteisvaikutuksista, erityisesti Afrikan kaupungeissa (Douglas ym. 2008). Näiden alueiden haavoittuvuus tulville ja jokiuoman muutoksille korostuu, kun äärimmäiset sääilmiöt ja kaupungistumisen seuraukset yhdistyvät luoden lisää riskejä asukkaille ja infrastruktuurille.

2.3 Slummit

Tässä tutkimuksessa slummi (engl. *slum, informal settlement, unplanned settlement*) kuvastaa suurkaupungin asuinalueita, joissa suunnittelu sekä infrastruktuuri, kuten viemärointi ja ojitus, on puutteellista. Suunnittelemattomuus ilmenee puutteellisen infrastruktuurin lisäksi esimerkiksi epäsäännöllisenä kaupunkirakenteena. Slummin tarkka määrittely on haastavaa, sillä määritelmät vaihtelevat valtioiden välillä. Lisäksi saman slummin sisällä voi olla suuria eroavaisuuksia esimerkiksi elintasossa ja rakennusten tyypissä. YK:n yleisesti käytetyn määritelmän mukaan slummiksi lasketaan alue, jonka asukas kärsii yhden tai useamman peruspalvelun puutteesta, joita ovat kestävä asunto, riittävä elintila, puhdas vesi, saniteettitilat ja turvattu asumisoikeus (UN Habitat 2016). Slummeihin liittyy olennaisesti köyhyys.

Slummit ovat yleisimpiä globaalien etelän kaupungeissa (mm. Douglas ym. 2008), joissa nopea kaupungistuminen ja väestönkasvu ylittävät kaupunkisuunnittelun resurssit (UN Habitat 2022). Kehittyvissä valtioissa maalta kaupunkiin suuntautuva muuttoliike on nopeaa, ja sitä ajavat maaseudun työntekijät ja kaupungin vetovoimatekijät (Mahabir ym. 2016). Työntekijöitä on esimerkiksi köyhyys, korkea syntyvyys, maatalouden modernisaatio ja ympäristöongelmat, joita ilmastonmuutos pahentaa. Kaupungeissa maaseudun väestöä vetää puoleensa toivo paremmista mahdollisuuksista sekä peruspalvelut kuten koulutus ja terveydenhuolto. Maaseudulta kaupunkiin suuntautuva muuttovirta on niin voimakas, etteivät kaupunkisuunnittelun resurssit riitä vastaamaan siihen, ja köyhistä oloista tulevat ihmiset asettuvat sinne, minne voivat: slummeihin.

Slummit rakentuvat usein joutomaille ja vaarallisille kaupunkialueille, missä on tilaa rakentaa, ja rakennusmääräyksiä ei valvota (YK 2016). Tyypillisiä alueita ovat esimerkiksi valtateiden varret, teollisuusalueet, rinteet ja huonokuntoisten sekä tulvivien jokien varret. Esimerkiksi suuri tulvariski vähentää alueen markkina-arvoa, mikä johtaa köyhimmän väestöosan asettumiseen vaarallisimmille alueille (Douglas ym. 2008: 187; Wantzen ym. 2019: 2–6). Väestöpaine johtaa siihen, että kuivan kauden aikana asutusta rakennetaan jopa joen uomaan (Hooli 2015). Asutusta ja infrastruktuuria rakennetaan myös epävakaille joen törmille, missä eroosion vaikutuksesta törmä voi sortua (Kummu ym. 2008). Sen lisäksi, että asutus leviää uusille alueille, se tiivistyy olemassa olevilla alueilla (Breuer & Friesen 2023: 14).

Kuten muukin kaupungistuminen, myös slummiutuminen muuttaa hydromorfologisia prosesseja. Muutos on kuitenkin hyvin nopeaa ja suunnittelematonta, eikä rakentamisesta seuraavia hydromorfologisia riskejä välttämättä ehditä tai osata tunnistaa. Globaalin etelän kaupungeilla ei usein ole resursseja suunnitella ja toteuttaa hulevesien ja tulvariskin hallintaan tarvittavaa infrastruktuuria, kuten viemärointiä, sanitaatiota, jätehuoltoa, pengerryksiä, pumppujärjestelmiä ja muita tulvientorjuntamekanismeja, kuten varoitusjärjestelmiä ja valistamista (Wantzen 2019: 5). Slummeissa asuvalla väestöllä ei myöskään yleensä ole poliittista valtaa tai käytännön taitoja kehittää jokialueen käyttöä kestävästi (Douglas ym. 2008: 187; Wantzen 2019: 2). Heille ei myöskään usein anneta mahdollisuutta osallistua ongelmien tai ratkaisujen tunnistamiseen, vaikka asukkailla olisi ensi käden tietoa näistä.

Douglas ym. (2008: 191) esittivät neljä kaupunkitulvien tyyppiä Afrikassa:

- 1) Paikallinen, puutteellisesta viemäroinnistä johtuva tulviminen. Viemärointiä ei ole tai se on riittämätöntä asutukseen verrattuna ja sateet aiheuttavat hulevesitulvia (myös Wantzen 2019).
- 2) Tulviminen pienistä uomista, joiden valuma-alueet sijaitsevat lähes kokonaan rakennetuilla alueilla. Muutokset kaupunkialueen määrässä ja sateiden intensiteetissä johtavat siihen, ettei näiden pienten uomien kapasiteetti riitä kuljettamaan vettä vaan ne tulvivat helposti. Lisäksi uomiin kertynyt sedimentti ja yhteiskuntajäte pienentävät niiden kapasiteettia ja aiheuttavat tukkeumia.
- 3) Suurten jokien tulviminen. Kun kaupungit ovat rakentuneet jokien varrelle ja niiden valuma-alueella tapahtuu muutoksia, tulvien ja eroosion määrä muuttuu.

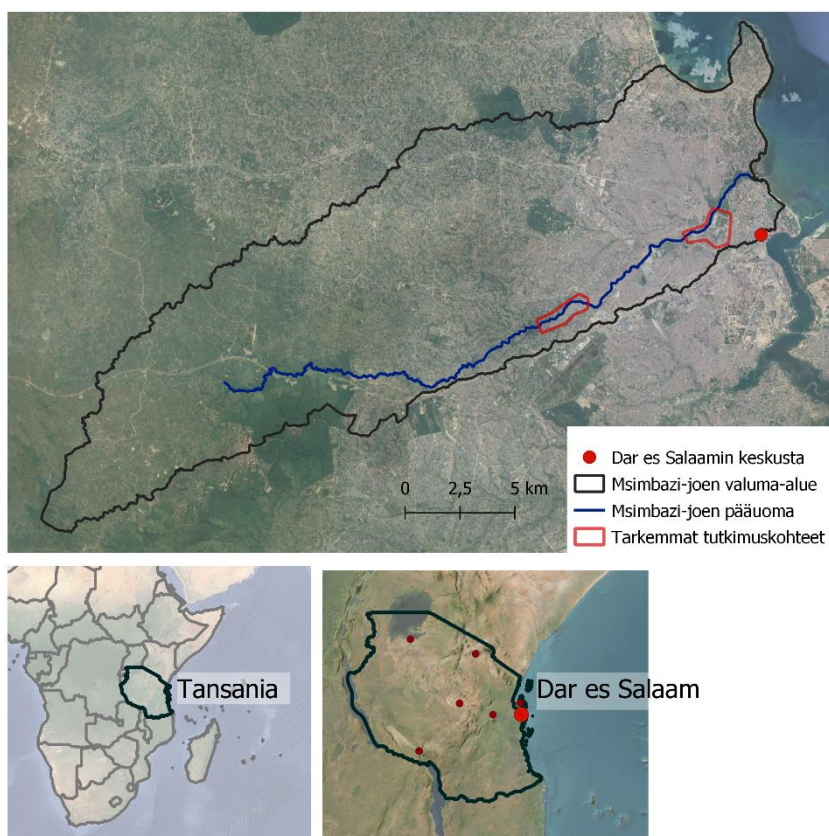
4) Rannikkotulvat tai vuoroveden ja korkean joen vedenkorkeuden yhteisvaikutus. Monet Afrikan kaupungit sijaitsevat rannikolla, missä merenpinnan nousu uhkaa asutusta.

Hallitustenvälisen ilmastonmuutospaneelin IPCC:n mukaan ilmastonmuutoksen kaupunkialueille aiheuttamat riskit ovat erityisen suuria epävirallisilla ja suunnitelmattomilla kaupunkialueilla (UN Habitat 2022: 155). Ilmastonmuutos vaikuttaa kaupunkialueisiin suoraan lisäten esimerkiksi sään ääri-ilmiöitä sekä tulvien esiintyvyyttä. UN Habitat -raportissa todetaan myös, että suunnittelematon ja kestämaton kaupungistuminen voimistaa ilmastonmuutoksen vaikutuksia, kuten helleaaltoja ja rankkasateita. Kehittyvien valtioiden kaupunkien rajalliset resurssit sekä heikot instituutiot ja hallinto vaikeuttavat katastrofeihin valmistautumista ja niistä selviämistä (UN Habitat 2022: 16).

Slummi-termi on kiistelty, koska sanalla on negatiivisia konnotaatioita, eivätkä slummien asukkaat itse käytä sitä omasta asuinalueestaan (Harris 2009: 157–162). Siksi englanninkielisessä tutkimuksessa käytetään usein vaihtoehtoisia termejä, kuten epävirallinen (*informal*), suunnittelematon (*unplanned*), oma-aloitteinen (*spontaneous*) tai puutteellinen (*deprived*) asutus (Kuffer ym. 2016: 6). Näiden kaikkien merkitykset eroavat toisistaan hieman, toiset painottavat esimerkiksi maanomistusoikeuksia tai asuinalueen kasvun tapaa. Suomenkieliseen tutkimukseen, jota on hyvin vähän, *slummi*-termi on kuitenkin vakiintunut (mm. Tamminen 2016; Lindgren 2022) ja se on myös YK:n asutusohjelmassa käytetty termi. Tämän takia tässä tutkimuksessa käytetään termiä *slummi* neutraalissa merkityksessä kuvastamaan kaupunkialueita, joiden elinolot ovat huonot ja joiden fyysiset ominaisuudet kuten epäsäännölliset rakenteet ja suuri asukastiheys ovat tunnistettavissa kaukokartoitusmenetelmien avulla (ks. Kuffer ym. 2016: 6).

3 Tutkimusalueen kuvaus

Tutkimuskohteenani on Dar es Salaamin läpi virtaava Msimbazi-joki (kuva 2). Dar es Salaam on Tansanian suurin kaupunki ja yksi Afrikan nopeimmin kasvavista metropolialueista (Erman ym. 2019: 2). Arvioiden mukaan 70–80 % Dar es Salaamin alueen 6,9 miljoonasta asukkaasta asuu slummeissa (Erman ym. 2019: 2; Dar es Salaam, Tanzania s.a.), joissa perusinfrastruktuuri kuten viemäröinti on puutteellista. Osa kaupungin slummeista kärsii säännöllisesti tulvista. Tulvien esiintyvyys on kasvanut alueella viime vuosikymmeninä.



