Tampereen yliopisto

Kristian Siermala

SEKAVIEMÄRIN YLIVUOTOJEN HALLINTAKEINOT JA TEKOÄLYN HYÖDYNTÄMINEN SEKAVIEMÄRÖINNIN OPTIMOINNISSA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Marja Palmroth
Elokuu 2023

TIIVISTELMÄ

Kristian Siermala: Sekaviemärin ylivuotojen hallintakeinot ja tekoälyn hyödyntäminen sekaviemäröinnin optimoinnissa
Methods to reduce combined sewer overflows and utilizing artificial intelligence for optimizing combined sewer network
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tekniikan ja luonnontieteiden TkK-tutkinto-ohjelma, ympäristö- ja energiatekniikka
Elokuu 2023

Sekaviemäröinti on viemäröintijärjestelmä, jossa hulevedet, kotitalouksien jätevedet ja teollisuudessa muodostuneet jätevedet johdetaan samassa viemäriputkistossa jätevedenpuhdistamolle. Rankkasateiden aikana jätevedenpuhdistamoiden puhdistuskapasiteetti voi ylittyä, jolloin tapahtuu sekaviemärien ylivuotoja (engl. combined sewer overflow). Sekaviemärin ylivuodossa osa putkistossa virtaavasta jätevedestä joudutaan laskemaan suoraan vesistöön ilman puhdistusta. Puhdistamaton jätevesi on terveysriski ihmisille ja haitallinen vesistön ekosysteemeille.

Sekaviemäreitä löytyy vanhoista kaupunkikeskustoista, joissa siirtyminen erillisviemäröintiin on haasteellista rakentamisesta aiheutuvien häiriöiden ja suurten investointikustannusten vuoksi. Tässä työssä tarkastellaan vaihtoehtoisia keinoja sekaviemärien ylivuotojen välttämiseen lisäämällä tarkkailua ja luomalla ennustemalleja ylivuotorakenteiden toiminnalle. Työn tavoite on selvittää, millaisia menetelmiä sekaviemärien ylivuotojen valvomiseen ja hallintaan voidaan käyttää, ja miten näitä menetelmiä voidaan tehostaa koneoppimisen avulla.

Vihreä infrastruktuuri ja verkoston reaaliaikainen hallinta korostuivat kirjallisuudessa lupaavimpina ratkaisuina ylivuotojen vähentämisessä. Viherpinnat, sadepuutarhat ja läpäisevät päällysteet helpottavat sekaviemärien kuormitusta vähentämällä huleveden määrää. Verkoston reaaliaikaisella hallinnalla muuttuviin sääolosuhteisiin voidaan reagoida ohjaamalla verkoston venttiileiden, porttien ja pumppujen toimintaa.

Tietokonemallien avulla sekaviemäriverkoston toimintaa voidaan simuloida toistuvuudeltaan erilaisilla sateilla. Tietoa voidaan hyödyntää viemäriverkoston hallinnassa esimerkiksi käyttämällä verkoston vapaata tilaa jäteveden säilömiseen rankkasateiden aikana. Neuroverkkojen hyödyntämistä ylivuotojen ennustamisessa on tutkittu paljon. Neuroverkkojen etuna on se, että valumaalueen fysikaalista mallia ei tarvitse muodostaa, vaan neuroverkko oppii itse luomaan tuloksia sille annetusta datasta. Neuroverkot voidaan yhdistää reaaliaikaisiin ohjausjärjestelmiin, jolloin verkostoa voidaan ohjata tarkasti ja joustavasti vallitsevan tilanteen mukaisesti. Ylivuotojen hallintakeinot yhdistettynä neuroverkkojen ennustuksiin voivat tarjota kestävän pohjan ylivuotojen hallintaan.

Avainsanat: sekaviemäröinti, sekaviemärin ylivuoto, simulaatio, neuroverkot

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 1
2. VIEMÄRÖINTI 3
2.1 Viemäriverkoston nykytilanne Suomessa 3
2.2 Sekaviemäröinti 3
2.3 Viemäröinnin mitoitus ja suunnittelu 5
2.3.1 Mitoitusperusteet 5
2.3.2 Mitoitusvirtaamat 6
3. YLIVUOTOJEN HAVAITSEMINEN, ENNUSTAMINEN JA HALLINTA 7
3.1 Käyttökelpoiset menetelmät ylivuotojen havaitsemiseen 7
3.2 Tietokonemallit 9
3.3 Neuroverkot 10
3.3.1 Long Short-Term Memory 12
3.3.2 Neuroverkkojen soveltuvuuden vertailua 14
3.4 Ylivuotojen hallintakeinot 16
4. ILMASTONMUUTOKSEN VAIKUTUKSET VIEMÄRÖINTIIN 17
5. JOHTOPÄÄTÖKSET 19
LÄHTEET 20

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ANN	engl. Artificial neural network, keinotekoinen neuroverkko
GRU	engl. The Gated Recurrent Unit
LSTM	engl. Long-Short Term Memory
MLP	engl. Multilayer perceptron
NARX	engl. Nonlinear autoregressive exogenous
NSE	engl. Nash-Sutcliffe Efficiency
RNN	engl. Recurrent neural network, takaisinkytketty neuroverkko
WNN	engl. Wavelet neural network

1. JOHDANTO

Ilmastonmuutokseen ja sen aiheuttamiin ilmiöihin on väistämättä varauduttava tulevaisuudessa. Eräs näistä ilmiöistä on kasvanut sadanta, joka tulee vaikuttamaan kuntien ja kaupunkien vesihuoltoon ja infrastruktuuriin. Kasvanut sadanta ilmenee voimistuneiden ja yleistyneiden rankkasateiden muodossa, jolloin hulevesien määrä kasvaa kaupunkiympäristössä. (Nilsen et al. 2011) Hulevesillä tarkoitetaan tässä kandidaatintyössä sade- tai sulamisvesiä, jotka kertyvät rakennetulla alueella maan pinnalle, rakennusten katoille tai muille pinnoille.

Nykyisellään hulevedet ja jätevedet ohjataan yleensä erillisiin viemäreihin, jolloin puhutaan erillisviemäröinnistä. Viemäreistä jätevesi johdetaan jätevedenpuhdistamoille ja hulevesi yleensä suoraan vesistöön. Osassa vanhoista kaupunginosista on kuitenkin edelleen käytössä sekaviemäröinti. Sekaviemäröinnillä tarkoitetaan tässä kandidaatintyössä viemäröintijärjestelmää, jossa samaan viemäriputkistoon lasketaan hulevedet, kotitalouksien jätevedet ja teollisuudesta muodostuneet jätevedet. Normaaleissa sääolosuhteissa sekaviemäröinti on toimiva ratkaisu, mutta voimakkaiden rankkasateiden aikana viemärin kapasiteetti voi ylittyä, jolloin tapahtuu ylivuotoja (Cohen & Robbins 2011, s. 99).

Sekaviemärin ylivuoto (engl. *combined sewer overflow*) syntyy, kun hule- ja jäteveden määrä ylittää sekaviemärille mitoitetun kapasiteetin. Ylivuodon aikana kaikkea viemärissä kulkevaa jätevettä ei saada johdettua jätevedenpuhdistamolle, vaan osa hule- ja jäteveden seoksesta joudutaan laskemaan vesistöön. Puhdistamaton jätevesi aiheuttaa ongelmia muun muassa lisääntyneiden terveysriskien ja näkyvän saasteen muodossa sekä vahingoittaen vesistön ekosysteemejä. (Cohen & Robbins 2011, s. 99)

Jotta sekaviemärien ylivuodolta voitaisiin välttyä, täytyy ylivuotorakenteita pystyä tarkkailemaan tehokkaasti ja riittävällä tarkkuudella. Perinteisten menetelmien kuten näköhavaintojen ja yksinkertaisten mittausten (Hofer et al. 2018) lisäksi nopea tietotekninen kehitys ja suuren datamäärän kerääminen ovat luoneet mahdollisuuden hyödyntää koneoppimisalgoritmeja ja neuroverkkoja ylivuotorakenteiden tarkkailussa (Zhang et al. 2018a).

