



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

DRAINMAN

- Uvedkommende vand og det intelligente spildevandssystem

MUDP Rapport

September 2021

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Lene Bassø, Aarhus Vand

Michael Rasmussen, Aalborg Universitet

Sten Lindberg, DHI

Ditte Krogh Bak, DHI

Ole Hejn Pjenggaard,

Reza Pourmoayed, Grundfos

Christian Schou, Grundfos

Preben Dam Simonsen, NIRAS

Lene Lykke Kraglund, NIRAS

Sara Bugge Ploug, NIRAS

ISBN: 978-87-7038-341-7

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, som er finansieret af Miljøstyrelsen. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse

Indhold

1.	Intro og resumé	5
1.1	Intro	5
1.2	Resumé	5
1.3	Summary	6
1.4	Indledning	7
1.5	Problemstilling	7
1.6	Målgruppe	7
1.7	Projektbeskrivelse	8
1.7.1	Set-up i projektet	9
1.8	Mål og succeskriterier	9
2.	Arbejdspakke 2	11
2.1	Indledning	11
2.2	Mål med Arbejdspakke 2	11
2.3	Resultater	11
2.3.1	Valg af måleudstyr	11
2.3.2	Udvikling af ny målemetode	13
2.4	Diskussion og perspektivering	13
3.	Arbejdspakke 3	15
3.1	Indledning	15
3.2	Mål med arbejdsplan	15
3.3	Metoder	15
3.3.1	RDI model – Rainfall Dependant infiltration, analyse og realtid	15
3.3.2	Machine Learning - data analytisk model, analyse og realtid	15
3.3.3	Statistisk dekomponering	15
3.3.4	Realtid dekomponering af målt flow	16
3.4	Resultater	17
3.4.1	RDI model	17
3.4.2	Machine Learning beregningsresultater	19
3.4.3	Statistisk Dekomponering	25
3.4.4	Realtidsdekomponering af målt flow	26
3.5	Diskussion og perspektivering	28
4.	Arbejdspakke 4	30
4.1	Indledning	30
4.2	Mål med arbejdsplan	30
4.3	Datagrundlag	31
4.4	Metoder	31
4.4.1	Varslingssystem i HOMIS	31
4.4.2	Dynamisk hjælpeplan	31
4.4.3	Scenarieberegninger	32
4.5	Resultater	32
4.5.1	Varslingssystem i HOMIS	32
4.5.2	Dynamisk hjælpeplan	34
4.5.3	Scenarieberegninger	35

4.6	Diskussion og perspektivering	36
5.	Konklusion og perspektivering	37
5.1	Videre anvendelse / Perspektivering	39
5.2	Konklusion	40
6.	Bilagsliste	42
7.	Figur-/tabeloversigt	43

1. Intro og resumé

1.1 Intro

Uvedkommende vand er et væsentligt problem i afløbssystemer i stort set hele verden. Uvedkommende vand defineres som regnvandsbidrag fra fejlkoblinger, overlækning fra regnvandsledninger og anden direkte afstrømning af regnvand samt indsigning fra grundvand, dræn og overfladevand. Uvedkommende vand i spildevandssystemet giver udfordringer med væsentligt øgede driftsomkostninger til både pumpning og rensning af spildevandet, risiko for unødvendige kælderoversvømmelser til stor gene for borgere og anledning til miljøproblemer via overløb og udsivning af spildevand. Der er væsentlige økonomiske, energimæssige og miljømæssige problemstillinger involveret i dette.

Der er i Danmark en stigende interesse fra mange forsyningsvirksomheder for at gøre noget systematisk ved problemet, ikke mindst af økonomiske årsager, men også miljøproblemerne ved overløb vægter højt. Udfordringerne med uvedkommende vand er, ud over de økonomiske og miljømæssige problemer, også relateret til at kunne identificere, hvor i et afløbssystem uvedkommende vand kommer ind, og hvad forårsager det uvedkommende vand til at komme ind i afløbssystemet. Spørgsmålene om hvor og hvad hjælper forsyningerne med at bliver mere effektive med hensyn til at reducere mængden af uvedkommende vand. Med afsæt i dette er nærværende projekt skabt.

Projektet **”Drainman – uvedkommende vand og det intelligente spildevandssystem”** er skabt af et konsortium med støtte i 2018 fra Miljøstyrelsens Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram, MUDP og egenfinansiering. Konsortiet består af:

Aarhus Vand A/S

Aalborg Universitet, Institut for Byggeri, By og Miljø

DHI A/S

Grundfos A/S

Wavin A/S

Per Aarsleff A/S

NIRAS A/S

Formålet med projektet har været at få styr på håndteringen af uvedkommende vand gennem skabelsen af et intelligent system til overvågning og optimal håndtering af vedligehold og investeringer i særligt separate spildevandssystemer.

Projektet tager afsæt i Vibyoplandet i Aarhus Vands forsyningsområde, hvor der er problemer med uvedkommende vand i det separate spildevandssystem. I projektet er der arbejdet med at finde komponenterne til det uvedkommende vand gennem anvendelse af forskellige metoder på forskellige oplandsniveauer.

Derudover har der gennem projektet været en test og sammenligning af forskellige målere og målemetoder.

Projektet er forløbet i perioden 1. oktober 2018 – 15. december 2020.

1.2 Resumé

Drainman-projektet består af flere elementer i jagten på forståelsen af det uvedkommende vand. Gennem projektet er der afprøvet forskellige metoder for måling af realtidsflow for derigennem at analysere og dekomponere flow i søgen efter kilderne til uvedkommende vand. Gennem en række analyser er det afdækket, at bl.a. afløbsledningens diameter er af stor betydning for nøjagtigheden i omsætning af målt vandstand til beregnet flow.

Desuden er der udarbejdet et koncept til måling af flow i en brønd med det formål at reducere omkostninger til måleudstyr og arbejdsindsatsen med at vedligeholde måleudstyr i et aggressivt miljø og uforudsigeligt spildevandsflow.

Forståelsen af det uvedkommende vand er sket gennem en dekomponering af flow ved brug af fire forskellige metoder, som beskrevet nedenfor, samt dekomponering i 4 fraktioner: spildevand, langsom afstrømning, hurtig afstrømning samt grundvandsfraktion.

Den ene metode er en RDI-model, som på simpel vis reproducerer de fysiske processer for spildevand, langsom afstrømning og hurtig afstrømning. Den anden metode er en Machine Learning model, der bliver trænet på 2 års historiske data og valideret på det seneste års data, og som ud over de 3 flowkomponenter i RDI-modellen også medtager grundvandsfraktionen. Den tredje er en statistisk dekomponering, som anvender eksisterende flowmålinger til at dekomponere i de 4 nævnte fraktioner. Den fjerde er en realtidsdekomponering af flow, som også dekomponerer i 4 fraktioner. De fire metoder er sammenlignet, og fordele og begrænsninger ved brugen af metoderne er udstillet.

Som et element i projektet har vi gennem værktøjet HOMIS koblet de dekomponerede data med data om delområder og opsat parametre til varslings for udviklingen og ændringer i det uvedkommende vand.

Endelig er der udarbejdet et dynamisk lag til anvendelse som beslutningsstøtte i forbindelse med renovering af afløbsledninger. Det dynamiske lag er baseret på et Uvedkommende Vand (UV)-indeks, som angiver, hvilke ledninger der har størst risiko for at være påvirket af uvedkommende vand. På baggrund af det dynamiske lag kan der udpeges områder til nærmere undersøgelse for uvedkommende vand, typisk supplerende målinger eller tv, og der kan gennemføres scenarieberegninger for at evaluere effekten af et planlagt tiltag. Det dynamiske lag genereres ved brug af machine learning, hvor kendte data på en begrænset del af ledningsnettet gennem statistiske modeller overføres til det fulde ledningsnet.

1.3 Summary

The Drainman project consists of several elements in the search for the understanding of extraneous water. The project has tested various methods for measuring real-time flow in order to analyse and decompose flow in search of the sources of extraneous water. Through a series of analyses, it has been identified that, inter alia, the diameter of the sewer pipe is of great importance for the accuracy of the decomposition of measured water levels for calculated flow.

In addition, a concept has been developed for measuring flow in manholes with the aim of reducing costs of measuring equipment and the effort of maintaining measuring equipment in an aggressive environment with unpredictable wastewater flow.

The understanding of extraneous water has been achieved through a decomposition of flow using four different methods described below and decomposition into 4 fractions: wastewater, slow run-off, fast run-off and groundwater component.

One method is an RDI model, which in a plain way reproduces the physical processes of wastewater, slow run-off and fast run-off. The second method is a Machine Learning model which is trained on 2 years of historical data and validated on the data of the past year. In addition to the 3 flow components in the RDI model, this Machine Learning model also includes the groundwater component. The third method is a statistical decomposition which uses existing flow measurements to decompose into the 4 above-mentioned components. The fourth method is a real-time flow decomposer, which also decomposes into the 4 fractions. All four methods are compared, and the benefits and limitations of the use of the methods are on display.

As an element of the project, through the HOMIS tool, we have coupled the decomposed data with data on sub-areas and set up parameters to alert the development and changes in the extraneous water.

Finally, a dynamic layer has been developed for the use as decision support for the renovation of sewer pipes. The dynamic layer is based on an Extraneous Water (UV) index, which indicates which pipes are most likely to be affected by extraneous water. Based on the dynamic layer, areas for further examination for extraneous water, typically supplementary measurements or CCTV inspections, can be identified, and scenario calculations can be carried out to evaluate the impact of a planned action. The dynamic layer is generated using machine learning,

where known data for a limited part of the sewer network through statistical models is transferred to the entire sewer network.

1.4 Indledning

I gennem en årrække har kombinationen af et ændret nedbørsmønster og stigende grundvandsspejl forøget risikoen for og oplevelsen af uvedkommende vand i afløbssystemet. Senest havde det ekstremt våde efterår/vinter i 2019/2020 voldsomme konsekvenser for borgerne, da afløbssystemer flere steder blev overbelastet med oversvømmelser på terræn til følge. Ligeledes var flere pumpestationer og renseanlæg under pres af de store mængder uvedkommende vand.

I dag er Viby renseanlæg under voldsomt pres og udfordret i forhold til overholdelse af de statslige rensekrav. En fjernelse af det uvedkommende vand eller dele heraf vil mindske presset på renseanlægget og bidrage positivt i redueringen af overløbsmængder til recipient. Derudover står Aarhus Vand over for en omfattende investering med etablering af Aarhus ReWater, et nyt renseanlæg, hvor det uvedkommende vand er en betydende faktor for dimensioneringen af anlægget.

1.5 Problemstilling

Til prioritering af fornyelsestakten er der adskillige parametre, som udløser, at et opland udpeges som saneringsmodent. Det kan f.eks. være nogle af nedenstående parametre:

- manglende hydraulisk kapacitet
- at systemets fysiske indeks ikke er opfyldt
- rotter i området
- uvedkommende vand i afløbssystemet, hvilket skaber utilsigtede hændelser med forurening, oversvømmelser eller høje driftsomkostninger

I separat kloakerede områder bør der som udgangspunkt ikke være uvedkommende vand i spildevandssystemet. Det er dog en kendsgerning, at spildevandssystemerne er belastet med uvedkommende vand, hvilket kan give kapacitets- og driftsmæssige problemer. Ligeledes vil et manglende overblik over uvedkommende vand forårsage uhensigtsmæssigt design af nye anlæg, øge driftsomkostningerne og forårsage utilsigtet forurening i recipienterne. Til renseanlæg og pumpestationer er ca. 50 % af tilstrømningen fra spildevandssystemer uvedkommende vand – og væsentligt større under regn. Under regn kan den regnbetingede maksimale peak være mere end 400 % af spildevandsflowet.