Kuva 2. Tutkimusalue sijaitsee Tansanian itärannikolla, Dar es Salaamin kaupungissa.

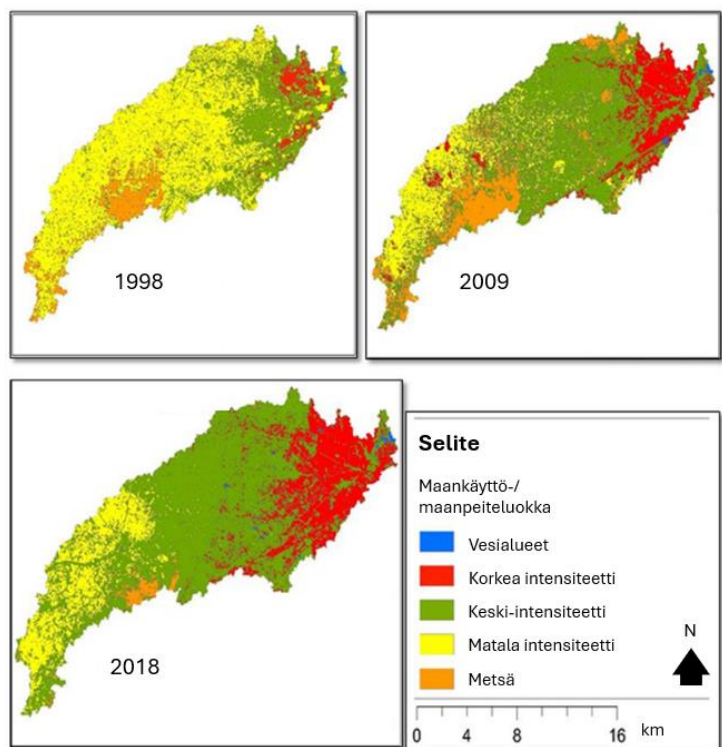
Dar es Salaamin ilmasto kuuluu trooppiseen savanni-ilmastoon (Kottek ym. 2006: 261; Aardenne & Pasquini 2017: 1). Päivän ylin lämpötila on 30–33 °C ja alin 19–24,5 °C (Dar es Salaam Climate Normals 2020). Vuosittainen sademäärä on noin 1100 mm ja se keskittyy pääosin kahteen sadekauteen: lyhyeen sadekauteen loka-joulukuussa ja pitkään sadekauteen maaliskuu-toukokuussa. Vuosien välillä sademäärässä voi olla suuria eroja (Aardenne & Pasquini 2017: 2): esimerkiksi vuonna 2020 satoi 1800 mm ja vuonna 2022 vain 670 mm (Tanzania in figures 2022). Suuret sääjärjestelmät El Niño -ilmiö sekä Intian valtameren dipoli-ilmiö (IOD)

vaikuttavat merkittävästi alueen säähän ja sateisiin (Saji ym. 1999; Kijazi & Reason 2005). El Niño -ilmiön on todettu voimistaneen tulvia Itä-Afrikassa viime vuosikymmeninä (Maailmanpankki 2011: 25; Maailmanpankki 2019: 23).

Aardennen & Pasquinin (2017) mukaan ilmasto on muuttunut Dar es Salaamissa viimeisen 50 vuoden aikana, erityisesti sateiden osalta. Pitkän sadekauden sademäärä on kasvanut ja sade on intensiivisempää, lyhyt sadekausi muuttuu puolestaan jatkuvasti kuivemmaksi. Lisäksi molempien sadekausien sisäiset kuivat jaksot ovat pidentyneet. Kesäkauden äärimmäisten kuumien päivien määrä ja kesto ovat vähentyneet, mutta yölämpötilat ovat nousseet. Tulevaisuuden säiden on ennustettu jatkavan samaa trendiä: sateiden luonne muuttuu ja lämpötila kohoaa (Maailmanpankki 2019). Ääriolosuhteista tulee yhä yleisempiä, kun kuivat kaudet ovat kuivempia ja sadekauden sateet intensiivisempiä. Tämä johtaa kaupungin jokien virtaaman pienenemiseen kuivan kauden aikana ja voimistuneet sateet puolestaan lisäävät sekä joki- että hulevesitulvia (Maailmanpankki 2011: 28).

Dar es Salaamin väkiluku kasvaa nopeasti, noin 4,3 %:lla vuodessa (Maailmanpankki 2019: 17), johtuen sekä maaseudulta kaupunkiin suuntautuvasta muuttoliikkeestä että korkeasta syntyvyydestä (Maailmanpankki 2011: 33). Köyhyyden ja kestäättömän asuntopolitiikan vuoksi kaupunkiväestön kasvu keskittyy slummeihin, ja levittyy kohti vaarallisempia alueita, kuten jokien rantoja (Maailmanpankki 2019: 19). Tiivistynyt kaupunkirakenne on johtanut kaupungin lämpösaarekeilmiön voimistumiseen Dar es Salaamissa (Li ym. 2021). Lämpösaarekeilmiö nostaa kaupunkialueen lämpötilaa, mikä lisää kuumuuden aiheuttamaa kuormitusta ihmisille ja eliöstölle.

Msimbazi-joen valuma-alue on 170 km² kokoinen ja se kattaa suuren osan Dar es Salaamin pinta-alasta. Noin 63 km pituinen joki saa alkunsa metsäiseltä ylängöltä, kulkee Dar es Salaamin kaupungin läpi ja laskee lähellä sen keskustaa Intian valtamereseen. Valuma-alueella ei ole järviä tai muita valuntaa hidastavia pintavesivarastoja. Lähes koko valuma-alueen maankäyttöä leimaa ihmistoiminta. Kaupunki on rakentunut meren rannalla olevan sataman ympärille ja kasvaa jatkuvasti kauemmas siitä kohti joen latva-alueita (Mkilima 2022: 9). Kauempana keskustasta metsien hakkuu, maanviljelys ja karjankasvatus vaikuttavat valuma-alueeseen. Mkiliman (2022) mukaan valuma-alueen maankäyttö on muuttunut huomattavasti intensiivisemmäksi viimeisten 25 vuoden aikana (kuva 3).



Kuva 3. Dar es Salaamin räjähdysmäinen kasvu näkyy Msimbazi-joen valuma-alueen maankäytön muutoksina vuosien 1998, 2010 ja 2018 välillä. Matala intensiteetti tarkoittaa mm. joutomaata, laidunmaata ja viljelyksiä eli alueita, joilla vettä läpäisemätöntä pintaa on 20–49 %. Keski-intensiteetti tarkoittaa alueita, jotka ovat sekoitus rakennettua pintaa ja kasvillisuutta ja korkea intensiteetti alueita, jotka ovat kokonaan rakennettu. Kuva muokattu lähteestä Mkilima 2022.

Noin kolmannes Dar es Salaamin väestöstä, yli 1,6 miljoonaa ihmistä, asuu Msimbazi-joen valuma-alueella (Maailmanpankki 2019: 19). Ennusteiden mukaan vuonna 2030 asukkaita voi olla jopa 2,5 miljoonaa. Valtaosa valuma-alueen rakennuksista sijoittuu joko alemmalle tulvatasangolle tai alle 60 metrin päähän joesta (Maailmanpankki 2019: 19–23). Tällä tulville alttiilla alueella asukkaita on ajoittain häädetty kodeistaan ja rakennuksia purettu.

Maailmanpankin johtaman Msimbazin valuma-alueen kehitysprojektin yksi tavoite on järjestelmällisesti lopettaa vaarallisilla alueilla asuminen tarjoamalla vaihtoehtoisia paikkoja asutukselle tai tarjoamalla rahallista kompensatiota pois muuttaville asukkaille (Maailmanpankki 2019; Maailmanpankki 2022).

Sateet aiheuttavat tutkimusalueella sekä joen tulvimista että hulevesitulvia ja nämä molemmat ovat yleistyneet viime vuosikymmenten aikana. Puutteelliset ja huonokuntoiset sadevesiviemärit sekä huono jätehuolto ovat merkittäviä syitä Dar es Salaamin slummien tulvimiselle (Maailmanpankki 2011: 57). Sateiden kausittaisen luonteen takia uoma on kuiva suuren osan vuodesta. Kaupungin asukkaat hyödyntävätkin uoman pohjaa kuivan kauden

aikana esimerkiksi viljelyskäyttöön, rakentamiseen ja liikkumiseen. Msimbazin uomassa tapahtuu eroosiota ja levenemistä yläjuoksulla ja sedimentaatiota ja kapenemista alajuoksulla (Izdori ym. 2022). Tämä madaltaa jokiuomaa alajuoksulla ja pahentaa tulvia. Msimbazi-joen virtaaman seuraamiseen ei ole kattavaa mittausverkostoa, mikä vaikeuttaa muutosten tunnistamista sekä riskien hallintaa (Valimba & Mahé 2020).

4 Aineistot ja menetelmät

4.1 Aineistot

4.1.1 Korkeusmalli 5 m

Korkeusmalli (*engl. digital elevation model, DEM*) kuvastaa maanpinnan muotoja korkeuspisteiden avulla (Oksanen ym. 2016). Korkeusmalleja hyödynnetään monissa käyttökohteissa, esimerkiksi hydrologisissa ja hydraulisissa malleissa ja analyyseissä sekä tulvariskianalyyseissä. Tutkimuksessani maanpinnan korkeustietona on käytetty COWI:n tuottamaa rasterimuotoista korkeusmallia, jonka tarkkuus on 5 metriä. Korkeusmallin data on kerätty lentokoneen avulla vuonna 2017 ja siitä on suodatettu pois maanpinnan yläpuoliset kohteet, kuten puut ja rakennukset (COWI 2017 cit. Winsemius ym. 2018). COWI:n korkeusmalli perustuu fotogrammetriaan, eli eri perspektiiveistä otettuihin valokuviin. Tämän korkeusmallin tarkkaa tuottamisajankohtaa ei ole tiedossa. Digitaalisesta korkeusmallista tuotettiin tässä tutkimuksessa suhteellinen korkeusmalli (*engl. relative elevation model, REM; detrended digital elevation model*).

4.1.2 Kaukokartoitusaineisto

Tutkimuksessa tarkastelin Msimbazi-joen uoman ja sitä reunustavan asutuksen muutoksia vuosien 2013 ja 2022 välillä. Käytin tarkasteluun viittä Airbus Intelligencen hallinoidun Pléaides-satelliittiohjelman kuvaa. Nämä satelliittikuvat ovat erittäin korkearesoluutioisia (*engl. very high resolution satellite imagery*) rasterikoon ollessa vain 0,5 metriä (Coeurdevey & Fernandez 2012). Tarkastelemiani muutoksia olisi ollut hyvin vaikeaa tai mahdotonta havaita käyttäen internetissä vapaasti saatavilla olevaa satelliittiaineistoa, sillä niiden rasterikoko on huomattavasti suurempi. Sain Airbus Intelligenceltä ilmaiseksi käyttööni rajatun määrän aineistoa tutkimuksen suorittamiseksi.