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää, millaisia teknisiä ratkaisuja voidaan hyödyntää sekaviemärien ylivuodon valvomiseen ja hallintaan, sekä miten näitä ratkaisuja voidaan tehostaa koneoppimisalgoritmien ja neuroverkkojen avulla. Tutkimuksen aikana

etsitään vastauksia muun muassa seuraaviin tutkimuskysymyksiin: millainen on tyypillinen sekaviemärijärjestelmä, millä tavoilla sekaviemärin ylivuotoja hallitaan, miten koneoppimista ja neuroverkkoja voidaan hyödyntää ylivuotojen ennustamiseen. Tässä kandidaatintyössä perehdytään erityisesti *Long Short-Term Memory* (LSTM) neuroverkkoon ja miten tämän avulla voidaan mallintaa hydrologista dataa. Kandidaatintyö toteutetaan kirjallisuusselvityksenä hyödyntäen vertaisarvioituja tieteellisiä artikkeleita ja julkaisuja.

Luvussa 2 käsitellään viemäröintiä, viemäröinnin mitoitusta ja siihen liittyviä yleisiä periaatteita. Luku 3 keskittyy ylivuotoihin, niiden syntyyn, havaitsemiseen ja mahdollisiin hallintatoimenpiteisiin. Lisäksi käsitellään tekoälysovelluksia, joiden avulla voidaan ennustaa ylivuotojen muodostumista käytettävissä olevan datan perusteella. Ilmastonmuutos ja sen ennustetut vaikutukset viemäröintiin käsitellään luvussa 4. Lopuksi luvussa 5 esitellään yhteenvetona työn tärkeimmät johtopäätökset.

2. VIEMÄRÖINTI

Viemäröinnillä on keskeinen asema jätevesien hallinnan lisäksi myös kansanterveyden ja ympäristön suojelemisessa. Tässä luvussa käsitellään viemäröintiä yleisesti Suomessa, erilaisia viemäröintijärjestelmiä, mitoitusperiaatteita ja hulevesien hallintaa.

2.1 Viemäriverkoston nykytilanne Suomessa

Suomessa on viemäriverkostoa noin 50 000 kilometriä. Viemäriverkoston keski-ikä vaihtelee alueittain paljon, mutta esimerkiksi Helsingin Seudun Ympäristöpalvelut -kuntayhtymässä verkoston keski-ikä on noin 36 vuotta. Suurin osa vesihuoltoverkostoista on rakennettu 1950–1970-luvuilla. (Lampola & Kuikka 2018)

Nykyisillä menetelmillä viemäriverkkoja tutkitaan alle 4 % vuodessa ja saneeraustoimenpiteitä suoritetaan vain alle prosenttiin kaikista viemäriverkoista. Viemäriputkien käyttöikään ja kuntotutkimusten suorittamisen säännöllisyyteen vaikuttavat muun muassa putken ominaisuudet, ympäristötekijät kuten maaperä, kasvillisuus ja liikennekuorma, jäteveden laatu ja määrä sekä putkilinjojen läheisyydessä suoritettavat rakennus- ja kaivutyöt. (Lampola & Kuikka 2018)

2.2 Sekaviemäröinti

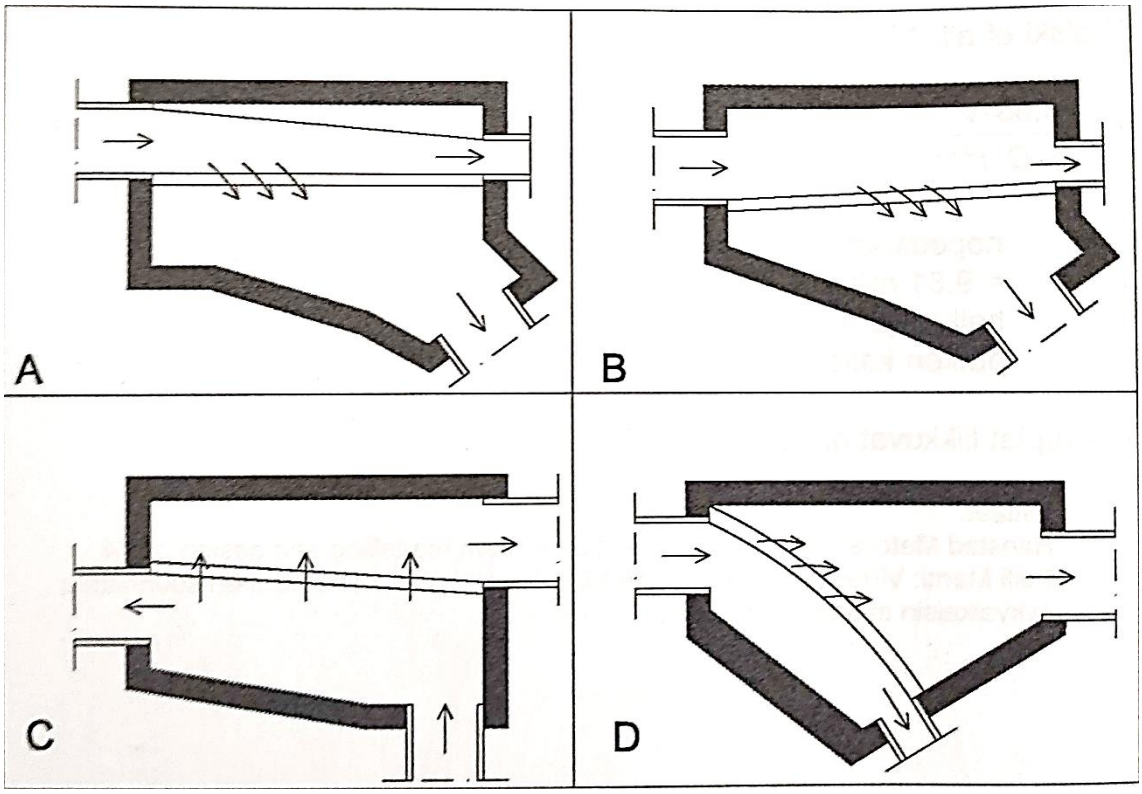
Suomessa yleisesti käytössä olevat viemäröintijärjestelmät ovat seka- ja erillisviemäröinti. Näiden kahden pääjärjestelmän lisäksi muita vähemmän käytössä olevia järjestelmiä ovat muun muassa paineellinen viemäröinti, imuviemäröinti ja kaksiputkijärjestelmä (moniputkijärjestelmä). (Karttunen 2010a, s. 116)

Sekaviemäröinnissä jätevedet ja hulevedet johdetaan samoissa putkiviemäreissä. Sekaviemäröinti on vanha viemäröintijärjestelmä, ja sen on uudisrakentamisessa korvannut erillisviemäröinti, eli jätevesien ja hulevesien johtaminen omissa viemäriverkostoissaan. Uusia sekaviemäriverkostoja ei siis enää rakenneta, mutta sekaviemäreitä löytyy edelleen varsinkin vanhoista kaupunkikeskustoista. (Hulevesiopas 2012, s. 190)

Erillisviemäröinnillä on paljon etuja verrattuna sekaviemäröintiin. Erillisviemäröinti on halvin viemäröintimenetelmä siinä tapauksessa, että hulevedet voidaan johtaa avo-ojissa. Viemäriveden puhdistuksen järjestäminen on helpompaa erillisviemäröinnissä, koska hulevedet eivät vaikuta viemäröitävän veden määrään ja laatuun. Tulvimisriski rankka-

sateiden aikana on pienempi erillisviemäröinnissä. Lisäksi erillisviemäröinti on vesiensuojelun kannalta parempi kuin sekaviemäröinti, koska puhdistamattomia jätevesiä ei juuri tarvitse johtaa vesistöihin toisin kuin sekaviemäröinnissä. (Karttunen 2010a, s. 119)

Jätevesiviemäreissä on usein ylivuotorakenteita, joilla voidaan esimerkiksi ohjata virtaamahuippuja viemäröintijärjestelmän toiseen osaan, jolloin kuormitusta saadaan tasattua. Sekaviemärien ylivuotorakenteilla rajoitetaan puhdistamolle tulevia virtaamahuippuja johtamalla osa jätevedestä ylivuotokaivon kautta suoraan purkuvesistöön. (Karttunen 2010b, s. 114) Erilaisia sijoitusmahdollisuuksia ylivuotorakenteen ylivuotokynnykselle on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Ylivuotokynnyksen sijoitusmahdollisuuksia. (Karttunen 2010b, s. 114)