Det er vanskeligt og omkostningstungt for forsyningerne at identificere det uvedkommende vand, kilden hertil og dermed den rigtige løsning. Jagten på det uvedkommende vand kræver ofte en stor indsats fra driften og en betydende databearbejdning. Med Drainman-projektet vil identifikationen af kilden til det uvedkommende vand lettes gennem metoderne for dekomponering. Dermed vil identifikationen af mængde og kilde til det uvedkommende vand for de forskellige oplande ske gennem en struktureret og systematisk tilgang, hvilket ydermere vil skabe et grundlag for prioritering af tiltag.

1.6 Målgruppe

Målgruppen for dette projekt er typisk forsyningsvirksomheder. De har det direkte ansvar for, at vores afløbssystemer og renseanlæg fungerer tilfredsstillende. En tæt involvering af Aarhus Vand har derfor været afgørende for at sikre fokus på forsyningselskabernes behov og give vinkler på løsninger af problemstillingen. Derudover er myndigheder også en målgruppe, da projektet vil bidrage til et fokus på uvedkommende vand og behovet for standarder vedrørende fjernelsen af uvedkommende vand.

Projektets resultater, løsninger og læring kan bringes til udlandet, hvor udfordringerne med uvedkommende vand er tilsvarende. Projektet er ikke baseret på danske standarder eller dataformater og kan derfor umiddelbart anvendes uden for den danske grænse. Løsningerne vil blive demonstreret for udenlandske besøgende i Danmark og forsøgt kommercialiseret i andre lande såsom England, Tyskland og Norge.

Konsortiet har formidlet projektet på Dansk Vand Konference i 2019 og 2020 med interesse fra nationale vandselskaber. Desuden er projektet optaget på IWA-konferencen i København, som grundet Covid-19 er udskudt til foråret 2021.

1.7 Projektbeskrivelse

I Drainman er uvedkommende vand opdelt i følgende komponenter, da det forventes at der vil være stor forskel i investering, konsekvens og løsningsprincip til fjernelse af de enkelte komponenter:

- Grundvandsindsivning
- Langsom regnbetinget indsigning
- Hurtig regnbetinget påvirkning

hvor både den langsomme og den hurtige regnbetingede påvirkning er varierende afhængig af oplandet.

I nedenstående tabel er kort beskrevet, hvilken påvirkning de forskellige komponenter af uvedkommende vand har i separate spildevandssystemer, og i hvilken grad det er muligt at fjerne disse komponenter. Denne viden understreger vigtigheden af og ønsket om en dekomponering af uvedkommende vand.

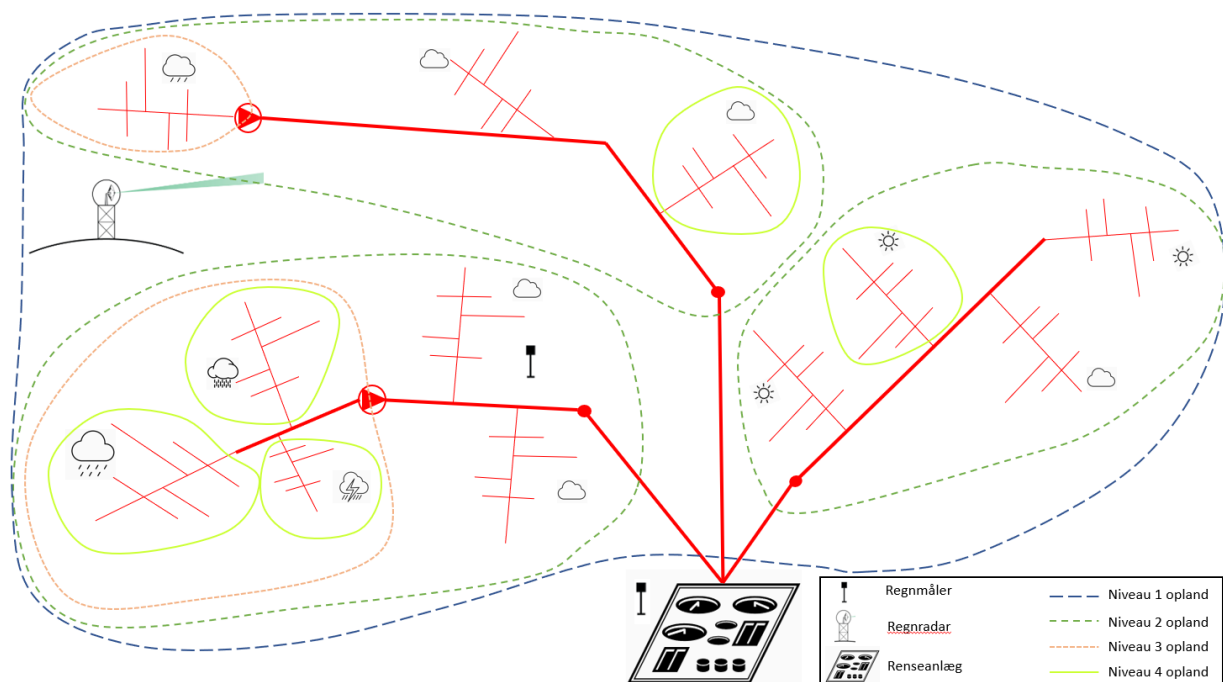
TABEL 1.1: Komponenter af uvedkommende vand, deres konsekvenser og mulige tiltag.

Komponent	Hydraulisk og stofmæssig påvirkning	Konsekvens for	Problemstillinger
Grundvand	Større udledte stof- og vandmængder fra renseanlæg	Renseanlægsdesign og årlige driftsudgifter til rensning og transport	Svært og dyrt at fjerne, da det ofte er store områder inkl. private stik, som bidrager med grundvandsindsivning.
Langsom regnbetinget	Større vandmængder til renseanlæg, bassiner, overløb og pumpestationer i op til flere døgn. Større udledte stof- og vandmængder efter en regnhændelse	Renseanlægsdesign og årlige driftsudgifter til rensning og transport. Bassindesign.	Kan være punktkilder, som er mulige at fjerne, hvis kilden kan lokaliseres. Diffus indsigning gennem ledninger med dårlig fysisk tilstand – svært at finde og kan stamme fra private stikledninger. Kan være afstrømning fra grønne arealer - tiltag og omfang stadig ukendt.
Hurtig regnbetinget	Maks. peak øges. Større vandmængder til bassiner, overløb og pumpestationer. Større udledte stof- og vandmængder i forbindelse med regn.	Design af ledninger. Design af bassiner. Design af overløb. Design af pumpestationer.	Kan være punktkilder, som er mulige at fjerne hvis kilden kan lokaliseres. Kan være afstrømning fra grønne arealer - tiltag og omfang stadig ukendt.

I Drainman arbejdes med dekomponeringen af uvedkommende vand på forskellige oplandsniveauer henholdsvis:

- Niveau 1: Renseanlægsopland
- Niveau 2: Hovedstrukturen for afløbssystemet til renseanlægget
- Niveau 3: Pumpestationsoplande
- Niveau 4: Detailoplande

Disse niveauer er illustreret på nedenstående figur.



FIGUR 1.1 Opdeling af afløbssystemet i oplande og deloplande samt opsamling af regndata.

Tesen er, at dekomponering kan ske på Niveau 1 for at kortlægge, hvorvidt der er problemer med uvedkommende vand på overordnet niveau. Niveau 2 vil kortlægge, om uvedkommende vand kan lokaliseres til delområder på renseanlægsniveau og om det er samme komponent, som er problemet i alle oplandene. Niveau 3 er en dekomponering på pumpestationsoplande i de aktuelle områder udpeget fra Niveau 2. På Niveau 4 kan resultaterne fra Niveau 3 detaljeres ude på de enkelte ledningsstræk, hvorved den nøjagtige strækning påvirket af uvedkommende vand kan udpeges og en målrettet indsats kan udføres. På Niveau 4 analyseres systemets fysiske indeks samt realtidsdekomponering af hydraulisk flow.

1.7.1 Set-up i projektet

Projektet består af tre faglige arbejdsplaner med forskellige formål; dog med afhængigheder mellem arbejdsplanerne. En arbejdsplan indeholder opstillinger og validering af sensorer i udvalgte ledningsstrækninger, hvor data fra disse, kombineret med data fra pumpestationer og øvrige målere, skaber et hydraulisk overblik. Dekomponering er også resultatet af den anden arbejdsplan ved brug af fire forskellige modeller til identifikation af uvedkommende vand i en struktureret tilgang til oplandet. I den sidste arbejdsplan er målet at skabe en model, som kan anvendes til overvågning, design og varsling af det uvedkommende vand på baggrund af resultater fra de øvrige arbejdsplaner.

Projektet har arbejdet med opstilling af sensorer til måling af flow i gravitationsystemet i Viby-oplandet og analyseret data herfra. Ydermere er der gennem projektet undersøgt muligheden for at lave et nyt koncept for en flowmåler i gravitationsledninger med det formål at reducere flere af ulemperne ved anvendelse af måleudstyr i afløbssystemer. Partnere i projektet har arbejdet med flere metoder til dekomponering af uvedkommende vand for at kunne arbejde med, hvor og hvad der forårsager uvedkommende vand i afløbssystemet. Derudover er der gennem projektet skabt en model til overvågning og varsling af det uvedkommende vand.

Oprindeligt var et mål med projektet at få realiseret konkrete anlægsprojekter med afsæt i de opnåede resultater. Det har ikke været muligt at gennemføre dette inden for projektets tidsramme.

1.8 Mål og succeskriterier

TABEL 1.2: Følgende mål er formuleret som de vigtigste i Drainman-projektet

Projektets mål	Succeskriterier
Overordnet projektledelse, styring og følgegruppemøder, løbende rapportering	Projektet fungerer tilfredsstillende og løser opståede problemer løbende undervejs.
Bestemmelse af flow i separate spildevandssystemer, såvel i perioder med lille som stort flow. Muligheden for en automatisering af målingerne.	At kunne kvalificere, hvordan vi bedst måler flow, såvel ved lille som stort flow.
Muligheden for at forstå de forskellige bidrag og foretage en dekomponering af flowdata, herunder en spatial placering af disse.	At kunne kvalificere andelen af uvedkommende vand fra forskellige kilder, fx befæstede/ikke-befæstede flader, grundvandsbidrag, fejlkoblinger mv.
At etablere et holistisk beslutningsstøtteværktøj som input til forsyningens øvrige planlægningsværktøjer til strategisk planlægning og til udpegning af efterfølgende anlægsprojekter for at minimere mængden af uvedkommende vand og andre uønskede påvirkninger på afløbssystemet og renseanlæggene.	At opbygge et beslutnings- og varslingsværktøj, der løbende kan justeres ift. dynamiske ændringer i vandkredsløbet (ændret afstrømning i et område).

2. Arbejdspakke 2

Målsætningen for arbejdsopgave 2 er at skabe et reeltids-hydraulisk flow- overblik for Viby-oplandet og bidrage til, at Aarhus Vand kan fjerne det uvedkommende vand fra spildevandssystemer på et oplyst grundlag.