Valitsin kuvat siten, että ne kattoivat mahdollisimman pitkän ajanjakson, jotta muutoksen laajuus selviäisi. Pléaides-satelliittiohjelma julkaistiin vuonna 2012 ja ensimmäinen käyttämäni kuvani on vuodelta 2013. Kuvien valintaan vaikutti merkittävästi niiden alueellinen kattavuus ja pilvettömyys. Esimerkiksi vuodelta 2019 ei ollut pilvetöntä kuvaa, joka olisi kattanut koko tutkimusalueen, joten valitsin alajuoksulle kuvan vuodelta 2018.

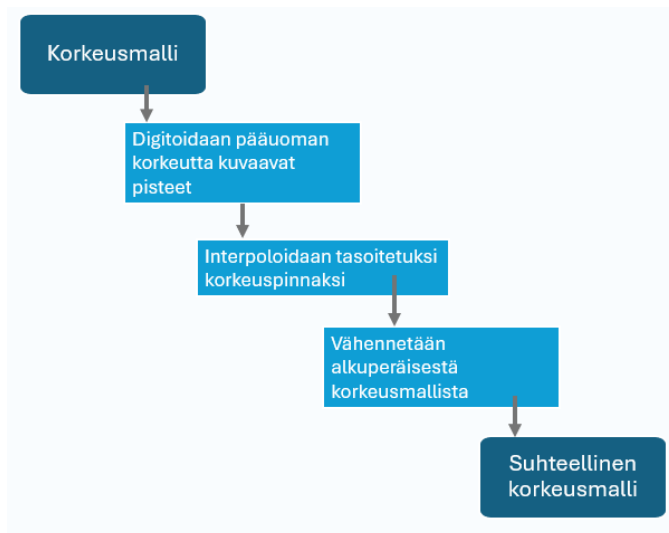
Käyttämäni kuvat ovat ajankohdilta 1.3.2013, 5.7.2016, 21.3.2018 (alajuoksu), 22.8.2019 (yläjuoksu) ja 5.11.2022.

4.2 Menetelmät

4.2.1 Suhteellinen korkeusmalli ja tulvaskenaariot

Tässä tutkimuksessa tulvan laajuus selvitettiin suhteelliseen korkeusmalliin perustuvalla menetelmällä. Tämän tasomenetelmän avulla ei pystytä mallintamaan veden virtausta, mutta sen avulla voidaan selvittää alueet, joille nouseva vesi leviää todennäköisimmin (Grego ym. 2008; Teng ym. 2017: 206). Suhteellinen korkeusmalli on edullinen ja nopea tapa tulvalaajuuden kartoittamiseen erityisesti alueilla, joilla mittausdata on puutteellista.

Käytin suhteellisen korkeusmallin tuottamiseen QGIS 3.28.11 -ohjelmistoa ja ohjeena Daniel Coen QGIS-versiota (s.a.) Olsonin ym. (2014) REM-metodista (kuva 4). Rajasin korkeusmallin Msimbazi-joen valuma-alueen mukaiseksi. Seuraavaksi visualisoin korkeusmallin värityksen ja rinnevarjosteen avulla niin, että pääuoma erottui siitä selkeästi. Digoitin uoman keskilinjan viivamuotoiseksi vektoritasoksi aloittaen kaupungin reunalta, sillä metsässä kulkeva osuus ei ollut relevantti tutkimukseni kannalta. QChainage-työkalulla muutin keskilinjan viivasta pistemuotoiseksi ketjuksi, jossa pisteet sijaitsivat 15 metrin päässä toisistaan. Valitsin pisteiden etäisyyden uoman leveyden perusteella, joka tutkimuskohteessa vaihteli 10–40 metrin välillä. Lisäsin pisteille korkeustiedon korkeusmallista Point Sampling tool -työkalulla. Interpoloin pisteistä laakson kaltevuutta vastaavan pinnan käänteisen etäisyyden menetelmällä (IDW, Inverse Distance Weighted). Tämän jälkeen vähensin alkuperäisen korkeusmallin korkeusarvoista interpoloidun pinnan korkeusarvot, jolloin sain tulokseksi suhteellisen korkeusmallin.



Kuva 4. Suhteellisen korkeusmallin tuottamisen päävaiheet.

Muutin rasterimuotoisen suhteellisen korkeusmallin vektoritasoksi, jonka eri polygonit ilmaisivat eri tulvakorkeuksia, jotta tulvalaajuuksien visuaalinen tarkastelu olisi helpompaa. Paikallisten joukkoistettua kartoitukseen osallistuneiden henkilöiden mukaan tulvaherkällä alueella tulvakorkeus vaihtelee 0,5 ja 5 metrin välillä (The Atlas of Flood... 2016), joten päätin visualisoida vedenkorkeuksia viiteen metriin asti. Tein tämän luomalla ensin rasteritason niistä suhteellisen korkeusmallin rastereista, joiden arvo on alle 5 käyttäen rasterilaskin-työkalua. Muutin saadun rasteritason vektoritasoksi ja siivosin saatua tasoa ja tein sen reunoista pyöristetyimmät tasoita-työkalulla. Toistin tämän prosessin 3,5 m, 2 m, 1 m ja 0,5 m korkeuksille ja lopuksi yhdistin vektoritasot yhdeksi Tulvaskenaariot-karttatasoksi.

4.2.2 Uoman ja asutuksen muutosten digitointi ja tunnistaminen

Valitsin tarkempaan tarkasteluun kaksi joen osuutta sekä niitä ympäröivää asutusta alueelta, joka on suhteellisen korkeusmallin mukaan altis tulville. Valitsin yhden osuuden joen yläjuoksulta ja toisen alajuoksulta, koska oletin niiden olevan erityyppisiä. Aiemman tutkimuksen (Izdori ym. 2022) sekä teorian (Wolman 1967) mukaan joen yläjuoksulla tapahtuu enemmän kiintoaineen eroosiota kuin kasaantumista, kun taas alajuoksulla sedimenttiä kasaantuu enemmän kuin erodoituu ja tulvariski on suurempi. Lisäksi alajuoksun osuus on lähempänä kaupungin keskustaa ja yläjuoksun alue kaupungin laidalla, joten oletettavasti myös asutuksessa olisi eroja.

Tutkittavien kohteiden havainnoimiseksi käytin visuaalisen kuvantulkinnan menetelmää, jossa kohteita ja niiden ominaisuuksia tulkitaan silmämääräisesti systemaattisella tavalla. Hyödynsin kuvantulkinnassa sekä normaali- että väärävärivisualisointeja, sillä kuvan eri elementit, kuten jokiuoma ja rakennusten katot erottuivat niissä eri tavoin. Visuaalisessa kuvantulkinnassa tarkastellaan elementtien väriä, muotoa, kuviota, tekstuuria, varjoja ja suhdetta muihin elementteihin (Fundamentals of Remote Sensing s.a.: 144).

Havainnollistaakseni uoman sijainnin muutoksia digitoin yläjuoksun osuudelta vuosien 2013, 2016, 2019 ja 2022 satelliittikuvista uoman keskilinjan tai oletetun syvimmän kohdan viivamuotoiseksi karttaelementiksi. Toistin saman prosessin alajuoksun alueella käyttäen vuosien 2013, 2016, 2018 ja 2022 kuvia. Tarkastelin digitoitujen keskilinjojen avulla sitä, kuinka paljon uoma on siirtynyt vuosien välillä. Lisäksi tarkastelin uoman muita ominaisuuksia, kuten leveyttä ja maanpeitettä. Merkitsin ylös vuosien välisiä muutoksia ja otin näistä kuvia. Pyrin kiinnittämään huomiota sellaisiin uoman kohtiin, joissa oli tapahtunut merkittäviä muutoksia. Lisäksi tein havaintoja siitä, miten uoma käyttäytyy siltojen läheisyydessä.

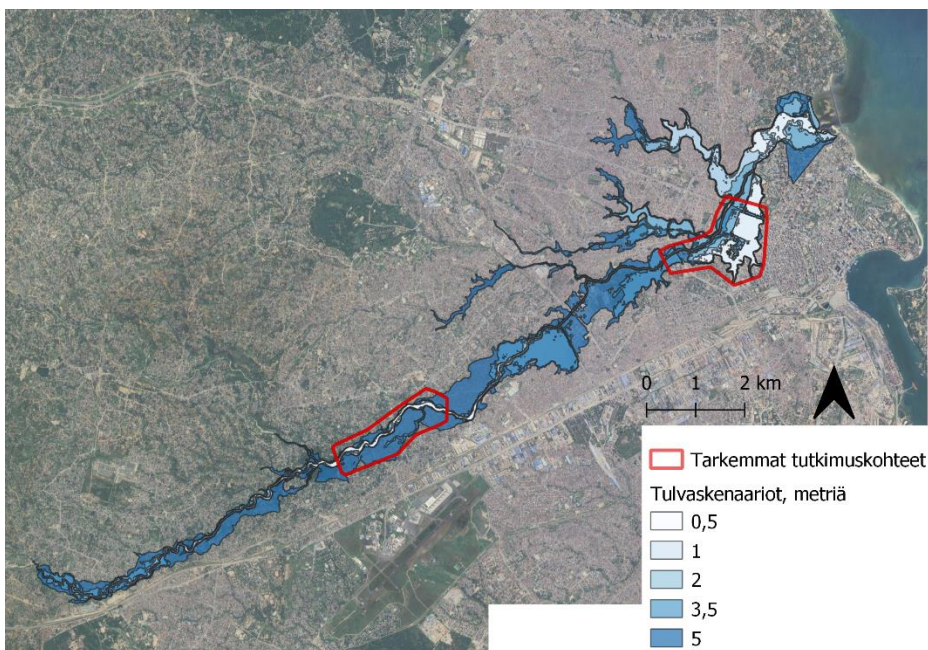
Tämän jälkeen digitoin näitä joenosuuksia reunustavilta tulvaherkiltä alueilta vuosien 2013 ja 2022 slummi-asutuksen. Slummialueet voidaan tunnistaa satelliittikuvista niiden epäsäännöllisen rakenteen, asutuksen tiheyden sekä rakennusten pienen koon perusteella (Kuffer ym. 2016: 4). Digitoimisen ohessa kiinnitin huomiota slummien geometrian muutokseen, toisin sanoen asutuksen tiheyteen, ulkonäköön ja sijoittumiseen. Käytin vektorityökaluja selvittääkseni kuinka paljon asutuksen pinta-ala on kasvanut ja toisaalta paljonko vuoden 2013 asutuksesta ei ollut asuttua enää vuonna 2022. Tein karttatasot niistä alueista, joille asutus oli kasvanut ja alueista, joilta asutus oli kadonnut vuosien 2013 ja 2022 välillä ja laskin näiden pinta-alat muutoksen alueellisen laajuuden kartoittamiseksi (Breuer & Friesen 2023: 5).