Ylivuotokynnykset voidaan kuvan 1 mukaisesti jakaa toimintatapansa perusteella virtauksen suuntaisiin (A), virtaukseen nähden vinottaisiin (B), virtaukseen nähden kohtisuoriin (C) ja kaareviin (D) ylivuotokynnyksiin. (Karttunen 2010b, s. 114)

Ylivuotorakenteet on varustettava mahdollisuuksien mukaan jätevesimäärän mittauksella ja hälytysjärjestelmällä ylivuotoon liittyen. Ylivuotojen likimääräiseen seurantaan voidaan joidenkin ylivuotorakenteiden kohdalla soveltaa kalibroitua viemäriverkkomallia. Ylivuotorakenteen ylivuotokynnyksen suunnittelussa on huomioitava seuraavia perustie-

toja: virtaama- ja vedenkorkeushuippujen suurus ja todennäköisyys, putkikoot ja -kaltevuudet, padotuskorkeus ja mahdollisten tulvien aiheuttamat vahingot, puhdistamon ja pumppaamoiden kapasiteetit sekä purkuvesistö ja sen ominaisuudet. (Karttunen 2010b, s. 114–115)

2.3 Viemäröinnin mitoitus ja suunnittelu

Vesihuoltolain (2001/119) 1. luvun 1 §:n mukaan viemäröinnin keskeinen tavoite on turvata terveyden- ja ympäristönsuojelun kannalta kelvollinen viemäröinti. Vesihuoltolain lisäksi viemärivesien johtamista ja käsittelyä koskevia vaatimuksia löytyy muustakin lainsäädännöstä. Vaatimukset koskevat jäte-, kuivatus- ja hulevesien johtamista kiinteistöltä tavalla, jolla taataan kiinteistöjen rakennus- ja käyttökelpoisuus sekä asumisen terveydellisyyden ja viihtyisyyden turvaaminen (Karttunen 2010b, s. 45).

Laissa määriteltyjen vaatimusten lisäksi jätevesiviemäriverkon suunnittelussa on tärkeää huomioida muitakin tekijöitä. Viemäröinnin toimintavarmuus on saatettava teknisten ja taloudellisten mahdollisuuksien puitteissa mahdollisimman hyväksi. Viemäröinnin rakentaminen, käyttö ja kunnossapito on suoritettava tarkoituksenmukaisesti ja taloudellisesti. Olemassa olevien viemäreiden kohdalla on tavoiteltava mahdollisimman tehokas kapasiteetin käyttö. Lopuksi suunnittelun avulla on pyrittävä minimoimaan vuotovesiä, vesistöjen pilaantumista ja viemäröinnistä aiheutuvia kustannuksia. (Karttunen 2010b, s. 45)

2.3.1 Mitoitusperusteet

Viemäreiden mitoitus saa alkunsa kolmesta peruslähtökohdasta: ohjevuodesta, mitoitusvirtaamista ja vaiheittain etenevän aluerakentamisen huomioimisesta. Ohjevuosi määritetään tyypillisesti viemäriputken teknisen käyttöiän mukaan. Aluerakentaminen on tärkeää ottaa huomioon, sillä viemärin on oltava huuhtoutuva elinkaarensa alkupuolellakin. Mitoitusvirtaamien määrittely esitellään lyhyesti seuraavassa osassa 2.3.2. (Karttunen 2010b, s. 45–46) Yhdyskunnan jätevesiä koskevissa rakennusprojekteissa parhaan arvion asuinalueen jätevesien määrälle tarjoaa historialliset aineistot. Jäteveden kokonaismäärän jakaminen asukasluvulla auttaa arvioimaan jäteveden määrän kasvua suhteessa kasvavaan asukasmäärään. Jos tietoa alueen aikaisemmista jätevesimääristä ei ole saatavilla, voidaan arvioimiseen hyödyntää väliaikaisia virtausmittareita tai tietoa samankaltaisen asuinalueen jätevesimääristä. (Davis 2020)

Teollisuuden saniteetti- ja prosessijäteveden määrä määritellään ennustetun teollisuuden määrän ja laadun tai ennustettujen työpaikkojen yksikkökulutuksen perusteella. Ar-

vioitaessa teollisuusjäteveden määrää on tärkeää huomioida, kuinka suuri osa käytetystä vedestä johdetaan yleiseen viemäriin sekä onko teollisuusjätevesien määrissä normaaleja vaihteluita ja vaikuttavatko nämä vaihtelut mitoitukseen. Tämän lisäksi koska teollisuuden jätevesituotanto perustuu pääasiassa prosessiteknologiaan, on tärkeää huomioida miten tulevaisuuden muutokset prosessiteknologiassa vaikuttavat mitoitukseen. (Karttunen 2010b, s. 46)

2.3.2 Mitoitusvirtaamat

Kun ominaiskulutukseen sisällytetään teollisuuden veden käyttö, voidaan viemärin mitoituksessa käytettävä jätevesivirtaama laskea kaavalla 1:

$$Q_{jmit.} = \frac{c_{dmax} \cdot c_{hmax} \cdot P \cdot Q_{ominaisk}}{3600 \cdot 24}, \qquad (1)$$

jossa $Q_{jmit.}$ on mitoituksessa käytettävä jätevesivirtaama (l/s), *P* viemäröintialueen asukasmäärä, $Q_{ominaisk}$ ominaiskäyttö (l/as/d), c_{dmax} suurin vuorokausikäyttökerroin ja c_{hmax} suurin tuntikäyttökerroin. Sekaviemärin mitoituksessa on lisäksi huomioitava viemäriin johdettavan huleveden määrä. (Karttunen 2010b, s. 46–48)

Seka- ja erillisviemäröidyissä järjestelmissä esiintyy myös paljon vuotovesiä. Vuotovesiä voi päätyä viemäriin muun muassa pintavaluntana kaivojen yläosista, pohjavesien purkautumisena viemärin matalampaan paineeseen ja pintakerrosvaluntana vajovesivyöhykkeestä. Sade- ja sulamisvesien kasvu lisäävät pinta- ja pintakerrosvaluntaa nopeasti. (Davis 2020) Käytännön mitoitustehtävissä vuotovedet arvioidaan yleensä tiettynä prosenttilisäyksenä jätevesimääriin tai viemäripituuden perusteella. Viemäriverkon vuotovesi ilmoitetaan tavallisesti yksikössä l/s johtokilometriä kohti. Suositusarvo vuotovesille on 0,3–0,6 l/s johtokilometriä kohti. Vuotovesien määrää voidaan minimoida verkkojen ja tonttijohtojen saneerauksilla. (Karttunen 2010b, s. 47–48)

3. YLIVUOTOJEN HAVAITSEMINEN, ENNUSTAMINEN JA HALLINTA

Sekaviemärien ylivuodon hallintaan on monia erilaisia tekniikoita, jotka jakavat yhteisen tavoitteen: hallinnalla estetään puhdistamattoman jäteveden purkautumista vesistöön ja sen myötä vesistön saastumista. Jotta hallintaa voitaisiin suorittaa tehokkaasti, on ylivuotoja kyettävä havaitsemaan ja mahdollisuuksien mukaan ennustamaan asianmukaisesti.

Viemäröintijärjestelmän ohjauksen tavoitteena on johtaa jätevesi puhdistamolle mahdollisimman tasaisella virtaamalla ja tasalaatuisena. Viemärissä kulkevan veden määrän ja laadun optimointi on vaikeaa, koska virtaamaa ja laatua ei voida kontrolloida yhtä tarkasti kuin vedenjakelujärjestelmässä. Ongelmat korostuvat erityisesti sekaviemäröintijärjestelmässä, jossa jätevesien lisäksi hulevedet vaikuttavat viemäröitävän veden määrään ja laatuun. (Karttunen 2010a, s. 169)

3.1 Käyttökelpoiset menetelmät ylivuotojen havaitsemiseen

Sekaviemäriverkostoon kuuluu yleensä useita ylivuotorakenteita, minkä vuoksi koko verkoston valvonta vaatisi merkittäviä investointikuluja. Kustannustehokkaaksi ratkaisuksi on esitetty tarkkailun sijoittaminen ylivuotorakenteiden yhteyteen. (Montserrat et al. 2013) Käyttökelpoisiksi menetelmiksi ylivuotojen havaitsemiseen on kirjallisuudessa esitetty muun muassa virtausmittauksia (Leonhardt 2012), vedenpinnankorkeuden mittauksia (Leonhardt 2012, Thorndahl & Willems 2008) ja lämpötilamittareiden käyttöä (Hofer et al. 2018, Montserrat et al. 2013). Antureiden ja tunnistimien käyttö ylivuotojen seurantaan on yleistä varsinkin korkean tulotason maissa. Budjettirajoitteiden vallitessa ylivuodon määrää voidaan arvioida yhdistämällä vedenpinnankorkeuden mittaus laskennallisiin kaavoihin. (Botturi et al. 2021) Taulukkoon 1 on kerätty käytettyjä ylivuodon havaitsemismenetelmiä.