2.1 Indledning

Ambitionen med arbejdsopgave 2 er at vurdere forskellige metoder til måling af reeltidsflow for at analysere og dekomponere hydraulisk flow i søgen efter uvedkommende vand. Flowmålingsmetoderne er vurderet i forhold til præcision, indkøbspriser og driftsomkostninger. Denne vurdering fandt sted i forår/efterår 2019 som input til udvælgelsen af måleudstyret til målekampagne for arbejdsopgave 3.

Med udgangspunkt i de demonstrerede målemetoder har projektpartnere lavet en prototype til en fremtidig flow-målestation med et nyt målesystem, der giver præcise målinger og lavere driftsomkostninger.

2.2 Mål med Arbejdspakke 2

Gennem projektet ønskes en kvalificering af, hvordan hydraulisk reeltidsflow kan måles præcist og effektivt.

TABEL 2.1: Mål med arbejdsopgave 2.

Projektets mål	Succeskriterier
Bestemmelse af flow i separate spildevands-systemer, såvel i perioder med lille som stort flow. Muligheden for en automatisering af målingerne.	At kunne kvalificere, hvordan vi bedst måler flow, såvel ved lille som stort flow.

Projektets mål er nedbrudt til følgende delkomponenter:

- En strukturel opdeling af oplandet med tilhørende identifikation af målepunkter
- Et måleprogram til validering af forskellige typer målinger af det hydrauliske flow i realtid i forhold til præcision og effektivitet
- Validering af måleusikkerheder på det hydrauliske flow i realtid, givet usikkerheder ved informationer om de fysiske dimensioner i et afløbssystem
- Et designarbejde vedrørende fjernelse af ulemperne ved kendte målemetoder til estimering af det hydrauliske flow i realtid for en fremtidig målestation.

2.3 Resultater

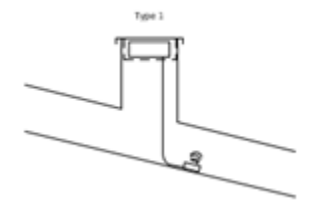
2.3.1 Valg af måleudstyr

For at validere forskellige flowmålere identificerede projektet en strækning i Viby, hvor det var muligt i 3 på hinanden følgende brønde at opsætte 3 forskellige typer af flowmålere.

De 3 typer:

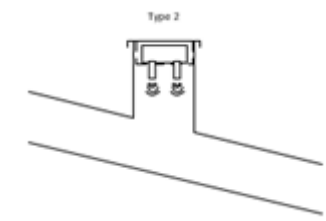
- Type 1** Et måleudstyr, der beregner hydraulisk flow ved hjælp af en ultralyd, som udsendes fra et sensormodul, placeret i afløbsledningen. Dette udstyr måler niveau og hastighed til beregning af det hydrauliske flow.
- Dette måleudstyr kræver ikke mange informationer om de fysiske dimensioner udover tværsnit- og areal.
- Normalt foretrækkes sensoren placeret opstrøms målebrønden, men af praktiske hensyn er nedstrøms placering valgt. Det er vurderet, at placeringen ikke vil have indflydelse på metodens resultater.

Illustration 1



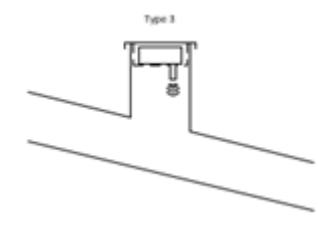
- Type 2** Et måleudstyr, der beregner hydraulisk flow ved hjælp af ultralyd, som udsendes fra et sensormodul placeret i toppen af en brønd. Dette udstyr måler niveau og hastighed til brug i beregning af det hydrauliske flow.
- Dette udstyr kræver en del informationer om de fysiske dimensioner af ledning og brønd, hvori udstyret er installeret. Såsom tværsnit, areal, hældning på opstrøms- og nedstrømsliggende ledning, sensorplacering samt informationer om bunddimensionerne i brønden.

Illustration 2



- Type 3** Et måleudstyr, der beregner hydraulisk flow ved hjælp af ultralyd, som udsendes fra et sensormodul placeret i toppen af en brønd. Dette udstyr måler niveau til brug i beregning af det hydrauliske flow.
- Dette udstyr kræver en del informationer om de fysiske dimensioner af ledning og brønd, hvori udstyret er installeret. Såsom tværsnit, areal, hældning af opstrøms- og nedstrømsliggende ledning, sensorplacering, samt informationer om bunddimensionerne i brønden.

Illustration 3



Evalueret af de 3 forskellige udstyr til måling af hydraulisk flow gennem flere sammenligninger viser ikke et entydigt billede af et måleudstyr som værende klart bedst. I forhold til økonomi – både anskaffelses- og driftsomkostninger – er måleudstyr type 1 klart dyrest, mens den prismæssige forskel på type 2 og 3 ikke er markant.

I forhold til hydraulisk flowestimering viser sammenligningerne forskel mellem måleudstyret ift. usikkerhed i estimatet og kompetencer til beregning af flow i ledninger ved hjælp af vandniveau i brønden. De 3 typer af måleudstyr havde, ved lavt flow, den samme usikkerhed i målingerne, mens usikkerhederne steg mere på type 2 og 3 end type 1 i situationer med højt flow. Yderligere havde måleudstyr type 3 en del outliers i målekampagnen, som resulterede i stor variation i forhold til det hydrauliske flowestimat.

Gennem målekampagnen opsamlede projektet også en del erfaringer om, hvorledes vandniveauer i brønde kan bruges i Manning-formlen til beregning af flow, og hvorledes data outliers kan påvirke brugen af Manning-formlen. Disse erfaringer er beskrevet i bilag AP2-1 som inspiration til andre, der ønsker at anvende Manning-formlen til beregning af flow.

Yderligere har målekampagnen pointeret vigtigheden af udformningen af flow i brønden. I projektet blev konklusionen, at brønden helst skulle være med lige gennemløb og uden sidegrene/stikledninger. Disse designkrav øgede sikkerheden i det hydrauliske flowestimat.

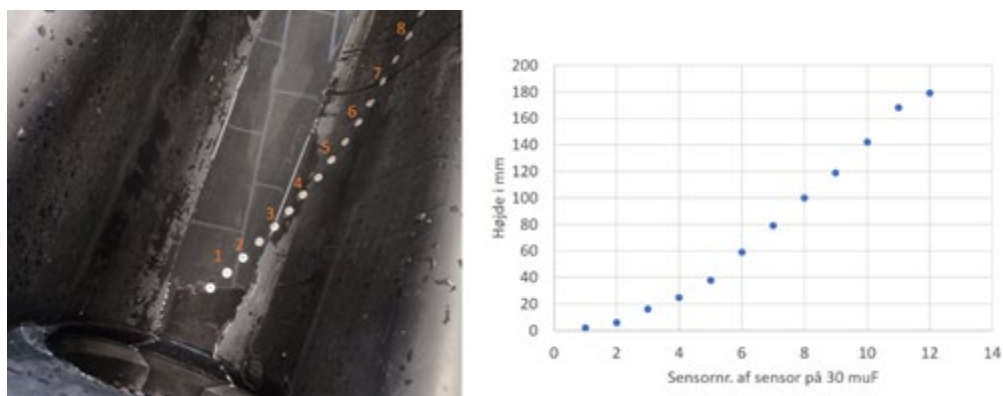
Projektpartnerne valgte at arbejde videre med type 3- sensoren til måling af flow i 7 lokationer i Viby-oplandet. Type 3-sensoren er billigst i anskaffelses- og driftsomkostninger, og kompetencerne til anvendelse og tilpasning af Manning-formlen gav den ønskede estimatsikkerhed ved lavt flow og en acceptabel usikkerhed ved højt flow i brøndene. For yderligere detaljer henvises til bilag AP2-2 og AP2-4.

2.3.2 Udvikling af ny målemetode

I projektet har projektpartnerne arbejdet med et koncept til måling af hydraulisk flow i en brønd med det formål at reducere omkostninger til måleudstyr og arbejdsindsatsen med at vedligeholde måleudstyr i et aggressivt miljø og uforudsigeligt spildevandsflow. I det følgende beskrives konceptet for brønden.

I brøndens bund placeres 12 kapacitanssensorer (Figur 1). Kapacitans i luft og vand er meget forskellig. Derved kan vandstanden i brønden estimeres ved at måle kapacitans i forskellige afstande over brøndbunden. Når sensorer ligger over vandspejl, måler de værdier omkring 200 μF eller højere. Når vandspejlet ligger på samme højde, falder den målte værdi til under 60 μF , afhængig af vandets temperatur og ledningsevnen. Figur 1 viser vandstanden i brønden på tidspunktet, hvor sensoren i brønden måler værdier på 30 μF . Forsøget blev udført med vand med en ledningsevne på 490 $\mu\text{S}/\text{cm}$ og en temperatur på 20.4 °C. Når sensoren er helt under vandspejl, falder den målte værdi til under 20 μF .

Konceptet er efter Drainmans afslutning ved at blive bygget som prototype, der skal installeres på en test site i Aarhus Vands opland. For yderligere detaljer henvises til bilag AP2-3.



FIGUR 2.1 (Venstre) Brønden med sensorer i bunden. Nummeret svarer til sensornummer, som findes på grafen. (Højre) Graf, som viser højde af vandspejl over bunden (Y-akse), når målingen fra den bestemte sensor (X-akse) falder under 30 μF .

2.4 Diskussion og perspektivering

Generelt er flow i Drainman-projektet beregnet med Manning-formlen. På baggrund af beregnet flow samt data indhentet i første halvår af 2019 er der lavet en række analyser af, hvilke parametre der er mest kritiske enten at kende præcist eller minimere udsving på i en sensitivitetsanalyse. De undersøgte parametre er:

- Diameter af ledning, opstrøms og nedstrøms målebrønden
- Fald på ledning, opstrøms og nedstrøms målebrønden
- Sensorhøjde og dens nøjagtighed
- Korrekt Manning-tal
- Udformning af bundløb i brønden

Rørdiameteren af spildevandsledningen, opstrøms og nedstrøms målebrønden, er af stor betydning for nøjagtigheden af det beregnede flow. Især ved små ledningsdimensioner kan der beregnes stor variation i flow, hvis der anvendes forkert ledningsdimension. Det anbefales, at flowberegninger hovedsageligt anvendes ved større ledningsdimensioner.

Fald på ledninger opstrøms og nedstrøms målebrønden er en parameter, som er registreret i forbindelse med etablering eller er opmålt efterfølgende. I de tilfælde, hvor der er usikkerhed om en lednings fald, bør denne opmåles, da projektet har vist, at netop faldet er betydende for det beregnede flow. Er det ikke muligt at lave en fysisk opmåling, bør faldet overestimeres, da det giver mindst variation i flowberegningerne.

Korrekt højde af den installerede niveaumåler har stor betydning for nøjagtigheden af flow med Manning-formlen. Selv en variation i enkelte centimeter kan give en variation på op til 25% i flow.

Manning-tal for systemet er, naturligvis, af stor betydning for det beregnede flow. Der er set på, om et under- eller overestimat er den rette vej at gå. Ved små værdier for Manning-tallet er det bedst at lave overestimer, da selv små underestimer giver stor variation i det beregnede flow.

Det er desuden beregnet, at en variation i formen af selve bunden er vigtig. Der er lavet en sammenligning mellem en cirkulær form og en kvadratisk form og påvist en betydelig forskel i det beregnede flow. Som forventet vil en sikring af vandgennemstrømning gennem regelmæssige vedligehold i form af fjernelse af fyldstof i bunden af ledningen have stor betydning i forhold til korrekte målinger af flow.