5 Tulokset

5.1 Tulvivat alueet

Suhteellisesta korkeusmallista tuotetusta karttatasosta selviää, että Msimbazi-joen tulviessa veden alle jää suuria alueita (kuva 5). Jo 50 cm vedenpinnan nousu aiheuttaa lähes kahden neliökilometrin peittymisen veden alle (taulukko 1). Viiden metrin korkuinen tulva puolestaan peittää alleen jopa 13 km². Tulvivilla alueilla on satelliittikuvan mukaan paljon asutusta.

Yläjuoksulla pienet vedenpinnan nousut eivät aiheuta suurien alueiden tulvimista, mutta 5 metrin skenaariossa veden alle peittyy huomattavan suuria alueita. Veden noustessa 3,5 metristä 5 metriin peittyy yläjuoksulla huomattavasti lisää pinta-alaa. Alajuoksulla puolestaan jo alle metrin korkuinen vedenpinnan nousu aiheuttaa suurten alueiden tulvimista, eikä tulvakorkeuden nousu tästä ylemmäs juurikaan lisää tulvivaa pinta-alaa.



Kuva 5. Msimbazi-joen tulvalaajuus eri vedenpinnan korkeuksilla. Tausta: Google Satellite.

Taulukko 1. Msimbazi-joen veden peittämien alueiden pinta-ala eri tulvakorkeuksilla.

Tulvakorkeus, m	Veden peittämän alueen pinta-ala, km ²
0,5	1,8
1	2,7
2	4,6
3,5	7,4
5	13,7

Digitoidessani alajuoksun tutkimusalueen slummeja huomasin, että säännöllistä ruutukaavaa noudattavan virallisen asutuksen ja teollisuusalueen reuna kulkee juuri 5 metrin tulvakorkeuden rajaa pitkin (kuva 6). Tulva-alttiilla alueella puolestaan sijaitsee tiivistä slummiasutusta.



Kuva 6. Virallinen asutus on rakennettu alueelle, johon 5 m tulva ei ulotu. Vapaalle maa-alueelle on rakentunut slummiasutusta. Oranssi viiva kuvastaa slummin rajaa vuonna 2013, sininen viiva 5 metrin tulvaskenaariota. Taustalla vuoden 2013 satelliittikuva (Airbus).

5.2 Asutuksen ja joen muutokset vuosina 2013–2022

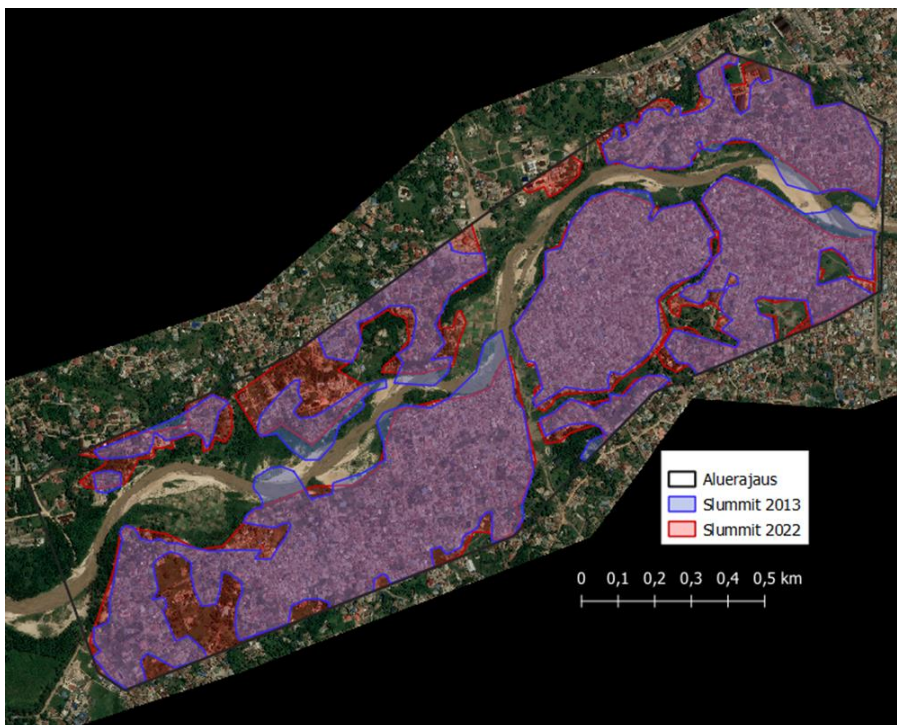
5.2.1 Asutuksen muutokset

Yläjuoksun 1,7 km² kokoisella tutkimusalueella oli slummimaista asutusta noin 0,9 km² vuonna 2013. Asutus keskittyi erityisesti joen eteläpuolelle sekä tutkimusalueen kaakkoisosaan, missä asutus oli melko tiheää. Lukuun ottamatta kaakkoista aluetta oli joen pohjoispuolen asutus huomattavasti eteläpuolta harvempaa ja rakennukset ovat suurempia. Näiden alueiden luokittelu slummiksi ei olekaan täysin yksiselitteistä. Asutusta sijaitsi paikoittain hyvin lähellä uoma ja aivan törmän reunalla.

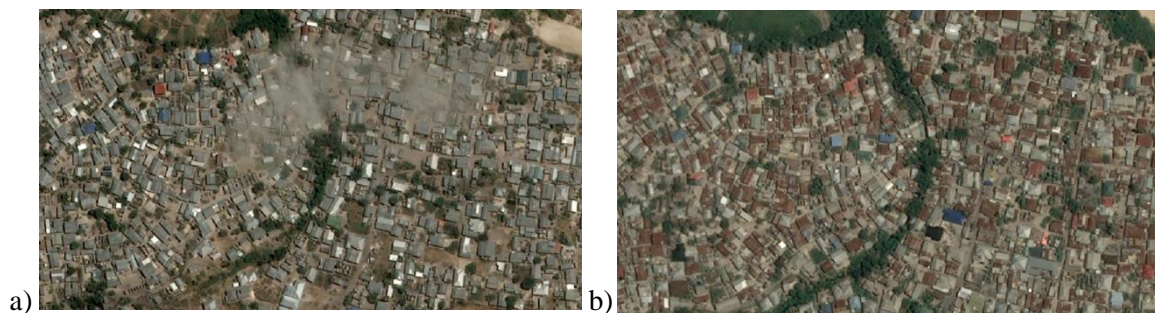
Vuonna 2022 asutus on levinnyt huomattavan paljon vuoteen 2013 verrattuna ja uutta slummialuetta olikin rakentunut 0,15 km² eli 16 % prosenttia verrattuna vuoden 2013 pinta-alaan (kuva 7). Joen eteläpuolella asutus on levinnyt erityisesti täydentämään vuoden 2013

asuinalueiden välisiä tyhjiä maa-alueita. Myös pohjoispuolella on suuria alueita, joille asutusta on levinnyt ja asutus on tiivistynyt niin paljon, että se voidaan luokitella slummiksi. Asutus kuitenkin ei vaikuta levinneen lähemmäs jokea paria kohtaa lukuun ottamatta. Lisäksi asutus muuttui tiiviimmäksi ja vuoden 2013 kuvassa raunioina olleita rakennuksia oli korjattu vuoteen 2022 mennessä (kuva 8).

Tutkimusalueella on myös huomattavan paljon alueita, joilla oli asutusta vuonna 2013, mutta ei enää vuonna 2022. Vuonna 2013 asutetusta pinta-alasta 0,09 km² eli 10 % ei ollut asutettua vuonna 2022. Suurin osa näistä alueista sijaitsi aivan joen vieressä. Vuoden 2022 satelliittikuvassa näkyy selkeästi, että näillä alueilla joki oli muuttanut kulkuaan niin, että se kulkee nyt näiden 2013 asutettuna olleiden alueiden läpi tai ainakin on kuluttanut törmäänsä niin, että asuminen ei ole siellä enää mahdollista.



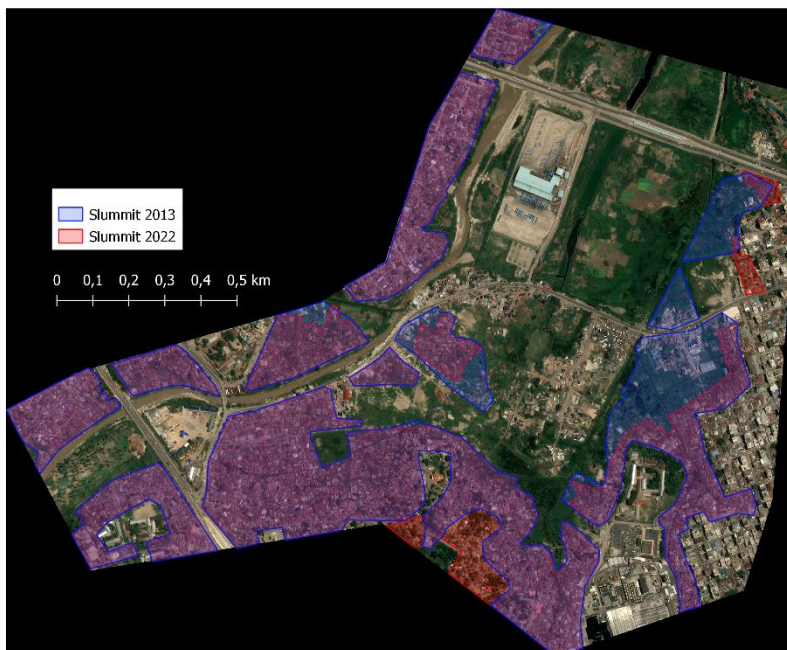
Kuva 7. Yläjuoksun asutus vuosina 2013 ja 2022. Taustalla satelliittikuva 2022.



Kuva 8. Yläjuoksulla asutus oli huomattavasti harvempaa vuonna 2013 (a) kuin vuonna 2022 (b).

Alajuoksun 2,2 km² kokoisesta tutkimusalueesta oli slummiasutusta noin 0,8 km² vuonna 2013. Tutkimuskohde on pinnanmuodoltaan erityisesti joen eteläpuolella alavaa, ja pienetkin tulvat ulottuvat kauas joesta. Joen molemmin puolin on vuonna 2013 laajoja yhtenäisiä ja tiheästi rakennettuja slummialueita, joista osa sijaitsi hyvinkin lähellä jokea. Alueella sijaitsevalla joukkoliikenteen terminaalialueella ei ole asutusta.