Taulukko 1. Ylivuodon tunnistusmenetelmät viemärijärjestelmässä (muokattu lähteestä Hofer et al. 2018)

Ylivuodon havaitsemismenetelmä	**Signaalityyppi**	**Ylivuototapauksen todentaminen**	**Ylivuodon kesto**	**Ylivuodon määrä**
Kiihtyvyyden havaitseminen liiketunnistimella	Binääri (0/1)	Kyllä	Kyllä	Ei
Kosteusmittaus	Binääri (0/1)	Kyllä	Kyllä	Ei
Lämpötilamittaus	Binääri (0/1)	Kyllä	Kyllä	Ei
Näköhavainnot yhdistettynä virtuaalisiin kuvamerkkeihin	Binääri (0/1)	Kyllä	Kyllä	Ei
Pintahiukkasten sijainnin muutos ajan kuluessa	Binääri (0/1)	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Sähkökytkennän oikosulku	Binääri (0/1)	Kyllä	Kyllä	Ei
Vedenlaadun mittaus	Binääri (0/1)	Kyllä	Kyllä	Ei

Reaaliaikainen seuranta luo pohjan, jonka avulla ylivuodon käyttäytymistä on mahdollista mallintaa paremmin. Kerättyä tietoa voidaan käyttää toiminnanohjaukseen operatiivisella tasolla, laadun arviointiin, ennakoivaan ylläpitoon ja viemäriverkoston parantamiseen. Tietoa voidaan hyödyntää myös parantamaan viemäriverkoston hydraulisia malleja, joita käsitellään lyhyesti alaluvussa 3.2. (Hofer et al. 2018)

Montserrat et al. (2013) kehittivät menetelmän, jonka avulla voidaan karakterisoida ylivuotojen esiintymiä ja kestoa lämpötilamittarien avulla. Ylivuodon havaitseminen perustuu viemärin kaasufaasin ja ylivuotoveden lämpötilojen eroon: sateen aikana tai sen jälkeen ylivuotopadolta mitatusta lämpötilan muutoksesta voidaan päätellä, onko ylivuotoja tullut. Menetelmä on testattu ja validoitu La Garrigan sekaviemäriverkostossa. Testaus suoritettiin valvomalla 13 ylivuotopatoa yhden vuoden ajan. Vuoden aikana rekisteröitiin

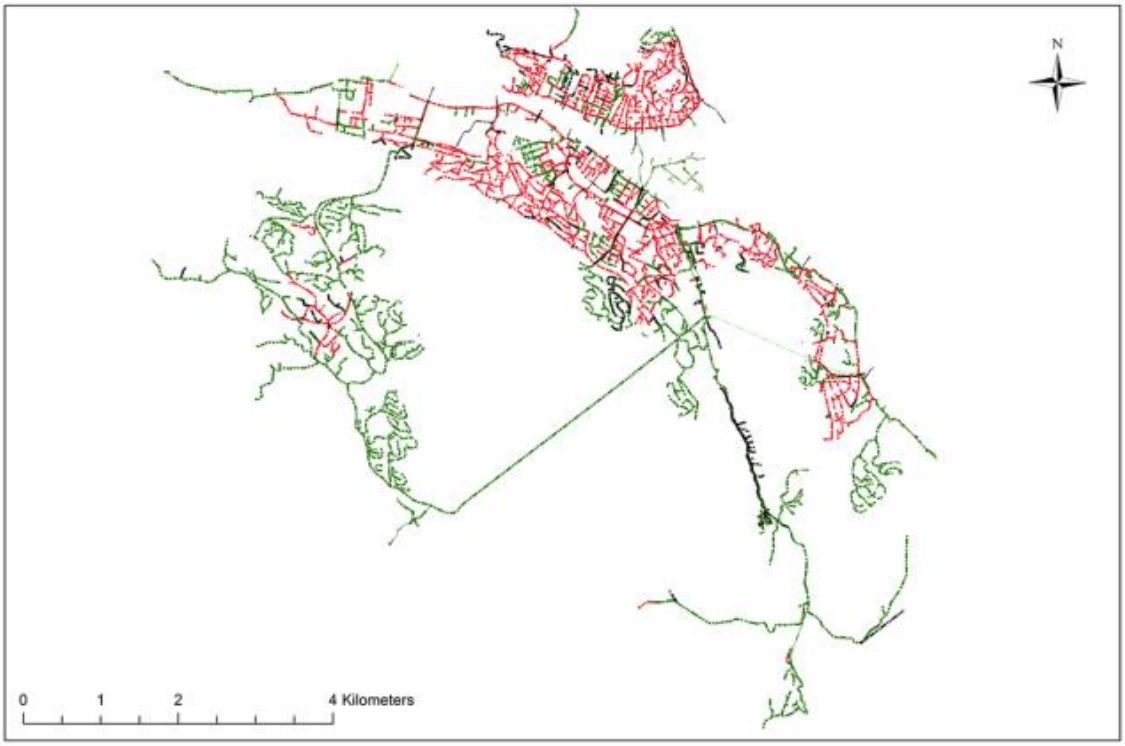
57 sadetapahtumaa, joista 80 % ylivuototapauksista onnistuttiin määrittämään menetelmän avulla. (Montserrat et al. 2013)

Hofer et al. (2018) saivat samanlaisia tuloksia tutkiessaan lämpötilamittauksien käyttöä ylivuotojen havaitsemisessa: 7 kuukauden testijakson aikana menetelmän avulla pystyttiin havaitsemaan kaikki ylivuototapahtumat ilman virhehavaintoja. Esitetty lähestymistapa vaatii kaksi lämpötila-anturia ylivuotorakenteessa mittaamaan signaaleja samanaikaisesti. Ensimmäinen lämpötila-anturi mittaa jatkuvasti jätevesivirtaa. Toinen lämpötila-anturi on asennettu joko ylivuotopadon harjalle tai ylivuotokanavan pohjalle. Anturi mittaa ympäröivän ilman lämpötilaa kuivalla säällä ja tulvivan jäteveden lämpötilaa ylivuodon aikana. (Hofer et al. 2018)

3.2 Tietokonemallit

Sekaviemärien ylivuotojen ennustamiseen voidaan käyttää fysikaalista mallia, jonka tarkoituksena on luoda käsite todellisen ylivuodon muodostumisesta. Fysikaalinen malli muodostuu yleensä kahdesta alamallista: hydrologisesta ja hydraulisesta mallista. Hydrologisen mallin tarkastelun kohteena on valuma-alue, jolloin syötteenä toimii sadanta ja vasteena saadaan virtaamakäyrä. (Zhao et al. 2017) Sadannan lisäksi virtaamakäyrien laskentaan vaikuttavia parametrejä ovat esimerkiksi haihdunta, imeytyminen ja pinnalle varastoituminen (Sempere-Torres et al. 1999).

Hydraulinen malli sisältää maan alla tapahtuvat prosessit viemäriverkostossa. Hydraulisen mallin syötteenä toimii hydrologisen mallin virtaamakäyrien lisäksi kotitalouksien ja teollisuuden jätevedet, joiden avulla muodostetaan vasteena verkoston virtaukset ja ylivuodon taso. (Zhao et al. 2017) Kuvassa 2 on esitetty tyypillinen hydraulinen malli viemärijärjestelmälle.