En del af at måle flow i brønden er bestemt af flere faktorer, bl.a. lagringskapacitet af data (begrænset af tilgang til strøm, da datatransmission er krævende i forhold til strømforbrug) og antal målinger pr. tidsenhed. Opløsning af niveaumålinger er ofte den faktor, der justeres for at minimere driften på måleenhederne. Den udførte sensitivitetsanalyse viste, at en målefrekvens i de valgte brønde kunne ligge mellem 1 sekund og 1 minut uden meget store variationer i flowberegninger. Dette er af stor betydning for både krav til udstyr (især batteri, hvor det er eneste mulighed for installation til strøm) og vedligehold.

3. Arbejdspakke 3

3.1 Indledning

I denne arbejdspakke har projektgruppen tilpasset og afprøvet fire forskellige metoder til dekomponering. Den ene metode er en såkaldt "lumped, conceptual model concept", som på simpel vis reproducerer de fysiske processer for de tre komponenter. Den anden metode er en Machine Learning model, der bliver trænet på 2 års historiske data og valideret på det seneste års data. Den tredje er en statistisk dekomponering, som anvender eksisterende flowmålinger. Den fjerde er en realtidsdekomponering af flow. De fire metoder er kort beskrevet nedenfor, ligesom forudsætninger og resultater sammenlignes.

3.2 Mål med arbejdspakke

Projektmålene, som er behandlet i Arbejdspakke 3, ses i Tabel 3.1.

TABEL 3.1: Oversigt over projektmål, der er behandlet i Arbejdspakke 3.

Projektets mål	Succeskriterier
Muligheden for at forstå de forskellige bidrag og foretage en dekomponering af flowdata, herunder en spatial placering af disse.	At kunne kvalificere andelen af uvedkommende vand fra forskellige kilder, fx befæstede/ikke-befæstede flader, grundvandsbidrag, fejlkoblinger mv.

3.3 Metoder

3.3.1 RDI model – Rainfall Dependant infiltration, analyse og realtid

Denne metode, som har været anvendt i MOUSE og MIKE URBAN-sammenhæng i mere end 30 år, bygger på en forsimplet fysisk model, hvor de forskellige flowkomponenter bliver repræsenteret gennem forskellige magasin-voluminer/tærskelværdier og tidskonstanter. Styrken ved denne model er, at den er enkel at sætte op for et givet opland og enkel at kalibrere. Basalt set er der 6 konstanter, som skal justeres til "Best fit". Kalibreringen kan semi-automatiseres, og beregningerne er hurtige.

For at metoden skal give pålidelige resultater hen over sæson- og årstidsvariationer er det nødvendigt med relativt lange tidsserier for at få en god kalibrering. Erfaringerne viser, at kontinuerede tidsserier af sammenhængende værdier for regn af afstrømning på mindst 2 år giver gode resultater. Kortere kalibreringstidsserier (fx 3 måneder) kan stadig godt give rimelige resultater, men større årstidsvariationer i fx grundvandsindsivning vil ikke blive korrekt beskrevet. Modellen og resultater er beskrevet i detaljer i bilag AP3-2. RDI-modellen kan anvendes både til analyse og i realtid. Hvis modellen skal køre i realtid, kræver det flow- og nedbørsdata i realtid.

3.3.2 Machine Learning - data analytisk model, analyse og realtid

Denne metode beregner i udgangspunktet en række parametre, som efterfølgende anvendes til løbende at prædikere fordelingen af totalflowet. En mere detaljeret beskrivelse af metoden findes i bilag AP3-4. Machine Learning modellen kan anvendes både til analyse og i realtid.

3.3.3 Statistisk dekomponering

Baggrunden for denne metode er at bruge eksisterende flowmålinger til at opnå en fordeling af afstrømning i afløbssystemet i dets grundkomponenter. Metoden kan bruges på alle resultater fra elektromagnetiske flowmålere, ultralydsmålere eller f.eks. Dryp-sensorer. Metoden kræver dog en minimumsmåleperiode for at kunne dekomponere de enkelte flowkomponenter. Der skelnes mellem spildevand, regnvand, indsivning og uvedkommende

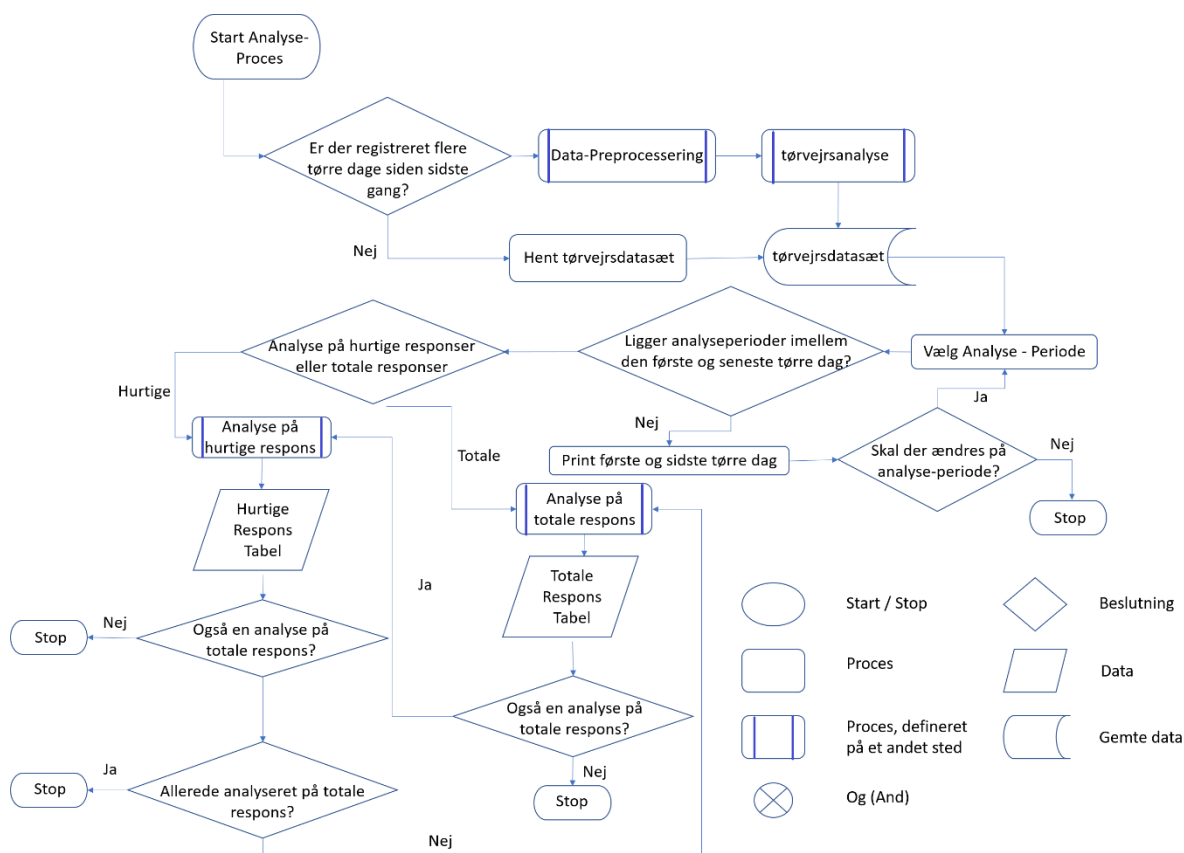
vand (fejlkoblinger, afstrømning fra f.eks. grønne arealer). Det uvedkommende vand kan deles i en hurtig komponent og en langsom komponent.

Den grundlæggende antagelse er, at flowet til enhver tid består af summen af ovenstående:

$$Q_{\text{m\AA}lt} = Q_{\text{spildevand}} + Q_{\text{regnvand}} + Q_{\text{uvedkommende,hurtig}} + Q_{\text{uvedkommende,langsom}}$$

Nøglen til at dekomponere flow er at betragte flowet sent om natten i et tørvejrdsdøgn (gerne efter flere tørvejrdsdøgn) og antage, at spildevandsflowet er tæt på 0. Her vil flowet alene bestå af indsyning. Ved efterfølgende at fratrække indsyning af hele tørvejrdsdøgnet får man spildevandskomponenten. Regnvandskomponenten findes ved at lave tidsserieanalyse af restvandføringen, når nedbørsmålere indikerer nedbør.

Nedenstående Figur 3.1 viser det primære flowdiagram for denne analyse.



FIGUR 3.1. Flowdiagram for statistisk adskillelse af flowmåling i hovedkomponenter

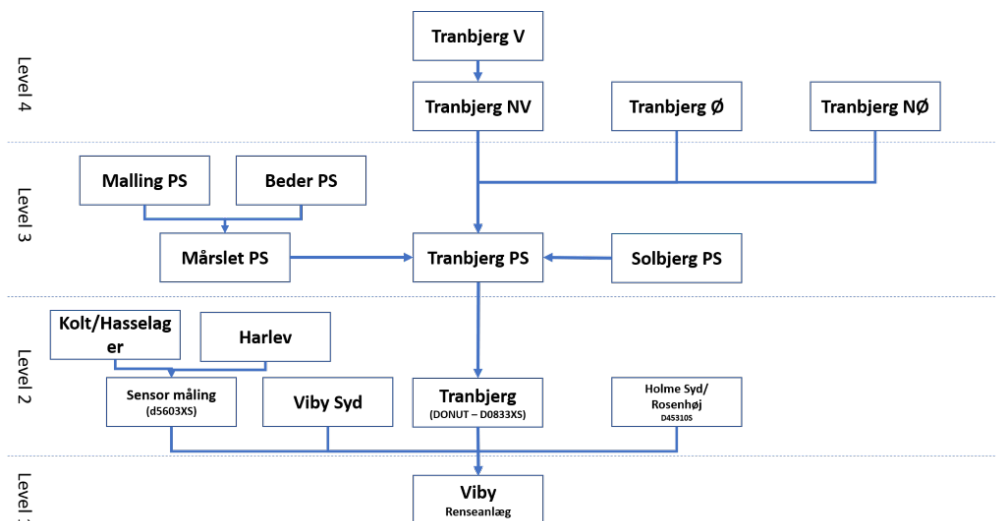
Metoden er eksemplificeret i bilag AP3-4.

3.3.4 Realtid dekomponering af målt flow

I denne metode, baseret på målinger af flow i gravitationsbrønden fra arbejdsplan 2 og flow fra Aarhus Vands pumpestationer, er det overordnede mål en realtime dekomponering af spildevandsflow i Viby-området, hvor der opnås en adskillelse af normalt spildevand og to andre fraktioner: spildevand blandet med regnvand og spildevand blandet med indsyende grundvand. En adskillelse i disse fraktioner vil gøre det muligt at lave en målrettet indsats mod uvedkommende vand i en specifik del af netværket. Spildevandskomponenten sættes lig med "solgt vand" for et givet område. Der kan være en mindre variation mellem dette tal og det faktisk afledte spildevand, da der kan være et tab til f.eks. havevanding eller brandslukning. Overordnet er det dog et godt mål for produceret spildevand. Det kalder vi dimensionsgivende flow. Indsyende vand adskilles i regnbetinget og grundvandsbaseret indsyning. Der er foretaget regnmålinger, som sammen med et intensitetskriterium kan definere et tidsrum, hvor flow

er fra regnbetinget afstrømning. Hvis der ikke er betingelser for at definere regnbetinget flow, kategoriseres flow som grundvandsindsivning. Desuden kan der foretages en sammenligning af dimensionsgivende flow og det målte flow efter en lang tørvejrperiode, hvilket vil give et godt billede af indsivende grundvand.