Vuoteen 2013 verrattuna ovat jotkin kauempana joesta sijaitsevat slummit levittäytyneet uusille alueille vuoden 2022 kuvassa (kuva 9). Uutta pinta-alaa on kuitenkin vain 0,04 km². Sen sijaan vuoden 2022 kuvassa näkyy, että melko suuri osa vuoden 2013 slummialueista on hävinnyt tai muuttunut asuinkelvottoman näköiseksi ja niistä on jäljellä vain yksittäisiä rakennuksia ja raunioita. Alueita, joita en luokitellut tiheäksi slummiasutukseksi enää vuoden 2022 kuvassa on 0,14 km², toisin sanoen 17 % vuoden 2013 asutuksesta on kadonnut vuoteen 2022 mennessä. Kadonneet alueet olivat melko yhtenäisiä ja sijaitsivat suurimmaksi osaksi joen eteläpuolella. Kadonneita asuinalueita oli sekä aivan joen lähellä, että yli 500 m päässä pääuomasta. Paikalleen jääneet asutusalueet olivat jo 2013 niin tiiviisti rakennettuja, ettei niissä ole tullut 2022 täydennysrakennusta talojen vähiin.



Kuva 9. Alajuoksun tutkimuskohteessa vuonna 2013 asutetuista slummialueista iso osa ei ole asutettu vuonna 2022.

5.2.2 Uoman muutokset

Yläjuoksun tutkimusalueella uoma on muuttunut silminnähden eri vuosien kuvien välillä niin maanpeitteeltään kuin muodoltaan (kuva 10). Uudemmissa kuvissa uomassa näkyy enemmän hiekkaisia särkkiä ja vähemmän kasvillisuutta ja peltoja. Uoman keskilinja on siirtynyt huomattavan paljon lähes koko tarkasteltavan osuuden matkalla. Muutokset ovat suurimpia yläjuoksulla, jossa uoman mutkittelu on kääntynyt lähes vastakkaissuuntaiseksi verrattuna aiempaan. Samoin särkkien sijainti on muuttunut. Uoma on siirtynyt paikoitellen jopa 150 metriä. Uoma on myös oikaissut yhden meanderikaarten läpi.

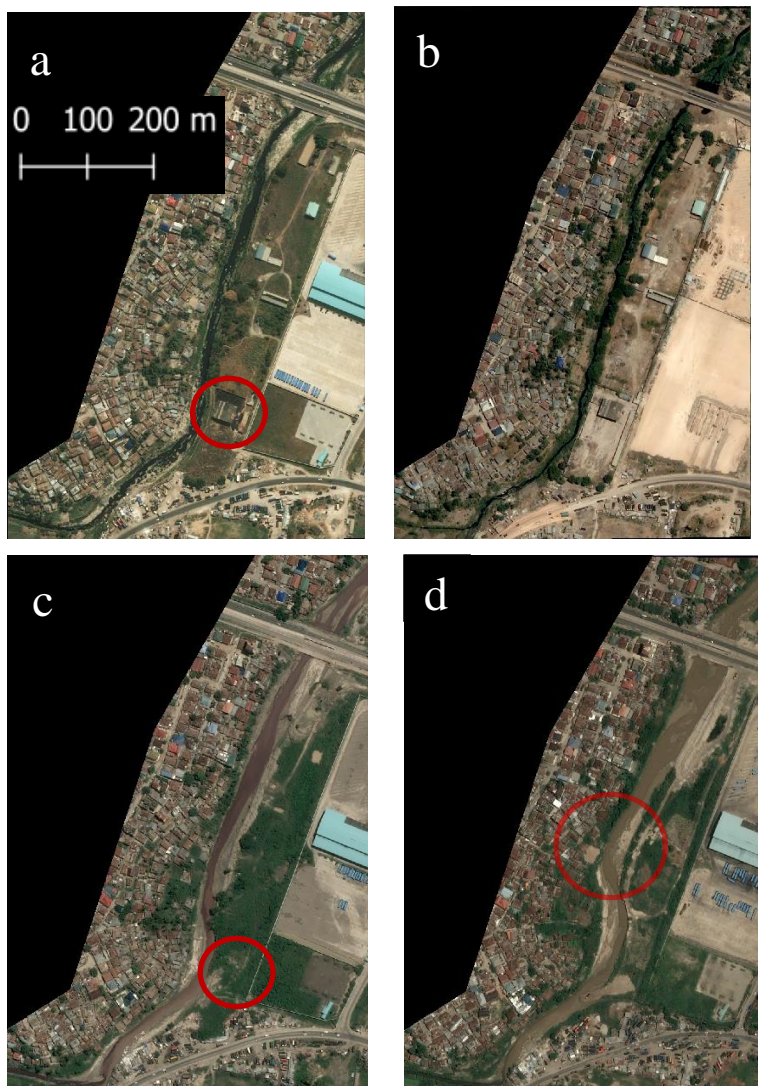
Tarkasteltaessa tarkemmin tätä yläjuoksun osuutta huomataan, että osuuden alussa on uoman poikki kulkeva tie, jossa ei ole siltaa. Tämän alapuolisella osuudella uomassa on ollut paljon viljelyä, mikä on ehkä rajoittanut tai ohjannut veden virtausta niin, että joki on lopulta oikaissut meanderikaarten läpi.



Kuva 10. Yläjuoksun tutkimusalueella on tapahtunut suuria muutoksia vuosien 2016 (a), 2019 (b) ja 2022 (c) välillä. Punainen viiva kuvastaa joen uoman keskilinjaa.

Alajuoksulla uoman sivuttaissiirtymä on ollut maltillisempaa kuin yläjuoksulla. Enimmillään uoman keskilinja on siirtynyt noin 40 metriä, mutta keskimäärin siirtymä on alle 10 metriä. Joissain kohdissa joen siirtyminen on aiheuttanut asuinalueiden tuhoa. Alajuoksulla uoma näyttää leventyneen kauttaaltaan vuosi vuodelta. Uoma on leveimmillään vuoden 2022 kuvassa, jossa veden korkeuskin on korkeimmillaan. Tässä tilanteessa on selvästi havaittavissa se, että joki on sillan kohdalla hyvin leveä, etenkin sillan yläpuolella.

Uomassa on myös havaittavissa kohta, missä uoman reunalla sijainnut suurikokoinen rakennus on purettu vuosien 2016 ja 2019 välillä ja sen jälkeen uoman mutkittelu on voimistunut (kuva 11). Voimistunut mutkittelu on johtanut joidenkin asuinrakennusten tuhoutumiseen sekä maanvyöryyn.



Kuva 11. Alajuoksulla vuoden 2013 kuvaan (a) merkitty suuri rakennus on purettu vuosien 2016 (b) ja 2019 (c) välissä. Tämän jälkeen uoman mutkittelu on voimistunut, mikä on johtanut joidenkin asuinrakennusten tuhoutumiseen vuoteen 2022 mennessä (d). Lisäksi uoma on leventynyt vuosi vuodelta.

6 Keskustelu

6.1 Globaalin etelän kaupunkijokien tulvat

Msimbazi-joki tulvii luonnostaan vuosittain sadekausien aikaan, mutta viime vuosina tulvat ovat yleistyneet ja voimistuneet (Maailmanpankki 2019). Voimistumisen taustalla vaikuttavat primäärisinä syinä ilmastonmuutoksen lisäämät rankkasateet sekä sekundaarisina syinä muutokset valuma-alueen ominaisuuksissa (Todd-Burkeley ym. 2021). Aikaisemmissa tutkimuksissa ja raporteissa (Erman ym. 2019; The atlas of flood... 2016; Maailmanpankki 2019) tulvaherkäksi alueeksi tunnistettu joen alajuoksu on myös suhteellisen korkeusmallin mukaan alue, jolle nouseva vesi leviää ensimmäisenä. Jo alle metrin nousu vedenpinnan korkeudessa saa siellä suuria alueita tulvimaan. Paikallisten mukaan jo tunnin kuluttua sateen alkamisesta veden pinta voi nousta 0,5–1 metriä (The atlas of flood... 2016), joten suuret alueet jäävät veden alle hyvin nopeasti. Tämän taustalla on jokilaakson muoto: joen alajuoksulla sijaitseva tulvatasanko on alavaa maata ja luonnontilaisena tasaisi vedenpinnan korkeuden vaihteluja (Charlton 2008). Kun alueelle kuitenkin on rakennettu, on veden nousu voimakkaampaa ja nopeampaa ja aiheuttaa suuria yhteiskunnallisia ongelmia, kuten asutuksen ja infrastruktuurin tuhoutumista.

Yläjuoksulla puolestaan pienet vedenpinnan nousut eivät aiheuta joen tulvimista laajoille alueille, sillä uoma kulkee jyrkkäreunaisemmassa ja kapeammassa kurussa kuin alajuoksulla. Tämä johtuu siitä, että yläjuoksulla sedimenttiä erodoituu enemmän kuin kasaantuu (Charlton 2008; Izdori ym. 2022). Kuitenkin veden noustessa 5 metriä normaalitason yläpuolelle voi yläjuoksullakin laajoja alueita peittyä veden alle. Erityisen tulvaherkkiä alueita ovat alajuoksun lisäksi kohdat, joissa uoman tai tulvatasangon kapasiteetti on rajoittunut (Vietz ym. 2016). Satelliittikuvista tarkastelemillani alueilla vesi näyttikin levinneen juuri siltojen kohdalla muuta jokea laajemmalle, sillä sillat rajoittivat uoman kapasiteettia.

Jokilaakson muodon ja rajoitteiden lisäksi tulvien syntyyn vaikuttavat hydrologisen kierron perusmuuttujat eli sadanta ja valunta sekä valunnan tyyppi (Vakkilainen 2016). Valunnan tyyppin määrittää se, kuinka helposti vesi läpäisee maaperän. Msimbazin valuma-alueella rakennetun pinnan määrä on kasvanut räjähdysmäisesti ja ilmakuviin perusteella sitä on myös aivan uoman reunoilla. Näin ollen suuri osa valunnasta on pintavaluntaa ja sadevesi päättyy uomaan erittäin pian sadantatilanteen jälkeen ja aiheuttaa suuria piikkejä virtaamassa (Vietz

ym. 2016; Wantzen ym. 2019). Voidaankin olettaa, että yksi merkittävä syy Msimbazi-joen tulvien yleistymiseen ja voimistumiseen on rakennetun pinta-alan kasvu ja siitä seuraava pintavalunnan osuuden lisääntyminen.