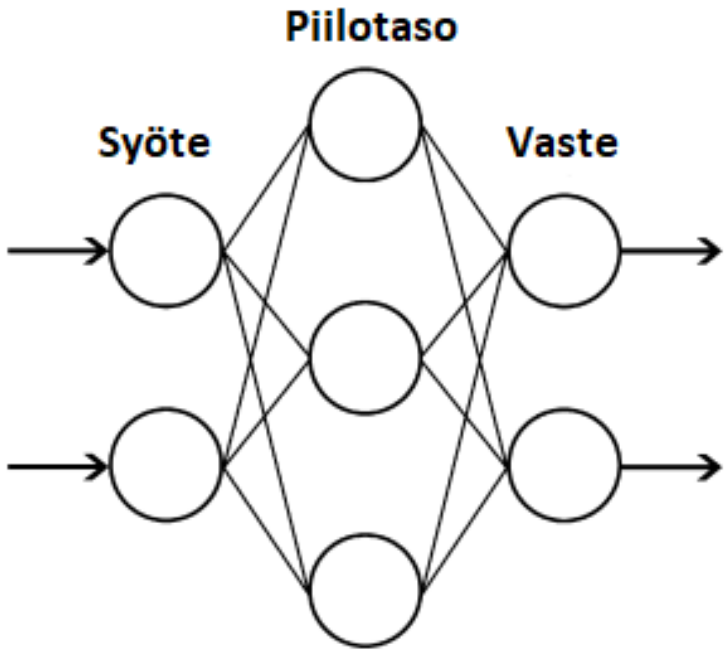
Kuva 2. Esimerkki hydraulisesta mallista, Drammenin viemäriverkosto (Zhang et al. 2018c)

Hule- ja jäteveden seos ohjataan jätevedenpuhdistamolle puhdistettavaksi tai kapasiteetin ylittyessä ylivuotorakenteille, joista se päästetään käsittelemättömänä suoraan purkuvesistöön. Hydraulisen mallin avulla voidaan todeta valunnan ja jäteveden virtaaman sekä viemäriverkoston virtauksen ja ylivuototilanteen välisiä hydraulisia riippuvuuksia. (Zhao et al. 2017)

3.3 Neuroverkot

Neuroverkkojen (engl. *articifial neural network*, ANN) hyödyntämistä sadannan ja valunnan ennustamisessa on tutkittu 1990-luvun alusta saakka. Neuroverkot ovat tunnettuja siitä, että ne osaavat jäljitellä hyvin epälineaarisia ja monimutkaisia systeemejä. Aikasarjoja analysoidessa perinteisten eteenpäin kytkettyjen (engl. *feed-forward*) neuroverkkojen ongelmana on kuitenkin ollut se, että ne eivät ota huomioon peräkkäisten syötteiden vaikutusta toisiinsa. Ongelmaa on pyritty ratkaisemaan uusilla neuroverkkoarkkitehtuureilla, niin kutsutuilla takaisinkytketyillä neuroverkoilla (engl. *recurrent neural network*, RNN). (Kratzert et al. 2018) Takaisinkytketty neuroverkko eroaa perinteisestä neuroverkosta siinä, että sen tuottama vaste riippuu sekä aikaisemmista laskelmista että nykyisen aika-askeleen laskennasta. Takaisinkytketyt neuroverkot ovat osoittautuneet erittäin tehokkaiksi välineiksi hydrologisten aikasarjojen mallintamisessa. (Zhang et al. 2018a)

Neuroverkot koostuvat yleisesti syöte-, piilo- ja vastetasoista, jotka on esitetty kuvassa 3. Perinteisessä eteenpäin kytketyssä neuroverkossa lasketaan aluksi syötteiden painotettu summa. Laskennan jälkeen painotettu summa syötetään piilotasoon. Piilotasossa painotetut summat sijoitetaan aktivaatiofunktioon, joka muuttaa ne vasteiksi. (Zhang et al. 2018b)



Kuva 3. Esimerkki perinteisestä neuroverkkoarkkitehtuurista. (Muokattu lähteestä Zhang et al. 2018a)

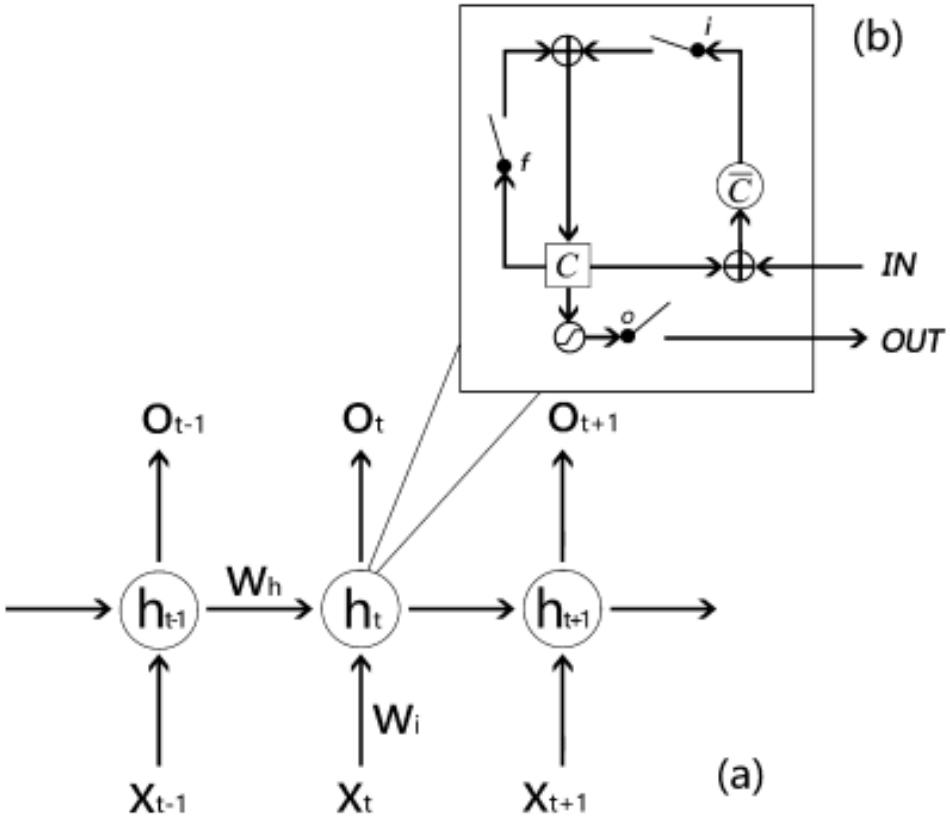
Takaisinkytketyt neuroverkot eroavat perinteisistä neuroverkoista siten, että ne syöttävät painotettujen summien ja syötteiden lisäksi tietoa piilotettujen neuronien tiloista edelliseltä aika-askeleelta seuraavalle. Tämä on erityisen hyödyllistä hydrologisen datan kanssa, koska ne usein sisältävät ajallisia riippuvuuksia ja malleja. Hydrologinen data sisältää tietoa sademääristä, veden korkeuksista, jokien virtauksista ja muista muuttujista. Lisäämällä ajallinen näkökulma takaisinkytkennän avulla neuroverkko kykenee mallintamaan hydrologisten prosessien peräkkäisluonteen ja tekemään parempia ennusteita datasta. (Zhang et al. 2018b)

3.3.1 Long Short-Term Memory

Long Short-Term Memory (LSTM) on takaisinkytketyn neuroverkon toteutus, joka on suunniteltu oppimaan pitkän aikavälin riippuvuuksia. LSTM kykenee perinteistä takaisinkytkettyä neuroverkkoa paremmin ottamaan huomioon valuma-alueen varastointivaikutukset, joilla voi olla valuma-alueen kannalta tärkeä rooli hydrologisissa prosesseissa. (Kratzert et al. 2018). LSTM:n yksi huonoista puolista on sen monimutkainen rakenne verrattuna perinteiseen neuroverkkoarkkitehtuuriin, jonka vuoksi sen yksinkertaistamiseen liittyvä tutkimus on lisääntynyt tietojenkäsittelytieteessä. Eräs menestyksekäs LSTM:n muunnelma on *The Gated Recurrent Unit* (GRU), joka kehitettiin vuonna 2014. (Zhang et al. 2018a)

LSTM:n ja perinteisen takaisinkytketyn neuroverkon ero on havaittavissa niiden takaisinkytkettyjen solujen sisäisissä toiminnoissa. Perinteisessä takaisinkytketyn neuroverkon solussa on vain yksi tila, joka lasketaan uudelleen jokaisella aika-askeleella. LSTM:ssä on tämän lisäksi ylimääräinen solun tila tai muistiyksikkö, johon kerätään informaatiota aikaisemmista laskelmista. (Kratzert et al. 2018)

LSTM käsittelee tietoa piilotetun yksikön sisällä kolmen portin avulla: nollausportin (engl. *forget gate*) avulla solun muistiyksikkö voidaan nollata, syöteportin avulla muistiyksikköä voidaan muokata ja vasteportin avulla muistiyksikön vaikutusta muihin neuroneihin voidaan joko lisätä tai rajoittaa (Zhang et al. 2018b). Kuvassa 4 on esitetty LSTM-neuroverkon ja piilotason rakenne.