For at udvide den beskrevne tilgang fra et enkelt område til et helt netværk er der i projektet foretaget en opdeling af oplandet til Viby Renseanlæg, vist i Figur 3.2.



FIGUR 3.2 Hierarkisk struktur af oplandet til Viby renseanlæg

Ved at måle flow i enkelte punkter på alle de skitserede strenge kan der med dekomponering laves et skematisk overblik, der viser, hvor de relative dele af uvedkommende vand kommer ind i netværket, enten i tørvejr som indsivende grundvand eller som hurtig indsivning under regn. Målinger af flowmetoden er beskrevet i afsnit 2, ved brug af målinger foretaget af Aarhus Vand med flowmålere i pumpestationer og med Dryp-sensorer i netværket, som ses i figur 3.2.

Et væsentligt begreb for forståelse af beregninger i kommende afsnit er infiltrationsfaktor. Den er givet som:

$$\text{Infiltrationsfaktor} = \text{målt flow} / \text{dimensionsgivende flow}$$

Ved at beregne infiltrationsfaktoren for et opland eller for hele netværket kan effekten af f.eks. grundvandsindsivning eller en regnbyge relativt sammenlignes.

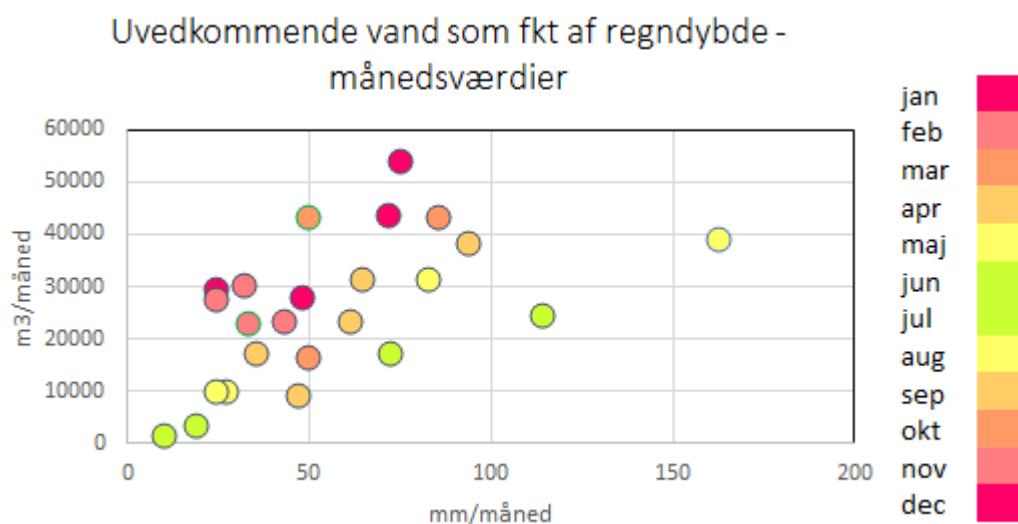
3.4 Resultater

I det følgende beskrives resultaterne af de fire modeller.

3.4.1 RDI model

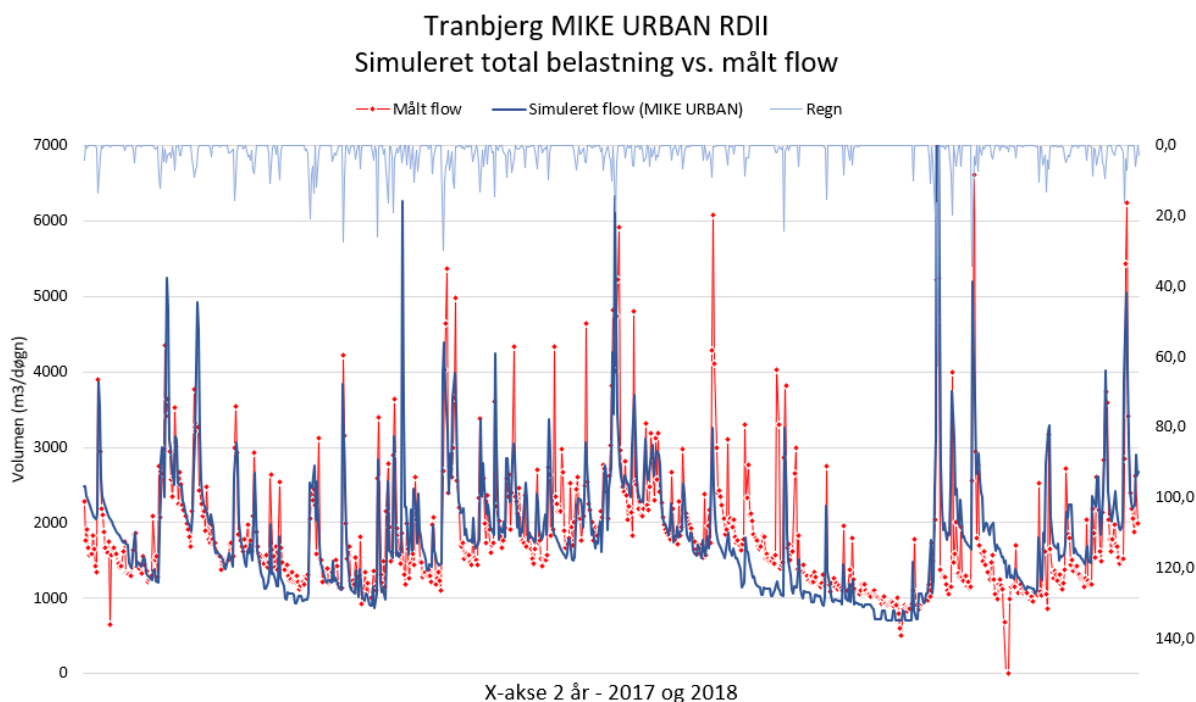
Modellen beregner flowdekomponeringen med høj tidsopløsning, typisk på timebasis. Herved er det muligt at se effekt og fordeling på enkelthændelsesniveau, men også at aggregere værdierne til fx måneds- eller årsværdier.

Modellen inkluderer "hydrologisk" historie, som især har betydning for de langsomme effekter. En sammenligning mellem nedbør og afstrømning på månedsbasis viser stor spredning, se Figur 3.3. Der er en rimelig entydig sammenhæng mellem mængden af uvedkommende vand og regn i sommerhalvåret, mens spredningen er betydeligt større om vinteren.



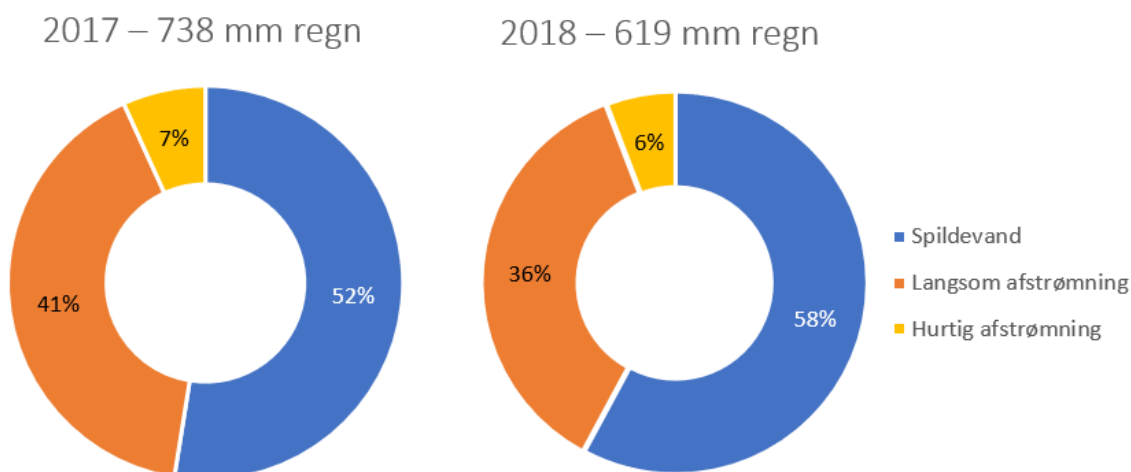
FIGUR 3.3 Sammenhæng mellem nedbør og afstrømning (pr måned) fra Tranbjerg for 2-årig periode 2017-2018.

Figur 3.4 viser en tidsserie for den toårige kalibreringsperiode for den totale vandbalance, med sammenhængende præsentation af målt nedbør, målt afstrømning og beregnet afstrømning. Det ses, at modellen fint matcher sæsonvariationerne, typisk fra den langsomme påvirkning, inkl. grundvand. Der er mindre god overensstemmelse for flere af spidsbelastningerne. Dette kan delvist forklares med modellens simple opbygning, men nok i endnu højere grad med, at de enkelte målte ekstremhændelser ikke nødvendigvis er faldet over oplandet. Desuden er der, som beskrevet i bilag AP3-2, sandsynligvis i sensommeren 2018 et mindre godt match. Det ser ud til, at den langsomme afstrømning klinger langsommere af i modellen end de målte værdier.



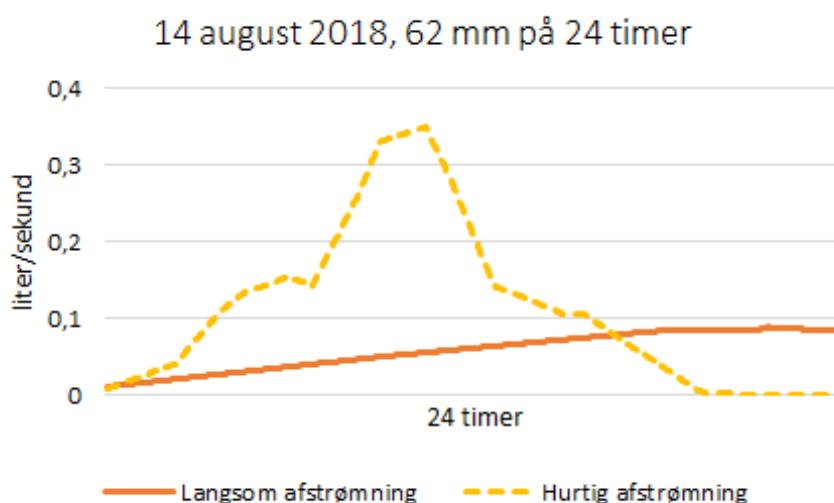
FIGUR 3.4 Sammenligning målt/beregnet af døgnværdier for afstrømning for hhv. 2017 og 2018

Den samlede akkumulerede nedbør i hhv. 2017 og 2018 er 738 mm og 619 mm. Denne forskel i årsnedbør (~20%) har naturligvis en direkte effekt på den relative mængde af uvedkommende vand. Således udgør uvedkommende vand 6 procentpoint mere i det våde år 2017, se Figur 3.5.