Sadannan määrä ja intensiteetti ovat tärkeimmät primääriset syyt jokien tulvimiselle (Smith & Petley 2009). Ilmastonmuutos on jo muuttanut Dar es Salaamin ilmastoa niin, että kuivat kaudet ovat aiempaa kuivempia ja sadekausien sateet intensiivisempiä ja saman kehityksen ennustetaan jatkuvan (Aardenne & Pasquini 2017; Maailmanpankki 2019). Tämä johtanee siihen, että Msimbazi-joki on kuiva pidemmän osan vuodesta, mutta toisaalta voimistuneet sateet lisäävät sekä joki- että hulevesitulvia (Maailmanpankki 2011: 28). Pienet ja keskikokoiset alajuoksun asuinalueita uhkaavat tulvat todennäköisesti yleistyvät, samoin kuin tilanteet, jolloin vesi nousee 5 metriä normaalia korkeammalle ja peittää alleen suuria alueita myös yläjuoksulla. Samalla nämä lisääntyvät virtaamapiikit voivat lisätä uoman eroosiota (Charlton 2008).

Kuten aiemmissa tutkimuksissa on todettu, Dar es Salaamissa sijaitsee slummeja vaarallisilla alueilla, joissa tulva- ja eroosioriski ovat merkittäviä (Maailmanpankki 2011; Maailmanpankki 2019). Yllättävää oli kuitenkin, kuinka selkeästi suunnitellun asutuksen raja kulki juuri 5 metrin tulvakorkeuden yläpuolella ja slummiasutus oli rakentunut aivan tämän viereen vapaalle maa-alueelle. Tämä myös on osoitus siitä, ettei kaupunkisuunnittelu ehdi vastaamaan väestöpaineeseen luomalla asuinalueita turvallisille alueille, vaan ihmiset asettuvat asumaan sinne, mihin voivat (Wantzen 2019).

Dar es Salaamin tilanne ei ole sinänsä ainutlaatuinen, vaan tulvat ovat globaalisti tuhoisin luonnonhasardi (Jongman ym. 2012). Douglas ym. (2008) kuvasivat tilannetta viidessä muussa suuressa Afrikan kaupungissa: Accrassa, Kampalassa, Lagosissa, Maputossa ja Nairobissa. Näissä tilanne oli sama kuin Dar es Salaamissa: köyhin väestönosa kärsii eniten tulvista ja paikallisella hallinnolla ei ole haluja tai resursseja reagoida tilanteeseen sen vaatimalla kiireellisyydellä. Väestönkasvun jatkuessa tulvaherkillä alueilla ja ilmastonmuutoksen muuttaessa sateita eivät tulvien aiheuttamat ongelmat ainakaan vähene, ellei niihin puututa. Näin monitahoisen ongelman ratkaisemiseksi tarvittaisiin integroivia ratkaisuja, jotka ottavat huomioon toimijatasot lokaalista globaaliin ja vaikutukset lyhyestä aikavälistä pitkään aikaväliin.

6.2 Jokuoman geometrian aiheuttamat riskit

Meandroivalle joelle ominaiseen tapaan Msimbazi-joen uoma oli siirtynyt ja mutkitellut tarkastelujakson aikana tulvatasangolla (Holden 2018). Tutkimallani alueella ihmistoiminta on kuitenkin voimakasta ja voidaan olettaa, että siitä aiheutuvat muutokset virtauksessa ja sedimentin saatavuudessa ovat vaikuttaneet uoman muotoon ja sijaintiin. Charltonin (2008) mukaan jokuoman sopeutuminen virtauksen tai sedimentin saatavuuden muutoksiin näkyy uoman leventymisenä, sivuttaissiirtymisenä, meanderikaarteiden siirtymisenä ja särkkien muutoksina. Nämä kaikki muutokset olivat havaittavissa myös Msimbazi-joessa.

Eryteisesti alajuoksulla oli selkeästi nähtävissä, että uoma leventyi vuosi vuodelta. Yläjuoksulla vastaavaa ei ollut havaittavissa. Tämä saattaa johtua siitä, että alajuoksun tutkimusalueelta tarkasteltuna sen yläpuolinen valuma-alue on ollut jo pitkään kaupunkimaista. Tällöin valuma-alueelta ei irtoa paljon kiintoainesta (Vietz ym. 2016) ja virtaava vesi alkaa kuluttaa ja kuljettaa kiintoainetta erityisesti uoman pohjalta ja reunoilta, jolloin se levenee. Kaupungistumisen jatkuessa ja erityisesti päällystetyn pinnan lisääntyessä uoman leveneminen on seikka, joka täytyy ottaa huomioon asutuksen ja infrastruktuurin sijoittumisessa. Slummiasutusta sijaitsee erittäin lähellä Msimbazi-jokea ja jos uoma jatkaa levenemistä, voi se tuhota asutusta ja infrastruktuuria, kun maata sortuu rakennelmien alta (Walsh 2005).

Yläjuoksua puolestaan leimasivat uoman sivuttaissiirtymät sekä muutokset meanderikaarteissa ja särkissä. Nämä muutokset olivat hyvin suuria ja oli ilmeistä, että joen uoman siirtyminen on tuhonnut slummiasutusta, sillä vuoden 2022 satelliittikuvissa uoma kulki kohdissa, joissa oli ollut asutusta vuonna 2013. Uoman muutokset kertovat siitä, että joen virtaus- ja kiintoaineolosuhteissa on tapahtunut muutoksia. Myös uoman luonnollisen toiminnan rajoittuminen on saattanut johtaa siihen, että eroosiota on tapahtunut toisaalla voimakkaammin (Vietz ym. 2016). Onkin mahdollista, että yläjuoksulla uoman poikki kulkenut tie ja uomassa sijainneet viljelykset ovat rajoittaneet luonnollista sedimentin ja veden liikettä. Kayitesin ym. (2019) mukaan viljellyillä alueilla pintavalunta on nopeaa ja törmän eroosio on voimakasta. Viljellyn uoman osuuden jälkeen onkin tapahtunut hyvin voimakasta törmän eroosiota, mikä on johtanut uoman oikaisuun meanderikaarten läpi.

Myös alajuoksulla näkyi, millaisia seurauksia sillä voi olla, kun ihmistoiminta rajoittaa joen luonnollista toimintaa. Lähellä joen törmää sijainnut suuri rakennus on todennäköisesti estänyt luonnollista eroosiota jossain määrin ja sen purkamisen jälkeen uoman mutkittelu on voimistunut. Kaupunkimaisen maankäytön ja uoman rajoittumisen vaikutuksia morfologialle on kuitenkin tutkittu melko vähän ainakin verrattuna tulvimiseen. Erityisen vähän tämän aiheen tutkimusta on tropiikista ja globaalista etelästä.

6.3 Slummien muutokset

Dar es Salaamin ja Msimbazin valuma-alueen räjähdysmäinen väkiluvun kasvu näkyi satelliittikuvissa slummiasutuksen laajenemisena sekä tihentymisenä, erityisesti yläjuoksun tutkimusalueella. Kuten Mkiliman (2022) tutkimuksessa todettiin, kaupunki laajenee rannikolla sijaitsevasta keskustasta ulospäin kohti sisämaata ja metsänsuojelualuetta. Alajuoksun tutkimusalue, joka sijaitsee lähellä keskustaa, on siis ollut kaeummin asuttuna kuin yläjuoksun tutkimusalue.

Sen lisäksi että asutus oli levinnyt ja tiivistynyt vuosien 2013 ja 2022 välillä, molemmilla tutkimusalueilla oli myös kohtia, joilla oli ollut asuinrakennuksia vuonna 2013, mutta ei enää vuonna 2022. Yläjuoksun tutkimusalueella asutuksen poistumisen syynä on selvästi uoman liike, sillä vuoden 2022 satelliittikuvissa uoma kulki kohdissa, joissa oli 2013 ollut asutusta. Tutkimuksissa on todettu, että ihmistoiminta voi lisätä uoman eroosiota ja näin tuhota joen törmällä sijaitsevia rakennuksia ja infrastruktuuria (Wolman 1967; Walsh ym. 2005). Aihetta on tutkittu kuitenkin hyvin vähän jokien varsilla sijaitsevien slummien näkökulmasta. Lisäksi tutkitut joet ovat yleisesti ottaen hyvin erityyppisiä kuin Msimbazi, kuten esimerkiksi Kummun ym. (2008) tutkima suurjoki Mekong.

Alajuoksulla hylätyn näköisiä asuinalueita oli myös kauempana pääuomasta, joten syynä ei voinut suoraan olla joen uoman liike ja törmäeroosio. Alue on tulville herkkää, joten rakennukset ovat voineet tuhoutua tai tulla hylätyksi tulvien takia. Taustalla voi olla myös jokin muu syy, joka ei ole johdu suoraan joesta. Esimerkiksi paikalliset viranomaiset ovat ajoittain häätäneet slummien asukkaita pois kodeistaan ja purkaneet rakennuksia ja toisaalta nykyisin kannustavat asukkaita muuttamaan pois alueelta (Maailmanpankki 2019). Vaikka kummallakaan tarkastelemallani alueella asutus ei näyttänyt suoranaisesti siirtyneen

lähemmäksi jokea, joen aiheuttamat tuhot ovat selvästi vaikuttaneet ihmisten elämään alueella ja asutus jatkaa leviämistä myös vaarallisille alueille yläjuoksulla.

6.4 Tutkimuksen rajoitteet ja mahdollinen tarve jatkotutkimukselle

Tässä tutkimuksessa on paljon rajoitteita, jotka johtuvat niin käytettävissä olleesta aineistosta ja menetelmistä, kuin tutkielman laajuudesta ja omasta positioistani. Tuottamani suhteellinen korkeusmalli ei kerro koko totuutta siitä, miten virtaava vesi peittää maa-alueita todellisessa tulvatilanteessa tai kuinka nopeasti vesi virtaa eri kohdissa. Hydraulisen mallin avulla voitaisiin tarkemmin kartoittaa tulville ja eroosiolle herkkiä alueita. Käyttämäni korkeusmallin tuottamisesta oli myös niukasti tietoa saatavilla, enkä tiedäkään tarkalleen mikä vedenkorkeus ilmalentojen aikana oli. Aineistoa tarkastellessa vaikutti kuitenkin siltä, että vesitilanne oli hyvin matala tai uoma jopa kuiva. Lisäksi käyttämäni satelliittiaineiston puutteellinen kattavuus aiheutti sen, että en voinut valita joka tarkasteluajankohdalle kuvaa kuivan kauden lopusta. Tämän lisäksi käyttämäni visuaaliseen kuvantulkintaan liittyä aina väärintulkinnan vaara – kaukokartoitusmenetelmät vaatisivat rinnalleen muita menetelmiä, jotta ne olisivat luotettavampia. Kaukokartoituksen avulla ei voi esimerkiksi tunnistaa, onko jokin rakennus oikeasti asutettu vai ei. Lisäksi en pysty sanomaan, mikä on ollut asukkaiden syy jättää alue – onko tulvimisesta tullut liian vaarallista vai onko asukkaat hädetty pois kodeistaan? Tähän liittyy myös tutkielman laajuus ja oma positioni; ilmiön tarkastelunäkökulma on hyvin rajallinen eikä pysty huomioimaan kaikkia ilmiöön vaikuttavia seikkoja.