Kuva 4. LSTM-neuroverkon ja piilotason rakenne. (Zhang et al. 2018b)

Kuvassa 4a) muuttuja x kuvaa syötettä, h piilotason neuronia ja o vastetta tietyllä ajanhetkellä. Kuvasta nähdään, että painotus wh siirtyy aina aika-askeleelta seuraavalle, jolloin se vaikuttaa seuraavan aika-askeleen painotuksiin.

Kuva 4b) esittää piilotetun yksikön rakennetta. Kuvassa *i*, *f* ja *o* kuvaavat syöte-, nollaus- ja vasteportteja. C ja $\bar{C}$ kuvaavat muistiyksikön nykyistä ja uutta tilaa.

LSTM:n käyttöä sekaviemäreiden ylivuodon hallinnassa on tutkittu muun muassa Regnbyge 3 M projektissa. Regnbyge 3 M on Drammenin kaupungin lanseeraama innovaatioprojekti, jonka tavoitteena on lisätä älykästä tarkkailua, mallinnusta ja hallintaratkaisuja viemäriverkoston ja jätevedenpuhdistamoiden hallinnassa. Projektin alussa kehitettiin verkkopohjainen viemärin valvontajärjestelmä nimeltään Regnbyge.no. Valvontajärjestelmä koostuu ympäri Drammenin kaupunkia sijoitetuista sademittareista ja sensoreista, jotka valvovat veden korkeutta ja nopeutta. Reaaliaikaisen valvonnan lisäksi valvontajärjestelmän havaitsemaa dataa voidaan hyödyntää mallien rakentamisessa ja kalibroinnissa. (Zhang et al. 2018b)

3.3.2 Neuroverkkojen soveltuvuuden vertailua

Zhang et al. (2018c) tutkivat viemärin hallitsemista in-line varastoinnin avulla Drammenin kaupungissa Norjassa. In-line varastoinnissa viemäriputkien vapaata tilaa käytetään viemärin ylivuodon ja jätevedenpuhdistamoiden ylikuormituksen vähentämiseksi. Viemärin hallinnassa yhdisteltiin sekä hydraulista mallia että neuroverkkoja. Yksityiskohtaisen hydraulisen mallin avulla saatiin selville, missä osissa verkostoa oli enemmän vapaata tilaa. Simulaatioiden tuloksena selvisi, että vapaan tilan hyödyntäminen vähentäisi jätevedenpuhdistamoiden ylijuoksutuksia. (Zhang et al. 2018c)

Takaisinkytketyt neuroverkot lisättiin ennakoimaan virtauksia, jonka avulla voitaisiin parantaa päätöksentekoa ja saada riittävästi aikaa vastatoimiin. Viemärin hallinnassa vertailuun otettiin kolme eri neuroverkkoarkkitehtuuria: Elman, *Nonlinear autoregressive exogenous* (NARX) ja LSTM. Elman on takaisinkytketty neuroverkko, jossa on tyypillinen kuvan 3 mukainen kolmen tason rakenne. Elmanin piilotaso sisältää aikaviiveyksikön, joka kerää tietoa aikasempien piilotason aktivaatiofunktion tuottamista tuloksista. Kerätty tieto syötetään takaisin ylimääräisenä syötteenä piilotasoon seuraavalla aika-askeleella. NARX on puolestaan tyypillinen toteutus dynaamisesta takaisinkytketystä neuroverkosta. Käytännössä NARX on ennustusmalli, joka ottaa huomioon muuttujien aikaisemmat arvot, luo epälineaarisia riippuvuksia näiden muuttujien välille ja lisäksi vielä huomioi ulkoisia tekijöitä luodessaan ennustuksia muuttujien arvoille. (Zhang et al. 2018c)

Neuroverkkojen suorituskykyä vertailtiin determinaatiokertoimen R^2 ja Nash-Sutcliffe Efficiency-kertoimen (NSE) avulla. R^2 determinaatiokerroin kuvaa sitä osuutta riippuvan, eli ennustettavan muuttujan arvojen vaihtelussa, joka selittyy mallin riippumattomilla muutujilla. Toisien sanoen determinaatiokerroin kertoo kuinka hyvin mallin ennustukset vastaavat todellisia havaintoja. Tulos on lukuarvo väliltä 0–1: arvo 1 tarkoittaa mallin selittävän kaiken vaihtelun, kun taas arvo 0 tarkoittaa ettei malli selitä lainkaan vaihtelua. NSE mittaa determinaatiokertoimen tavoin mallin soveltuvuutta havainnoidun datan ennustamiseen. Determinaationkerroin ja NSE ovat laskutavoiltaan hyvin samankaltaisia, mutta determinaatiokertoimesta eroten NSE saa arvonsa väliltä $-\infty$ ja 1, yleisesti hyväksyttävien arvojen ollessa 0 ja 1 väliltä. Neuroverkkoja testattiin kahdessa paikassa, Konnerudin ja Kobbervikdalen-gangstin tunneleissa. Taulukkoon 2 on kerätty tulokset neuroverkkojen suoriutumisesta virtaamien ennustuksessa. (Zhang et al. 2018c)

Taulukko 2. Yhteenveto neuroverkkomallien suorituskyvystä Konnerudin ja Kobbervikdalen-gangstin tunneleissa. (Muokattu lähteestä Zhang et al. 2018c)

Vaihe	*Malli*	*Konnerud*		*Kobbervikdalen-gangsti*	
		R^2	*NSE*	R^2	*NSE*
Koulutus	Elman	0,88	0,81	0,91	0,84
	NARX	0,92	0,89	0,90	0,88
	LSTM	0,94	0,91	0,95	0,87
Testaus	Elman	0,67	0,54	0,71	0,60
	NARX	0,81	0,63	0,76	0,68
	LSTM	0,77	0,66	0,79	0,72

Taulukosta 2 nähdään, että kaikki neuroverkkomallit suoriutuvat hyvin koulutusvaiheessa. Testausvaiheessa LSTM suoriutuu muita neuroverkkoja paremmin NSE-kertoimen perusteella. Huomion arvoista on myös se, että dynaamiset neuroverkkoarkkitehtuurit LSTM ja NARX suoriutuvat sekä R^2- että NSE-kertoimen perusteella paremmin kuin perinteinen neuroverkko Elman. (Zhang et al. 2018c)

Zhang et al. (2018a) saivat samanlaisia tuloksia tutkiessaan eri neuroverkkoarkkitehtuurien suorituskykyä sekaviemärien ylivuotojen ennustamisessa. Tutkimuksessa vertailtiin eri neuroverkkojen soveltuvuutta usean aika-askeleen ennustuksessa (engl. *multi-step-ahead prediction*). Vertailun kohteina olivat LSTM- ja GRU-neuroverkkojen lisäksi monikerroksinen perseptroniverkko (engl. *multilayer perceptron,* MLP) ja *Wavelet Neural Network* (WNN). MLP on kuvan 3 mallinen neuroverkkoarkkitehtuuri, joka muodostuu syöte-, piilo- ja vastetasoista omine esiasetuksineen ja painotuksineen. WNN on MLP:n kaltainen neuroverkko, joka käyttää aktivaatiofunktiona aalloketta**.** Aallokkeet ovat matemaattisia funktioita, joiden avulla voidaan analysoida dataa eri mittakaavoissa ja resoluutioissa. Tutkimuksessa MLP antoi tarkkoja ennustuksia vain yhden ja kahden aika-askeleen päähän, mutta ei useamman aika-askeleen jälkeen. WNN osoitti parempaa soveltuvuutta usean aika-askeleen ennustuksessa kuin MLP, mutta WNN:n ongelmana on aikaviive ja heilalehtu hydrografiassa. Arvioinnissa takaisinkytketyt neuroverkot GRU ja LSTM olivat suorituskyvyltään MLP- ja WNN-malleja parempia. GRU ja LSTM olivat lähes vertailukelpoisia, LSTM:n ollessa marginaalisesti parempi. GRU:n etuja ovat kuitenkin sen yksinkertaisempi arkkitehtuuri, nopeampi oppimiskäyrä ja vaadittujen parametrien vähäisempi määrä. (Zhang et al. 2018a)