FIGUR 3.5 Beregnet fordeling af årlige værdier for afstrømning for hhv. 2017 og 2018

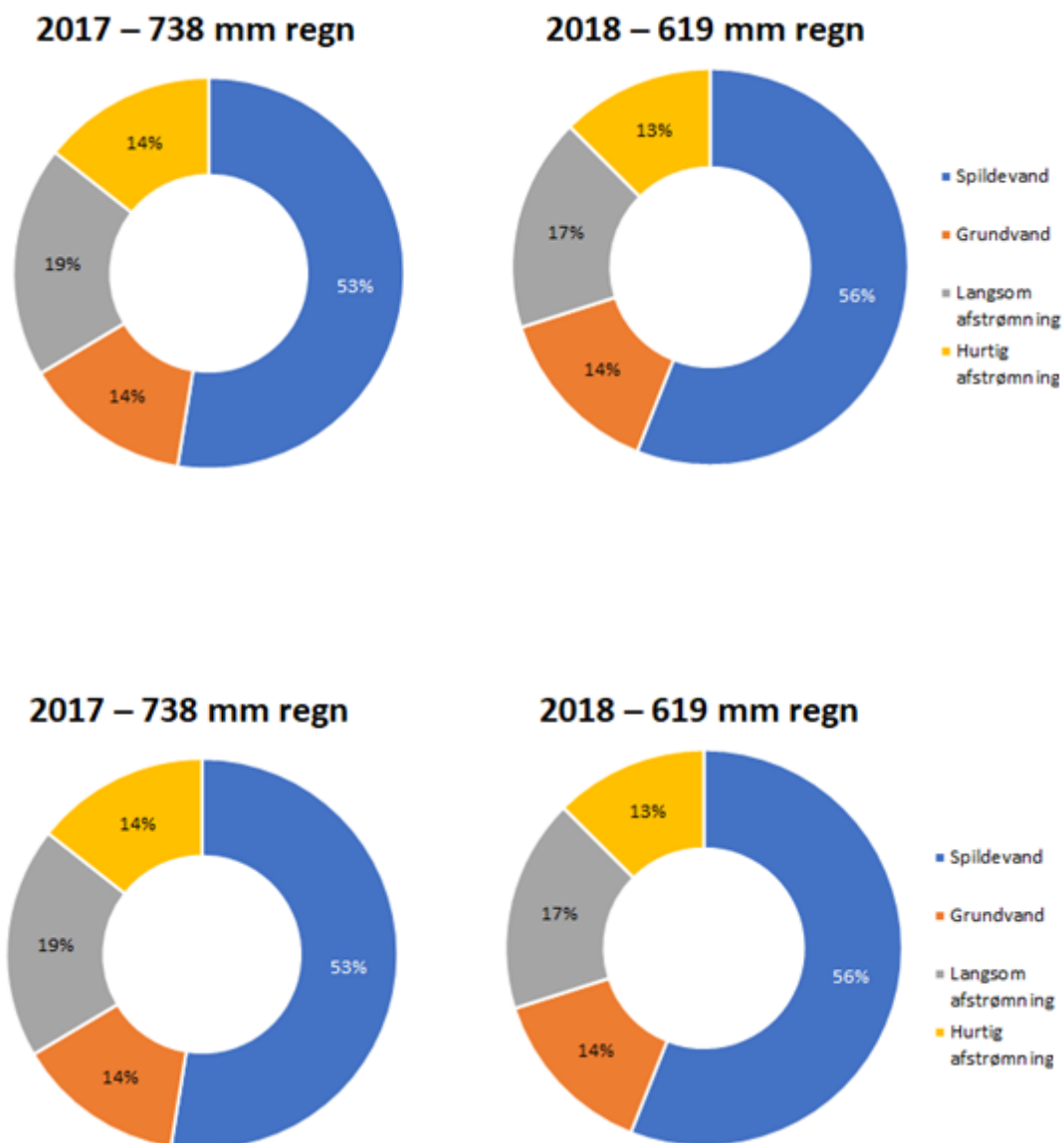
RDI-modellen beregner fordelingen med høj tidsopløsning, typisk 1 time. Denne høje tidsopløsning gør det muligt at se, hvordan flowfordelingen ser ud på enkelthændelsesniveau. Figur 3.6 viser netop, hvordan den hurtige afstrømning kan være dominerende for kraftige regnhændelser, her illustreret med resultater fra det mest regnfulde døgn i 2018, den 14. august, hvor der faldt 62 mm på 24 timer. Bidraget fra den hurtige afstrømning er flere gange større end det langsomme bidrag. Det langsomme regnvandsbetingede bidrag vil fortsætte i flere dage efter hændelsen og kan ende med at give et større volumenbidrag end det hurtige bidrag.



FIGUR 3.6 Beregnet fordeling mellem hurtig og langsom afstrømning for kraftig regnhændelse

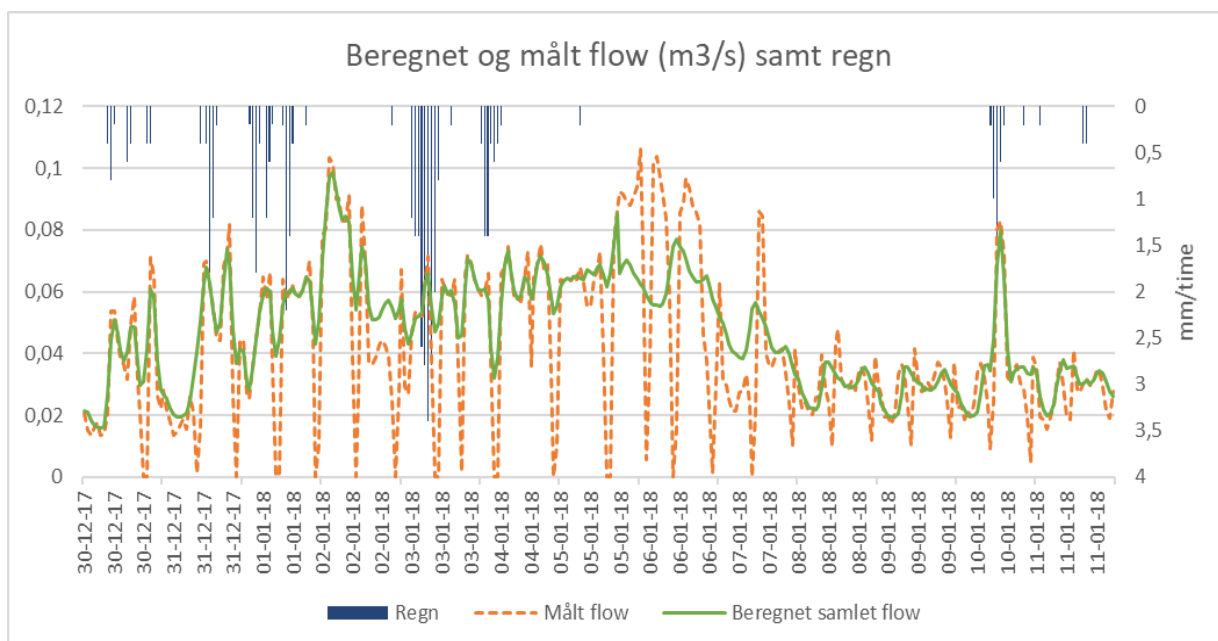
3.4.2 Machine Learning beregningsresultater

I det følgende vises nogle få udvalgte resultater fra kalibreringsperiode 2017-2018, inkl. kommentarer. Flere resultater er vist i bilag AP3-3. Machine learning modellen beregner flowfordelingen mellem spildevand, indsivning fra grundvand, langsom regnvandspåvirket indsivning og hurtig regnvandspåvirket indsivning. Beregningerne viser bl.a. en årstidsvariation på en faktor tre for grundvandsbidraget. De beregnede, akkumulerede værdier over den toårige periode er vist i Figur 3.7.



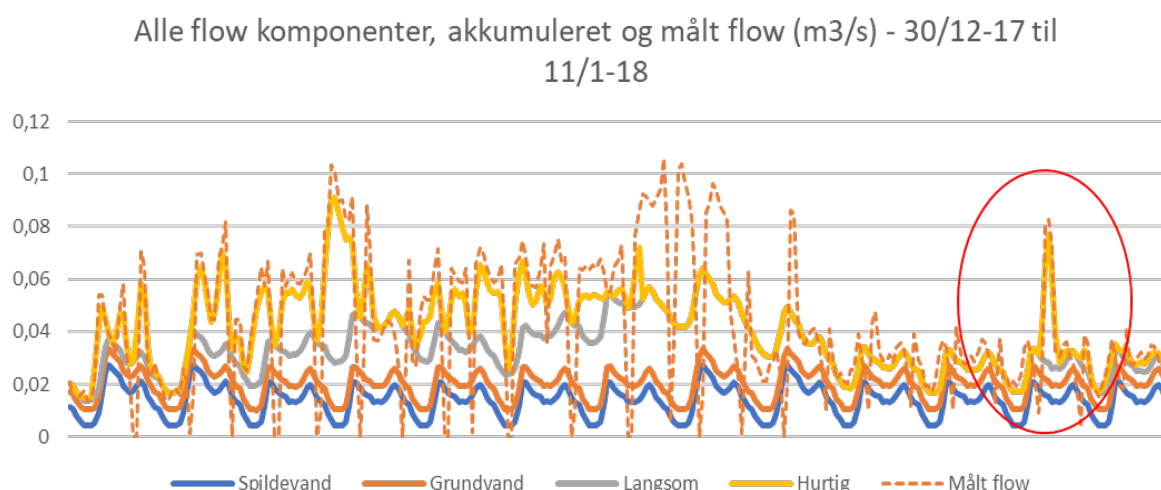
FIGUR 3.7 Flowfordelingen for hhv. 2017 og 2018

I Figur 3.8 er der zoomet ind på en 2-ugers periode fra slut december 2017 til midt januar 2018. Figuren viser målt nedbør, målt og beregnet afstrømning. Det målte flow "går" i 0 et antal gange. Ifølge Aarhus Vand må der være tale om fejl i måledata, idet styringen af pumpen sikrer, at den ikke holder stille i en time ad gangen. Desuden indikerer figuren også, at der formentlig mangler registrering af regndata omkring den 6/1, hvor det målte flow stiger, og hvor Machine Learning modellen prøver at følge med, men tydeligvis (og naturligvis) ikke kommer helt med. Den 10/1 er der igen registreret en regnhændelse, som eftervises tilfredsstillende af ML-modellen.



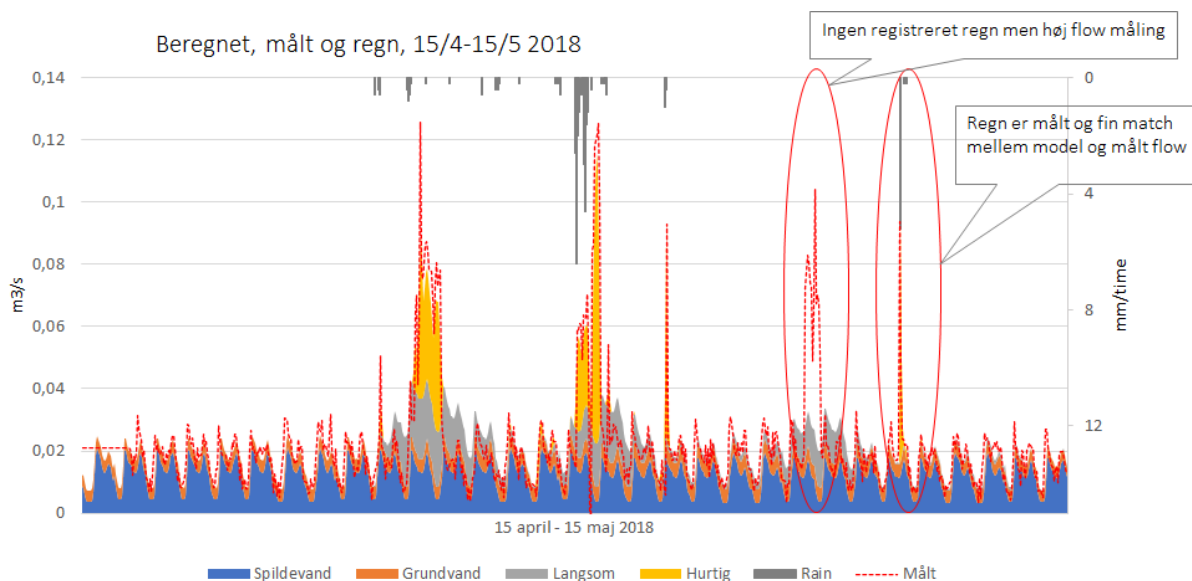
FIGUR 3.8 Sammenligning mellem målt og beregnet flow i perioden 30/12-17 til 11/1-18

For den samme periode viser Figur 3.9 fordelingen mellem de 4 komponenter, hvor det er tydeligt, at den hurtige afstrømning er dominerende for regnhændelsen den 10. januar, markeret med rød oval.