Koska kaupunkiväestön ennustetaan kasvavan myös tulevaisuudessa sekä Dar es Salaamissa että koko globaalissa etelässä, olisi tärkeää jatkaa sekä Msimbazin että muiden kaupunkijokien ja slummien tutkimusta. Aihe on merkityksellinen, sillä sekä tulvat että uoman muutokset uhkaavat miljoonia ihmisiä. Erityisesti eroosion aiheuttamiin ongelmiin tulisi keskittyä enemmän, kuten Trimble jos vuonna 1997 totesi, sillä uoman eroosio voi itsessään aiheuttaa asutuksen tuhoa. Ilmastonmuutoksen voimistaessa kaupunkijokien ongelmia ja virtaamia on mahdollista, että eroosiosta tulee vielä nykyistä suurempi ongelma.

Msimbazi-joen hydromorfologisen jatkotutkimuksen kannalta olisi oleellista perustaa kattava mittausverkosto sen virtaaman seuraamiseksi. Sen avulla voitaisiin tutkia tarkemmin sitä,

miten joen eri osuudet reagoivat sadantaan. Aikasarjan kertyessä voitaisiin tarkastella myös sitä, miten joen virtaus muuttuu kaupungistumisen edetessä sekä ilmaston muuttuessa. Virtaamatietojen avulla voitaisiin mahdollisesti parantaa mahdollisuuksia varoittaa slummien asukkaita tulvista ja eroosiosta.

Sen selvittämiseksi, miten kaupungistuminen todellisuudessa vaikuttaa virtaamiin ja uoman morfologiaan, tulisi verrata joen ominaisuuksia ennen ja jälkeen kaupungistumisen esimerkiksi vanhojen tietojen tai satelliittikuvien perusteella. Toinen tapa olisi verrata Msimbazi-jokea vastaavankokoiseen, lähellä sijaitsevaan luonnontilaiseen valuma-alueeseen. Tämän tutkimuksen avulla saataisiin lisää arvokasta tietoa siitä, miten troopiikin joet reagoivat maankäytön muutoksiin.

Jos haluttaisiin tutkia, mikä kaikki vaikuttaa Msimbazi-joen tulvimiseen ja eroosioon, olisivat erilaiset kenttämittaukset ja -havainnot välttämättömiä. Edes hyvin korkearesoluutioisen kaukokartoitusaineiston avulla ei ole mahdollista tunnistaa kaikkia fyysisiä elementtejä, jotka vaikuttavat joen virtaukseen. Esimerkiksi joessa tai sen törmillä olevaa yhteiskuntajätettä ei pystynyt erottamaan kuvista, eikä myöskään eroosiosuojia, joita kirjallisuuden mukaan on käytetty eroosion ehkäisemiseksi Msimbazi-joen rannoilla (Maailmanpankki 2019). Yhteiskuntajätteen muodostamat tukokset voivatkin aiheuttaa tulvia aivan eri alueilla kuin mihin suhteelliseen korkeusmalliin perustuvat tulvaskenaariot tai hydrologiset mallinnukset voivat ennustaa.

Tulvien aiheuttaman eroosionopeuden selvittämiseksi olisi kiinnostavaa tarkastella esimerkiksi kaukokartoituksen avulla, kuinka suuria muutoksia uomassa tapahtuu yksittäisen tulvan tai sadekauden aikana. Tämä vaatisi satelliittikuvien temporaalisen resoluution paranemista tai toistuvia kenttämittauksia. Muutosnopeuden selvittäminen olisi kuitenkin tärkeää, jotta vaarassa olevia alueita voitaisiin evakuoida ajoissa.

Jotta voitaisiin ymmärtää muutoksia joen varren slummi-asutuksessa, tulisi tätä ilmiötä tutkia myös ihmismaantieteellisestä näkökulmasta. Kaupunkiväestön kasvaessa olisi tärkeää ymmärtää syitä sille, mikä saa ihmiset asumaan näillä vaarallisilla alueilla. Esimerkiksi haastattelumenetelmin voisi selvittää, miksi ihmiset ovat asettuneet asumaan tietyille alueille ja ovatko he tällöin olleet tietoisia joen aiheuttamista riskeistä, sekä miten he varautuvat esimerkiksi tulviin tai eroosioon. Lisäksi olisi tärkeä selvittää, mikä saa asukkaat jäämään näille alueille tai kokevatko he ylipäättään, että muuttaminen olisi mahdollista ja onko

esimerkiksi Maailmanpankin kehitysprojektista ollut apua vaihtoehtoisen asutuksen löytämiseen (Maailmanpankki 2019).

7 Johtopäätökset

Tässä tutkimuksessa tutkittiin, millaisia hydromorfologisia riskejä Dar es Salaamin läpi virtaava Msimbazi-joki aiheuttaa sen lähellä sijaitseville asuinalueille. Tutkimuksessa hyödynnettiin kahdenlaista kaukokartoitusaineistoa. Digitaalisen korkeusmallin avulla tuotettiin suhteellinen korkeusmalli, josta selvisi millä alueilla Msimbazi-joen tulvat ovat todennäköisimpiä. Sitä, miten joen uoman sekä sen lähellä sijaitseva asutus on muuttunut vuosien 2013 ja 2022 välillä, tarkasteltiin käyttäen korkearesoluutioisia satelliittikuvia.

Tutkimuksessa selvisi, että Msimbazi-joen alajuoksun alavat alueet ovat eniten alttiita joen tulville. Tällä alueella jo alle metrin nousu vedenpinnassa saa suuria alueita tulvimaan. Tällaisia tulvia syntyy hyvin nopeasti sateen alkamisen jälkeen ja ilmastonmuutoksen lisätessä rankkasateita ovat tulvat jatkuvasti yleisempiä. Tällä tulville herkällä alueella asuu myös paljon ihmisiä ja ihmistoiminta todennäköisesti voimistaa tulvia.

Joen uoma oli muuttunut vuosien 2013 ja 2022 välillä paikoitellen leveämmäksi ja lisäksi sen kulkureitti oli muuttunut. Erityisesti joen alajuoksulla uoma oli leventynyt vuosien välillä ja yläjuoksulla puolestaan uoman kulkureitti oli muuttunut. Yläjuoksulla tapahtunut joen meanderointi ja uoman oikaisu yhden meanderikaarteen läpi oli johtanut siihen, että joki kulki uudemmissa kuvissa aiemmin asutettuna olleiden alueiden yli.

Asutus joen tulville ja törmäeroosiolle alttiilla alueilla oli muuttunut vuosien 2013 ja 2022 välillä. Uoman meanderointi ja leventyminen asutetuilla alueilla johti siihen, että osa vuonna 2013 asutetuista alueista jäi joen alle ja asukkaiden on täytynyt siirtyä muualle. Lisäksi alajuoksun tutkimusalueella myös kauempana joesta oli alueita, joilla asukkaat olivat joutuneet jättämään kotinsa todennäköisesti tulvien takia. Toisaalta kaupungin laajeneminen näkyi siinä, että slummimainen asutus oli myös tiivistynyt tutkituilla alueilla ja levinnyt uusille alueille.

Lähteet

- Aardenne, L. van & Pasquini, L. (2017). Dar es Salaam climate profile. University of Cape Town.
- Breuer, J. H. P., & Friesen, J. (2023). Methods to assess spatio-temporal changes of slum populations. *Cities* 143. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104582>
- Charlton, Ro. (2008). *Fundamentals of fluvial geomorphology*. 234 s. Routledge, Abingdon.
- Chin, A. (2006). Urban transformation of river landscapes in a global context. *Geomorphology* 7(3–4) 460–487. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.033>
- Coe, D. (s.a.). Creating REMs in QGIS with the IDW method. <https://dancoecarto.com/creating-rems-in-qgis-the-idw-method> 16.3.2024
- Coeurdevey, L. & Fernandez, K. (2012). Pléiades imagery – user guide. Airbus Defence and Space Intelligence, France. https://storage.googleapis.com/p-oaf-ibe-back-00e-strapi-uploads/210415_Airbus_Pleiades_Imagery_user_guide_be12b8f35b/210415_Airbus_Pleiades_Imagery_user_guide_be12b8f35b.pdf 22.4.2024
- COWI (2017). Flood mitigation in the Msimbazi valley – Data collection report, Dar es Salaam.
- Dar es Salaam climate normals 1991–2020. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Maryland 2020.
- Dar es Salaam digital terrain model, 5m (2017). <https://geonode.resilienceacademy.ac.tz/catalogue/uuid/2ea8def9-5c90-4872-af5b-bcd68c11c2b0>
- Dar es Salaam, Tanzania. (s.a.). C40 Cities. <https://www.c40.org/cities/dar-es-salaam/>. 6.5.2024
- Das, T. K., Haldar, S. K., Gupta, I. D. & Sen, S. (2014). River bank erosion induced human displacement and its consequences. *Living Reviews in Landscape Research* 8(3). <http://dx.doi.org/10.12942/lrlr-2014-3>
- Douglas, I., Alam, K., Maghenda, M., McDonnell, Y., Mclean, L., & Campbell, J. (2008). Unjust waters: climate change, flooding and the urban poor in Africa. *Environment and Urbanization* 20(1) 187–205. <https://doi.org/10.1177/0956247808089156>
- Erman, A., Tariverdi, M., Xiaomeng, M. O., Rose, C., Vincent, C., Malgioglio, S., Rentschler, J., Hallegatte, S., & Yoshida, N. (2019). Wading out the storm. The role of poverty in exposure, vulnerability and resilience to floods in Dar es Salaam. World Bank Policy Research working paper. Washington.