3.4 Ylivuotojen hallintakeinot

Quaranta et al. (2022) tutkivat neljän erilaisen ylivuotojen hallintakeinojen kustannuksia ja hyötyjä. Tutkitut keinot olivat viherryksien rakentaminen kaupunkiympäristöön, viemäristön puskurikapasiteetin lisääminen, viemäriverkoston reaaliaikainen hallinta ja ylivuotoveden käsittely ennen purkuvesistöön laskua. Kolme ensimmäistä keinoa ovat ylivuotoa vähentäviä toimia, kun taas viimeinen on korjaava toimenpide. (Quaranta et al. 2022)

Viherrakentaminen kaupunkiympäristössä on viime vuosina saavuttanut suosiota maailmalla. Vihreitä infrastruktuuriratkaisuja ovat muun muassa viherkatot, sadepuutarhat ja läpäisevät päällysteet. Viherrakentaminen lisää kaupunkiympäristön viihtyisyyttä ja vähentää kaupungistumisen haittavaikutuksia. Viemäröinnin kannalta viherpinnat tarjoavat imeytyspinta-alaa hulevesille, jonka seurauksena huleveden osuus sekaviemäreissä vähenee. (Quaranta et al. 2022)

Viemäristön puskurikapasiteetin lisääminen tarkoittaa käytännössä viemäriverkoston tilavuuden suurentamista, jolloin jätevettä voidaan pidättää verkoston vapaassa tilassa pidempään (Quaranta et al. 2022). Jäteveden varastointi viivytysaltaisiin tai varastosäiliöihin on myös potentiaalinen vaihtoehto. Varastointiyksiköiden käyttöä rajoittaa kuitenkin niin taloudelliset seikat kuin myös rajalliset sijoituspaikat tiheällä kaupunkialueella. (Zhang et al. 2018b) Jäteveden varastoimisessa on myös huomioitava veden korrosoivuus ja laadun muuttuminen säilytyksen aikana.

Verkoston reaaliaikainen hallinta on nimensä mukaisesti viemärijärjestelmän säätämistä ajantasalle, ylivuotojen tapauksessa tämä tarkoittaa suurenevaan virtaamaan reagoimista. Menetelmä perustuu datankeruuseen, jonka avulla poikkeustilanteisiin voidaan vaikuttaa ohjaamalla virtausta edellä mainittuihin viivytysaltaisiin tai varastointisäiliöihin. (Quaranta et al. 2022) Reaaliaikaista hallintaa voidaan parantaa lisäämällä neuroverkot menetelmän tueksi. Neuroverkot tarjoavat systeemille apua data-analyysiin, hahmontunnistukseen (engl. *pattern-recognition*) ja päätöksentekoon. (Zhang et al. 2018a)

Quaranta et al. (2022) tutkimus osoitti, että menetelmistä viimeinen, eli ylivuotoveden käsittely ennen purkuvesistöön laskemista, oli kustannustehokkain. Vähentämisstrategioista tehokkaimmaksi osoittautui viherpintojen lisääminen sen lisähyötyjen vuoksi. Tutkimuksessa kuitenkin huomautetaan, että vallitsevat olosuhteet on huomioitava vähentämismenetelmiä valittaessa sekä niiden toteutus osana yleistä kaupunkisuunnittelua ja muita käynnissä olevia projekteja. (Quaranta et al. 2022)

4. ILMASTONMUUTOKSEN VAIKUTUKSET VIEMÄRÖINTIIN

Keskilämpötilan nousu lisää kuivia kausia, jotka edelleen johtavat rankempiin ja yhä useammin toistuviin rankkasateisiin tulevaisuudessa. Kaupunkiympäristölle tämä tarkoittaa useammin toistuvia ja vakavampia viemärien ylikuormittumisia ja tulvia sekä suurempia päästöjä sekaviemärien ylivuotoina. Ilmastonmuutoksen mahdollisten vaikutusten arvioimiseksi kaupunkiympäristölle luotuja valuntamalleja testataan ilmastonmuutoksen vaikutuksilla korjatulla datalla. Nykyiset ilmastomallit ovat kuitenkin liian karkeita antaakseen hyödyllistä tietoa kaupunkiympäristön valunnan mallinnuksessa, erityisesti konvektiivisen sadannan kannalta. (Nilsen et al. 2011)

Nilsen et al. (2011) kehittivät *delta-change* -menetelmän avulla todella tarkan ennusteaikasarjan vuosien 2071–2100 sadannoille. *Delta-change* -menetelmä perustuu oletukseen, että ilmastomallin ennusteen suhteellinen muutos on luotettavampi vertailu- ja skenaariotilanteiden välillä kuin absoluuttinen muutos. Viemäriverkoston nykyistä ja tulevaa suorituskykyä arvioitiin *Model for Urban Sewers* -ohjelmiston avulla. Vuosittaiset sekaviemärien ylivuodot kasvoivat simulaatioiden perusteella 33 % vuosittaisen pintavalunnan ollessa maksimissa ja 83 %, kun vuosittainen sadanta oli maksimissa. Sekaviemärien ylivuotojen lisäksi tarkastuskaivojen ja kellarien tulvinta lisääntyy simulaatioiden perusteella. (Nilsen et al. 2011)

Bendel et al. (2013) tutkivat sekaviemärien ylivuotoja Baden-Wuerttembergin kaupungissa etelä-Saksassa pitkäaikaisten sadannan ja valunnan simulaatioiden avulla. Syötedatana käytettiin keinotekoista aikasarjaa. Sadannan simulointiin käytettiin NiedSim-Klima-ohjelmistoa, joka ottaa huomioon ilmastonmuutoksen vaikutuksen sadannan toistuvuuksissa. Ohjelmiston avulla luotiin aikasarjat usealle eri sijainnille vuosille 1961–1990 ja 2041–2050. Aikasarjoja vertailtaessa huomattiin lyhytkestoisten (1–2 h) ylivuotojen toistuvuuden kasvavan tulevaisuudessa, peräti 30 % vuoteen 2050 mennessä. Lisäksi huomattiin, että ylivuodon määrä ja kesto riippuvat ylivuotorakenteen tyypistä: molemmat arvot kasvavat yksinkertaisten, virtausta jakavien rakenteiden kohdalla. Ylivuoto on vähäisempää sellaisilla ylivuotorakenteilla, joiden yhteydessä on säiliöallas. (Bendel et al. 2013)

Ilmastonmuutoksen hydrologisia vaikutuksia Suomessa on myös tutkittu. Veijalainen et al. (2019) suorittamassa tutkimuksessa selvitettiin kuivuuden vaikutuksia erityisesti Suomen vesihuoltoon ja vesivoimaan. Tutkimuksessa käytettiin referenssinä vuosien 1939–

1942 aikaista ankaraa kuivuuskautta. Tämän kuivuuskauden aikaiset vedenpinnankorkeudet ja virtaamat tuotiin nykypäivään hydrologisen mallin avulla. Lisäksi arvioitiin, miten ilmastonmuutos muuttaisi kuivia kausia. Tutkimuksen mukaan referenssin kaltaisen kuivan kauden aikana virtaamat laskisivat korkeintaan 80 % verrattuna keskimääräisiin vuosittaisiin minimivirtaamiin. (Veijalainen et al. 2019)

Viemäröinnin optimointi on tärkeä tekijä Suomen kannalta ilmastonmuutosta ajatellen. Viemärijärjestelmillä on suora vaikutus vesistöjen tilaan ja päästöihin sekä välillisiä vaikutuksia energiankulutukseen ja kasvihuonekaasupäästöihin. Tehokkaan ja kestävän viemäröintijärjestelmän avulla ympäristövaikutuksia voidaan vähentää monilla tavoilla. Viemäröintijärjestelmiä päivittämällä ja nykyaikaistamalla voidaan erityisesti vaikuttaa vesistöjen suojeluun vähentämällä jätevesipäästöjä ja estämällä haitallisten aineiden leviämistä ympäristöön. Esimerkiksi vanhojen putkistojen korvaaminen uusilla ja tiiviimmillä putkilla voi estää jätevesien pääsyn maaperään ja vesistöihin. Viemäröintijärjestelmien lisäksi myös puhdistamolaitosten prosessien jatkuva kehittäminen on tärkeää ilmastonmuutoksen vaikutusten ehkäisemiseksi.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän kandidaatin työn tarkoituksena oli tutkia keinoja, joilla ylivuotoja pystyttäisiin vähentämään sekä tekoälyn mahdollisuuksia sekaviemäröinnin optimoinnissa. Sekaviemärien ylivuotojen vähentäminen on yksi keskeisimmistä haasteista kaupunkien kestävän vesihuollon kehittämisessä. Purkuvesistöön laskettu käsittelemätön hule- ja jäteveden seos luo merkittäviä riskejä niin ympäristölle kuin kansanterveydelle, minkä vuoksi ylivuotojen vähentäminen edellyttää laajoja strategisia toimenpiteitä.