FIGUR 3.9 Komponentfordeling, hvor rød markering viser match med målt hændelse d. 10 januar 2018

Et andet eksempel på, hvordan modellen i en periode viser rigtig god overensstemmelse med måledata, indtil der kommer en "uforklarlig" stigning i det målte flow, er vist i Figur 3.10. Efter en tørvejrperiode på 9 dage (15-24 april 2018), bliver der målt regn og stigning i flow, hvilket reflekteres tilfredsstillende i modelresultaterne. I midten af perioden bliver der registreret en del regn, og modellen afspejler fint det målte flow. Den 7. maj er der målt en kraftig stigning i flow, men ikke den tilhørende regn. Uanset årsagen til flowstigningen kan modellen ikke "følge" med; der er ikke målt regn til at generere en stigning i den langsomme og hurtige afstrømning. Den mest sandsynlige forklaring er, at en nedbørshændelse over oplandet ikke er blevet registreret på regnmåleren. Da der 3 dage senere, den 10. maj, igen bliver registreret regn, følger modellen fint med. Disse eksempler på dårlig overensstemmelse kan sandsynligvis reduceres, hvis den enkelte regnpunktmåling suppleres med radarregn-data, en facilitet Aarhus Vand forventer at have reeltidsadgang til i løbet af det kommende år.

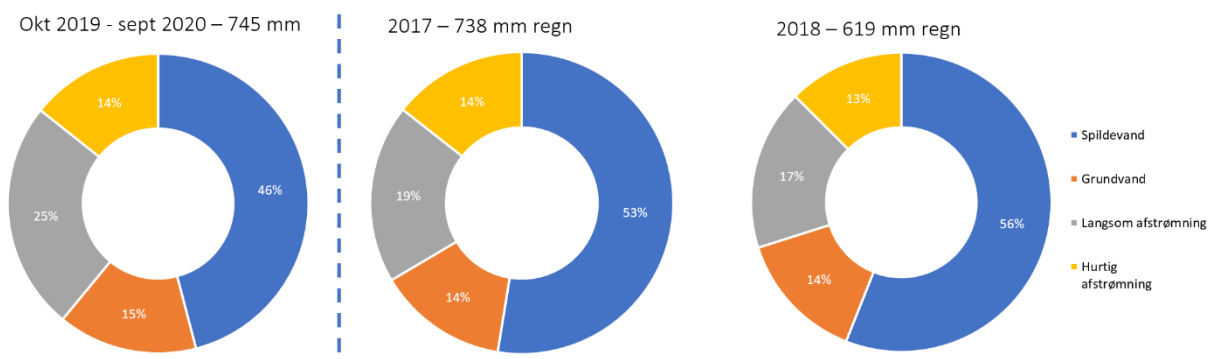


FIGUR 3.10 Sammenligning mellem målt og beregnet for en given periode, hvor der formentlig mangler registrering af en regnhændelse

Verifikation af ML modellen på 2019-2020 data

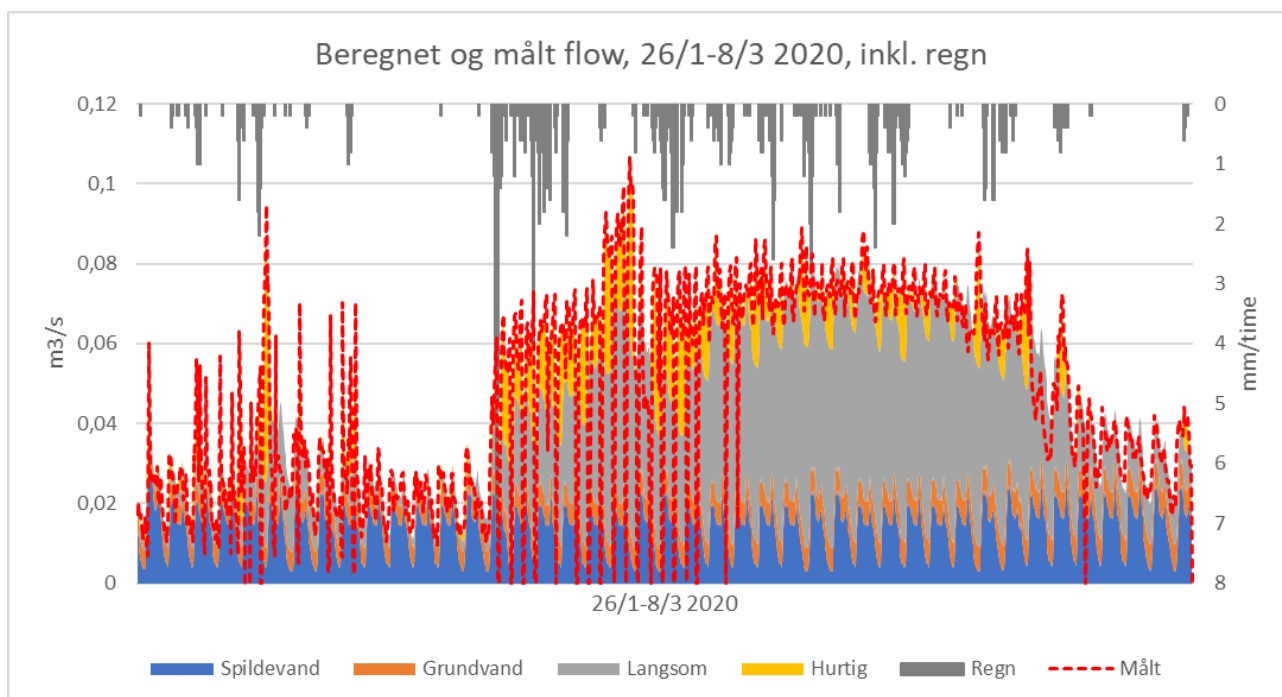
Det seneste års tilgængelige data, fra perioden 1. oktober 2019 til 30. september 2020, er blevet anvendt til at verificere ML modellen, som blev kalibreret på data fra hele 2017 og 2018.

Den totale fordeling mellem de 4 flow komponenter er vist i Figur 3.11. I forhold til 2017-2018 er der en markant stigning på den langsomme infiltration (ca. 10 procentpoint). Der er i perioden registreret 745 mm regn, hvilket er 16 % mere end i kalenderåret 2018, hvor der faldt 619 mm. Det er sandsynligvis denne øgede regnmængde, der er forklaringen på den store stigning i den langsomme afstrømning.



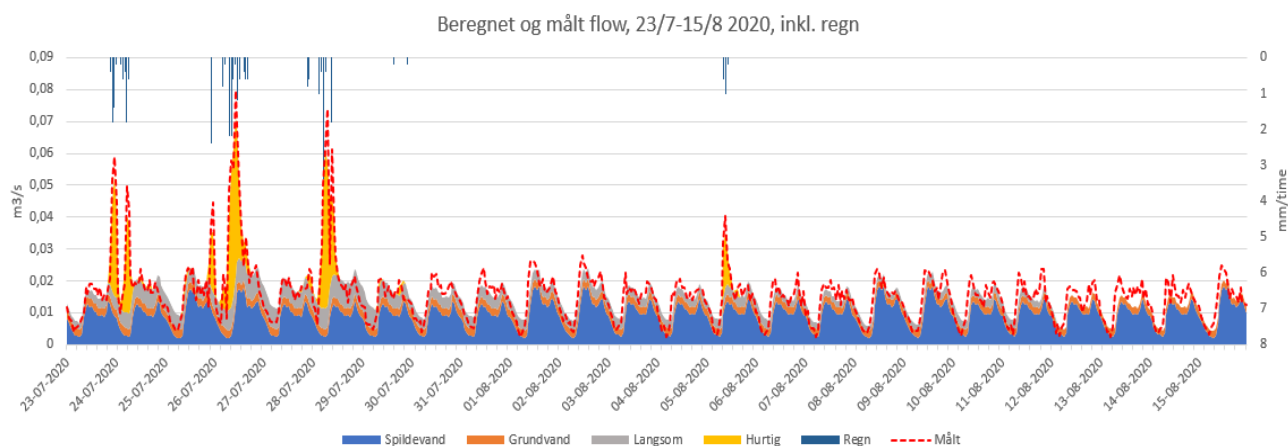
FIGUR 3.11 Beregnet flowfordeling for perioden oktober 2019 til september 2020 - og de to kalibreringsår

Verifikationsperioden var præget af en periode i februar 2020, hvor der faldt en stor mængde nedbør. Perioden var præget af ganske få tørvejrdsdage, se Figur 3.12. I alt er der i perioden målt ca. 180 mm nedbør, hvoraf langt det meste faldt i ca. halvdelen af perioden. Denne intensive nedbørsperiode opbygger stort vandindhold i jorden, som øger den langsomme afstrømning. Det er interessant at se, hvordan voluminet af den langsomme afstrømning er flere gange større end spildevandet.