- Fundamentals of remote sensing (s.a.) Canada Centre for Remote Sensing. <<https://natural-resources.canada.ca/maps-tools-and-publications/satellite-imagery-and-air-photos/tutorial-fundamentals-remote-sensing/9309>>
- Greco, S. E., Girvetz, E. H., Larsen, E. W., Mann, J. P., Tuil, J. L., & Lowney, C. (2008). Relative elevation topographic surface modelling of a large alluvial river floodplain and applications for the study and management of riparian landscapes. *Landscape Research* 33(4) 461–486. <https://doi.org/10.1080/01426390801949149>
- Gregory, K. J., & Chin, A. (2002). Urban stream channel hazards. *Area* 34(3) 312–321. <https://doi.org/10.1111/1475-4762.00085>
- Habitat III Issue Papers 22 - Informal settlements (2016). United Nations Conference on Housing and Sustainable Urban Development. Quito. <https://habitat3.org/wp-content/uploads/Habitat-III-Issue-Paper-22_Informal-Settlements-2.0.pdf>
- Harris, R. (2009). Slums. *Teoksessa Kitchin R. & Thrift, N. (toim.): International Encyclopedia of Human Geography* 157–162. Elsevier, Amsterdam. <https://doi.org/10.1016/B978-008044910-4.01079-8>
- Holden, J. (2018). *An introduction to physical geography and the environment*. 4. p., 810 s. Harlow: Pearson Education, Limited, Essex.
- Hooli, L. J. (2016). Resilience of the poorest: coping strategies and indigenous knowledge of living with the floods in Northern Namibia. *Regional Environmental Change* 16(3) 695–707. <https://doi.org/10.1007/s10113-015-0782-5>
- Izdori, F., Alexander, A., Mulungu, D., & Mugisha, L. (2022). Assessing morphological changes of the Msimbazi river using satellite images. *Tanzania Journal of Engineering and Technology* 41(4) 15–23. <https://doi.org/10.52339/tjet.v41i4.871>
- JBA. (2021). Geomorphology & hydromorphology. <<https://www.jbaconsulting.ie/GeomorphologyAndHydromorphology>> 15.3.2024
- Jha, A. K. & Lamond, J. (2012). Cities and flooding: a guide to integrated urban flood risk management for the 21st century. Maailmanpankki, Washington. <<http://hdl.handle.net/10986/2241>>
- Jongman, B., Ward, P. J. & Aerts, J. C. J. H. (2012). Global exposure to river and coastal flooding: Long term trends and changes. *Global Environmental Change* 22(4) 823–835. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.07.004>
- Kam, P. M., Aznar-Siguan, G., Schewe, J., Milano L., Ginnetti, J., Willner, S., McCaughney, J. W. & Bresch, D. N. (2021). Global warming and population change both heighten

- future risk of human displacement due to river floods. *Environmental Research Letters* 16(4). <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/abd26c>
- Kayitesi, N. M., Guzha, A. C., & Mariethoz, G. (2022). Impacts of land use land cover change and climate change on river hydro-morphology. *Journal of Hydrology* 615. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128702>
- Kijazi, A. L., & Reason, C. J. C. (2005). Relationships between intraseasonal rainfall variability of coastal Tanzania and ENSO. *Theoretical and Applied Climatology* 82(3–4) 153–176. <https://doi.org/10.1007/s00704-005-0129-0>
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B. & Rubel, F. (2006) World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift* 15(3) 259–263. <https://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- Kuffer, M., Pfeffer, K., & Sliuzas, R. (2016). Slums from space – 15 years of slum mapping using remote sensing. *Remote Sensing* 8(6). <https://doi.org/10.3390/rs8060455>
- Kummu, M., Lu, X. X., Rasphone, A., Sarkkula, J., & Koponen, J. (2008). Riverbank changes along the Mekong river: Remote sensing detection in the Vientiane-Nong Khai area. *Quaternary International* 186(1) 100–112. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2007.10.015>
- Leopold, L. B., Wolman, M. G., Miller, J. P., & Wohl, E. E. (2020). *Fluvial processes in geomorphology*. 2. p 544 s. Courier Dover Publications, New York.
- Li, X., Stringer, L. C., & Dallimer, M. (2021). The spatial and temporal characteristics of urban heat island intensity: Implications for East Africa’s urban development. *Climate* 9(4). <https://doi.org/10.3390/cli9040051>
- Lindgren, S. (2022). Missä ovat maailman suurimmat slummit? Viisi vastausta maailman slummeista. *Kehitys* 26.4.2022. <https://kehityspehti.fi/missa-ovat-maailman-suurimmat-slummit/>
- Maailmanpankki (2011). Urban Poverty & Climate Change in Dar es Salaam, Tanzania: A case study. <https://start.org/publication/urban-poverty-and-climate-change-in-dar-es-salaam-tanzania-a-case-study/>
- Maailmanpankki (2019). strategy and management framework transforming the Msimbazi basin into a beacon of urban resilience. Washington D.C.
- Maailmanpankki (2022). Project appraisal document for Msimbazi basin.

- Mahabir, R., Crooks, A., Croitoru, A., & Agouris, P. (2016). The study of slums as social and physical constructs. *Regional Studies, Regional Science* 3(1) 399–419.
<https://doi.org/10.1080/21681376.2016.1229130>
- Malavoi, J.-R. & Bravard, J.-P. (2010). River hydromorphology: A primer. Université de Lyon. <<https://professionnels.ofb.fr/en/node/736>> 15.3.2024
- Marcotullio, P. J., Keßler, C., Quintero Gonzalez, R., & Schmeltz, M. (2021). Urban growth and heat in tropical climates. *Frontiers in Ecology and Evolution* 9.
<https://doi.org/10.3389/fevo.2021.616626>
- Mkilima, T. (2022). Mapping of land use changes in urban catchments. A case of Msimbazi catchment in Dar es Salaam, Tanzania. *Journal of Water Resources, Engineering, Management and Policy* 1(1) 1–17. <https://doi.org/10.56542/mow.jwempo.ac.tz>
- Oksanen, J., Sirkiä, O., Ahonen, T., Ilves, R., Pyysalo, U. & Ahokas, E. (2016) Kansallisen maastotietokannan laatumalli: Korkeusmallit. Maanmittauslaitos, Helsinki.
- Olson, P. L., Legg, N. T., Abbe, T. B., Reinhart, M. A., Radloff, J.K. (2014). A methodology for delineating planning-level channel migration zones. 83 s. Washington State Department of Ecology Publication. Olympia, Washington.
- Saji, N. H., Goswami, B. N., Vinayachandran, P. N., & Yamagata, T. (1999). A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature* 401 360–363.
- Sakijege, T., Lupala, J., & Sheuya, S. (2012). Flooding, flood risks and coping strategies in urban informal residential areas: The case of Keko Machungwa, Dar es Salaam, Tanzania. *Jàmá: Journal of Disaster Risk Studies* 4(1).
<https://doi.org/10.4102/jamba.v4i1.46>
- Santillan, J.R., Amora, A.M., Makinano-Santillan, M., Gingo, A.L., Marqueso, J.T. (2019). Analyzing the impacts of land cover change to the hydrologic and hydraulic behaviours of the Philippines' third largest river basin. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 3(1) 41–48.
<https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-3-W1-41-2019>.
- Smith, K. & Petley, D. N. (2013). *Environmental hazards*. 5. p. 383 s. Taylor and Francis, Oxford.
- Tamminen, L. (2016). Arjen vaarallisuus, vaaran arkisuus – naisten pelon maantiedettä Nairobín slummeissa. Pro gradu -tutkielma. Helsingin yliopisto, geotieteiden ja maantieteen laitos. 79 s. <<https://core.ac.uk/download/pdf/78562952.pdf>>

- Tanzania in figures 2022. Tanzania National Bureau of Statistics. 117 s. Dodoma.
 <<https://www.nbs.go.tz/index.php/en/tanzania-in-figures/891-tanzania-in-figures-2022>>
- Tellman, B., Sullivan, J. A., Kuhn, C., Kettner, A. J., Doyle, C. S., Brakenridge, G. R., Erickson, T. A., & Slayback, D. A. (2021). Satellite imaging reveals increased proportion of population exposed to floods. *Nature*, 596(7870) 80–86.
<https://doi.org/10.1038/s41586-021-03695-w>
- Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F. W., Dutta, D., & Kim, S. (2017). Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental Modelling & Software* 90 201–216.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.006>
- The atlas of flood resilience in Dar es Salaam. (2016). Ramani Huria.
 <<https://ramanihuria.org/en/data-3/#symple-tab-atlas>> 5.4.2024
- Todd-Burkeley, N., Halwyn, A., Wem, C., Ing, R., & Hemsworth, M. (2021). Understanding river channel sensitivity to geomorphological changes. Flood and Coastal Erosion Risk Management (FCERM) research reports. Environment Agency, Bristol.
 <<http://evidence.environment-agency.gov.uk/FCERM/en/Default/FCRM.aspx>>
- Trimble, S. W. (1997). Contribution of stream channel erosion to sediment yield from an urbanizing watershed. *Science* 278(5342) 1442–1444.
<https://doi.org/10.1126/science.278.5342.1442>
- UN Habitat (2006). State of the world's cities 2006/2007. Yhdistyneet kansakunnat. Nairobi, Kenia.
- UN Habitat (2022). World cities report 2022: Envisaging the future of cities. United Nations Human Settlements Programme. Yhdistyneet kansakunnat. Nairobi, Kenia.
- Vakkilainen, P. (2016). Hydrologian perusteita. *Teoksessa* Paasonen-Kivekäs, M., Peltomaa, R., Vakkilainen, P. & Äijö, H. (toim.): Maan vesi- ja ravinnetalous 2. p., 73–129. Salaojayhdistys, Helsinki.
- Valimba, P., & Mahé, G. (2020). Estimating flood magnitudes of ungauged urban Msimbazi river catchment in Dar es Salaam, Tanzania. *Tanzania Journal of Engineering and Technology* 39(1).
- Vietz, G. J., Walsh, C. J., & Fletcher, T. D. (2016). Urban hydrogeomorphology and the urban stream syndrome. *Progress in Physical Geography* 40(3) 480–492.
<https://doi.org/10.1177/0309133315605048>

- Walsh, C. J., Roy, A., Cottingham, P., & Groffman, P. M. (2005). The urban stream syndrome: current knowledge and the search for a cure. *Journal of the North American Benthological Society* 24(3) 706–723. doi:10.1899/0887-3593(2005)024\{0706:tussck\}2.0.co;2
- Wantzen, K. M., Alves, C. B. M., Badiane, S. D., Bala, R., Blettler, M., Callisto, M., Cao, Y., Kolb, M., Kondolf, G. M., Leite, M. F., Macedo, D. R., Mahdi, O., Neves, M., Peralta, M. E., Rotgé, V., Rueda-Delgado, G., Scharager, A., Serra-Llobet, A., Yengué, J. L., & Zingraff-Hamed, A. (2019). Urban stream and wetland restoration in the global south—a DPSIR analysis. *Sustainability (Switzerland)* 11(18). <https://doi.org/10.3390/su11184975>
- Winsemius, H.C., Verhoeven, G. & Ten Velden, C. (2018). Development of a hydrological and hydrodynamic model of the Msimbazi basin: inception report. Maailmanpankki, Washington.
<<http://documents.worldbank.org/curated/en/532691567573088477/Development-of-a-Hydrological-and-Hydrodynamic-Model-of-the-Msimbazi-Basin-Inception-Report>>
- Wolman, M. G. (1967). A cycle of sedimentation and erosion in urban river channels. *Geografiska Annaler* 49(4).
- Yu, X.; Duffy, C.J. (2018). Watershed hydrology: scientific advances and environmental assessments. *Water* 10(3) 288. <https://doi.org/10.3390/w10030288>