Vihreät infrastruktuuriratkaisut ovat tutkimuksissa osoittautuneet tehokkaaksi keinoksi vähentää sekaviemärien ylivuotoja. Viherkattojen, sadepuutarhojen ja läpäisevien päällysteiden avulla hulevettä voidaan kerätä ja hallita, mikä vähentää sekaviemärien kuormitusta. Ylivuotojen vähentämisen lisäksi viherrakentaminen parantaa kaupunkialueiden esteettisiä ominaisuuksia ja torjuu kaupungistumisen haittavaikutuksia.

Teknologian kehitys on mahdollistanut reaaliaikaisen seurannan ja sopeutuvien ohjausjärjestelmien käytön viemärijärjestelmissä. Ohjausjärjestelmät keräävät tietoa koskien veden laatua, virtausnopeuksia ja sademääriä antureiden ja data-analytiikan avulla. Kerätyn tiedon avulla viemärijärjestelmää voidaan ohjata tarkasti säätämällä dynaamisesti venttiilejä, portteja ja pumppuja.

Neuroverkot osoittautuivat tehokkaaksi välineeksi ylivuotojen simuloinnissa ja ennustamisessa. Neuroverkkojen kyky ottaa huomioon lukuisia meteorologisia, hydrologisia ja järjestelmäkohtaisia tietoja mahdollistaa ylivuotojen kattavan mallinnuksen. Kehitetyt mallit ovat esittäneet tarkkoja ennustuksia sekä lyhyellä että pitkällä aikavälillä, osoittaen soveltuvuuden erilaisiin kaupunkiympäristöihin. Reaaliaikaisen seurannan ja neuroverkkojen yhdistäminen on myös näyttänyt lupaavia tuloksia. Neuroverkot pystyvät nopeasti sopeutumaan muuttuviin olosuhteisiin, mikä tekee niistä hyviä välineitä reaaliaikaisessa päätöksenteossa ja optimaalisten hallintastrategioiden muodostamisessa.

Ylivuotojen hallintakeinojen ja neuroverkkojen tarjoamien ennustusten yhteistoiminnan avulla voidaan luoda vankka pohja kokonaisvaltaiselle ylivuotojen hallinnalle, ratkaisten kaupunkihydrologian ja ilmaston vaihtelun monimutkaiset haasteet.

LÄHTEET

Bendel, D., Beck, F., & Dittmer, U. (2013). Modeling climate change impacts on combined sewer overflow using synthetic precipitation time series. Water Science and Technology: a Journal of the International Association on Water Pollution Research, Vol. 68, pp. 160–166.

Botturi, A., Ozbayram, E. G., Tondera, K., Gilbert, N. I., Rouault, P., Caradot, N., Gutierrez, O., Daneshgar, S., Frison, N., Akyol, Ç., Foglia, A., Eusebi, A. L., & Fatone, F. (2021). Combined sewer overflows: A critical review on best practice and innovative solutions to mitigate impacts on environment and human health. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, Vol. 51, pp. 1585–1618.

Cohen, N. & Robbins, P. (2011) Green Cities: An A-to-Z Guide. Thousand Oaks: SAGE Publications, Inc.

Davis, M. L. (2020). Water and Wastewater Engineering: Design Principles and Practice, Second Edition (2nd edition.). McGraw-Hill Education.

Hofer, T., Montserrat, A., Gruber, G., Gamerith, V., Corominas, L., & Muschalla, D. (2018). A robust and accurate surrogate method for monitoring the frequency and duration of combined sewer overflows. Environmental Monitoring and Assessment, Vol. 190, pp. 1–18.

Karttunen, Erkki. (2010a). Vesihuoltoverkkojen suunnittelu. 1, Perusteet ja toiminnallisuus. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL.

Karttunen, Erkki. (2010b). Vesihuoltoverkkojen suunnittelu. 2, Mitoitus ja suunnittelu. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL.

Kratzert, F., Klotz, D., Brenner, C., Schulz, K. & Herrnegger, M. (2018). Rainfall–runoff modelling using Long Short-Term Memory (LSTM) networks. Hydrology and Earth System Sciences, Vol. 22, pp. 6005–6022.

Lampola T., Kuikka S. (2018). Viemäreiden kuntotutkimusopas. Suomen Vesilaitosyhdistys ry. Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 50.

Leonhardt, G., Fach, S., Engelhard, C., Kinzel, H., & Rauch, W. (2012). A software-based sensor for combined sewer overflows. Water Science and Technology, Vol. 66, pp. 1475–1482.

Montserrat, A., Gutierrez, O., Poch, M., & Corominas, L. (2013). Field validation of a new low-cost method for determining occurrence and duration of combined sewer overflows. Science of the Total Environment, Vol. 463-464, pp. 904–912.

Nilsen, V., Lier, J., Bjerkholt, J., & Lindholm, O. (2011). Analysing urban floods and combined sewer overflows in a changing climate. Journal of Water and Climate Change, Vol. 2, pp. 260–271.

Quaranta, E., Fuchs, S., Liefting, H. J., Schellart, A., & Pistocchi, A. (2022). Costs and benefits of combined sewer overflow management strategies at the European scale. Journal of Environmental Management, Vol. 318, pp. 115629–115629.

Sempere-Torres, D., Corral, C., Raso, J., & Malgrat, P. (1999). Use of Weather Radar for Combined Sewer Overflows Monitoring and Control. Journal of Environmental Engineering, Vol. 125, pp. 372–380.

Suomen Kuntaliitto. Hulevesiopas. 2012. Viitattu 20.8.2023. Saatavissa: https://www.kuntaliitto.fi/julkaisut/2012/1481-hulevesiopas

Thorndahl, S., & Willems, P. (2008). Probabilistic modelling of overflow, surcharge and flooding in urban drainage using the first-order reliability method and parameterization of local rain series. Water Research (Oxford), Vol. 42, pp. 455–466.

Veijalainen, N., Ahopelto, L., Marttunen, M., Jääskeläinen, J., Britschgi, R., Orvomaa, M., Belinskij, A., & Keskinen, M. (2019). Severe Drought in Finland: Modeling Effects on Water Resources and Assessing Climate Change Impacts. Sustainability (Basel, Switzerland), 11, pp. 2450–.

Vesihuoltolaki 2001/119. https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2001/20010119

Zhang, D., Lindholm, G., & Ratnaweera, H. (2018a). Use long short-term memory to enhance Internet of Things for combined sewer overflow monitoring. Journal of Hydrology, Vol. 556, pp. 409–418.

Zhang, D., Hølland, E., Lindholm, G., & Ratnaweera, H. (2018b). Hydraulic modeling and deep learning based flow forecasting for optimizing inter catchment wastewater transfer. Journal of Hydrology, Vol. 567, pp. 792–802.

Zhang, D., Martinez, N., Lindholm, G., & Ratnaweera, H. (2018c). Manage Sewer In-Line Storage Control Using Hydraulic Model and Recurrent Neural Network. Water Resources Management, Vol. 32, pp. 2079–2098.

Zhao, W., Beach, T., & Rezgui, Y. (2017). Automated Model Construction for Combined Sewer Overflow Prediction Based on Efficient LASSO Algorithm. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, Vol. 49, pp. 1–16.