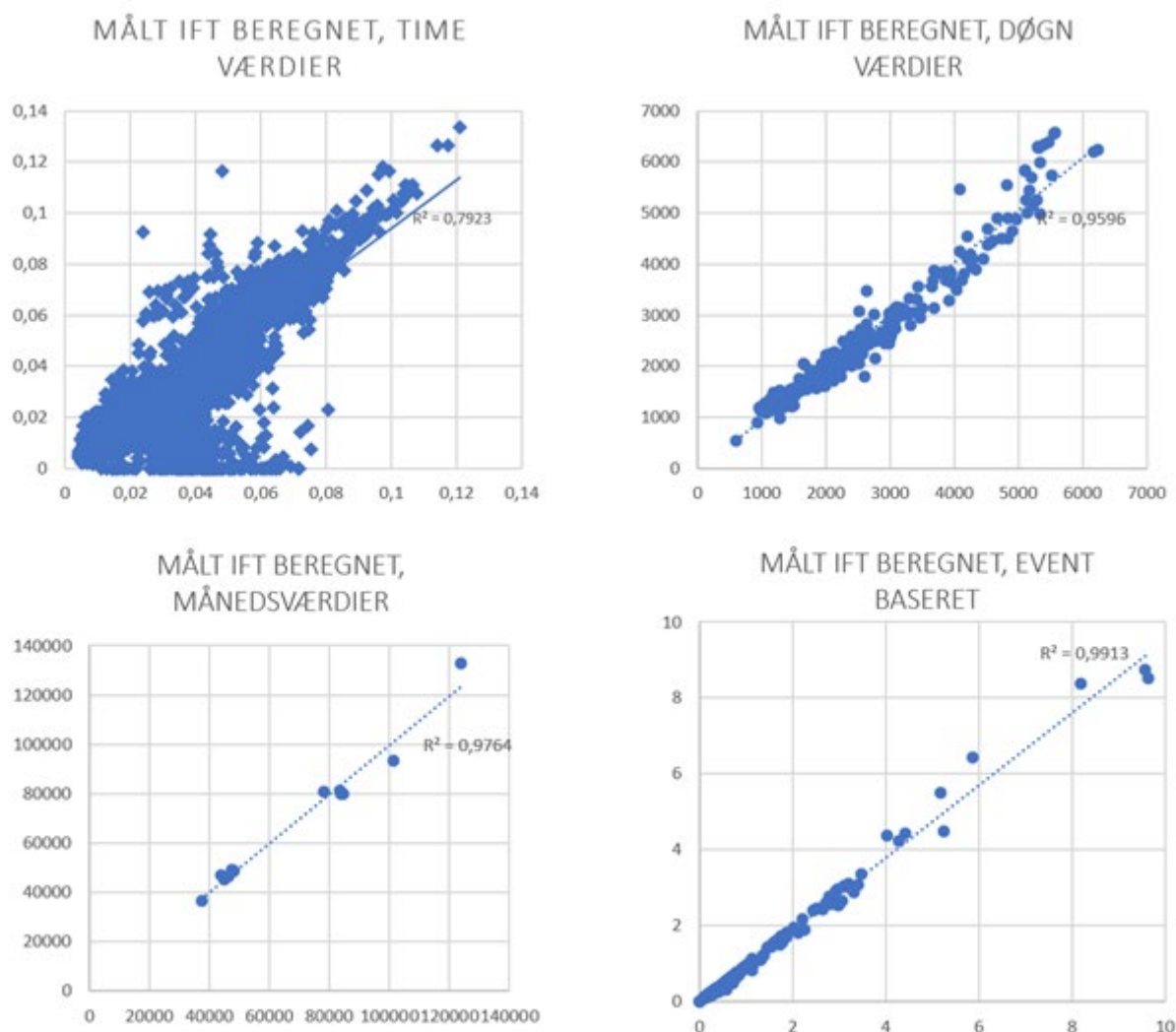
FIGUR 3.12 Beregnede og målte resultater for perioden 26/1 - 8/3 2020

Som også set tidligere er der tilsyneladende nogle 0-værdier for målte pumpeflows, der ikke er korrekte. Der er ikke hele timer, hvor pumperne ikke kører. Mens februar var en våd måned, blev første halvdel af august 2020 relativt tør. Figur 3.13 viser beregnede og målte værdier for perioden 23/7-15/8 2020. ML modellen, som blev kalibreret på 2017-2018 data, udviser også her rigtig god overensstemmelse mellem målt og beregnet flow.



FIGUR 3.13 Beregnede og målte resultater for 23/7-15/8 2020

I Figur 3.14 er sammenhængen mellem det målte flow og det beregnede flow vist for forskellige integrationsintervaller. Det beregnede flow er summen af alle 4 komponenter, spildevand, grundvand, langsom og hurtig afstrømning. Sammenligningen på timebasis giver ikke rigtig mening, men er medtaget for illustrationens skyld. Den bedste, og faktisk ret gode, sammenhæng mellem beregning er ved sammenligning på hændelsesbasis (event). En event er her defineret som ophørt, når der har været 3 timer uden hurtig afstrømning. Det samlede målte flow (volumen) i perioden 1/10-2019 til 30/9-2020 er 820.640 m³. Den samlede beregnede afstrømning er 823.480 m³. Afvigelsen mellem målt og beregnet er således 0,35 %.

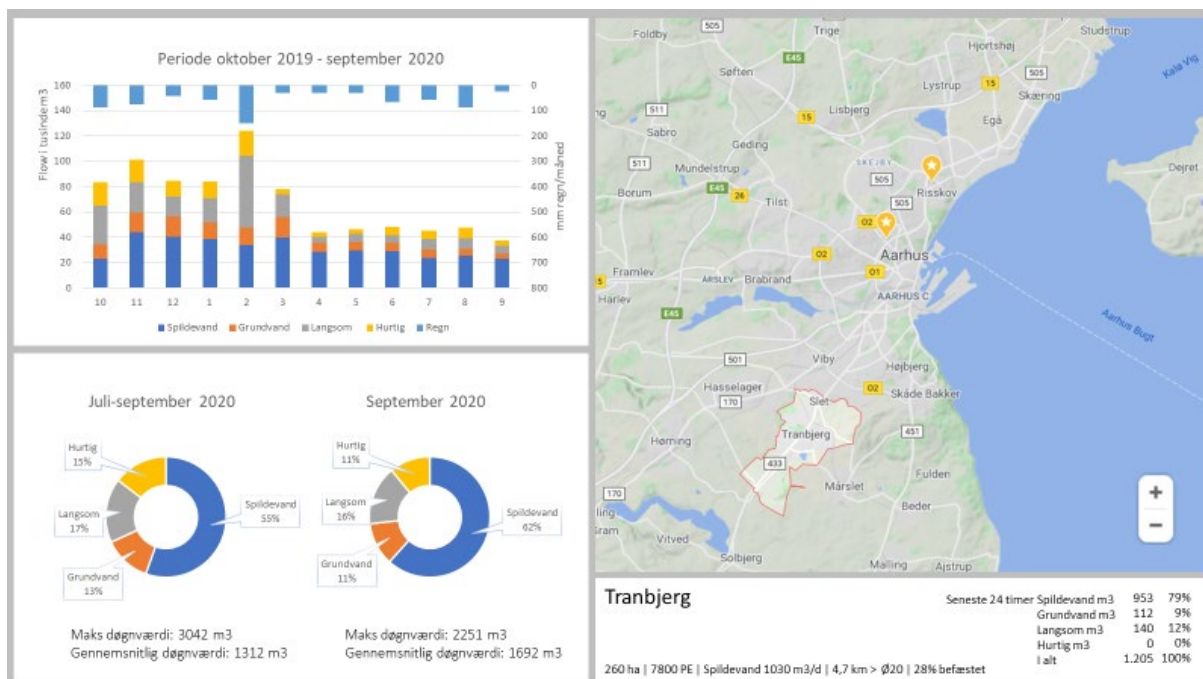


FIGUR 3.14 Beregnede og målte resultater for 1/10-2019 til 30/9 2020, forskellige integrationsintervaller, event defineret som afsluttet, når der ikke har været hurtig afstrømning i 3 timer

Sammenfatning for ML modellen

Anvendelse af ML modellen giver et glimrende og realistisk billede af flowfordelingen mellem den hurtige og de langsomme regn-komponenter for spildevandsledninger, inklusive grundvandsbidraget. Med den høje tidsopløsning er det muligt at beregne flowfordelingen helt ned på enkelthændelsesniveau, ligesom modellen kan bruges til at vurdere tidlige variationer på større tidsskala, fx måneds-, kvartals- eller årsbasis. Modelresultater er i sigens natur stærkt afhængige af kvaliteten af inputdata, i dette tilfælde pålidelig og retvisende information om nedbør og målt flow. Måleserierne havde for både regn og flow en række åbenlyse fejldata, fx negative flows ud af oplandet eller ekstremt høje nedbørsmængder. Inden anvendelse blev tidsserierne dog rensset for de mest indlysende fejl. En anden, og betydelig, usikkerhedskilde, er placeringen af regnmåleren. I dette tilfælde er regnmåleren placeret i udkanten af Tranbjerg-oplandet. En mere central placering ville formentlig have givet bedre overensstemmelse mellem målte og beregnede resultater. På trods af denne potentielle usikkerhed er beregningsresultaterne dog ganske overbevisende. ML-modellen er trænet for Tranbjerg-oplandet med data fra 2017-2018. Hvis der havde været yderligere data for dele af oplandet, kunne beregningerne også være gennemført separat for disse dele. Herved kunne modellen bruges til at screene relative forskelle på de forskellige flowkomponenter internt i oplandet – viden, der kan bruges til prioritering af fx rækkefølge af renoveringstiltag. Den trænedede model blev efterfølgende anvendt til at dekomponere de seneste 12 måneders data, fra oktober 2019 til september 2020. Resultaterne er ganske overbevisende. Beregningerne for både en længevarende våd periode og en tilsvarende tør periode giver rigtig god overensstemmelse med den målte afstrømning for området. Modellen kan også køre i realtid. Den me-

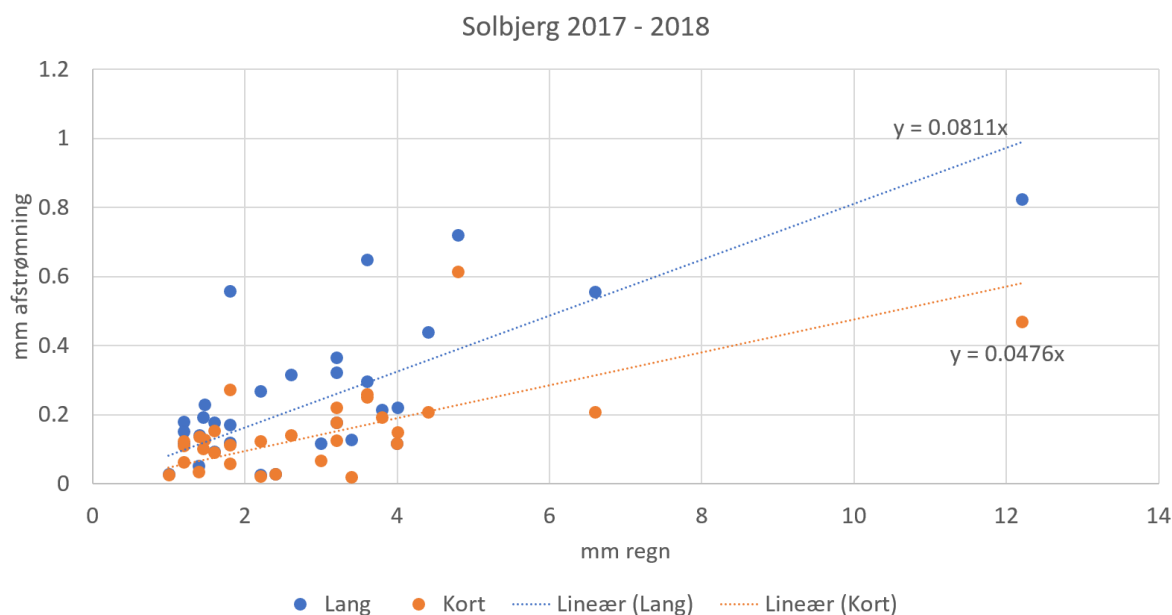
get korte beregningstid betyder, at det er muligt løbende at beregne den aktuelle flowdekomponering og f.eks. visualisere resultaterne i et web-dashboard. Figur 3.15 viser et tænkt eksempel på et dashboard, der løbende kan opdateres og iøvrigt konfigureres, så det passer til forsynings ønsker og behov.



FIGUR 3.15 Eksempel på web-dashboard, hvor forsyningen kan vælge nøgleparametre for alle deloplande i forvaltningsområdet

3.4.3 Statistisk Dekomponering

I Figur 3.16 ses resultatet af en dekomponering af flowet for Solbjerg under regn. Det ses på tilstrømning af regnvand ind i kloaksystemet fra Solbjerg-området i perioden 2017-2018. Der ses i denne periode, at omkring 60 % af den totale afstrømning foregår, mens det regner og 40 % af den totale afstrømning er langsom afstrømning eller sker minimum en time efter, at regnbygen er ovre. Det indikerer, at der kommer regnvand fra områder, der måske ikke burde være koblet på systemet.

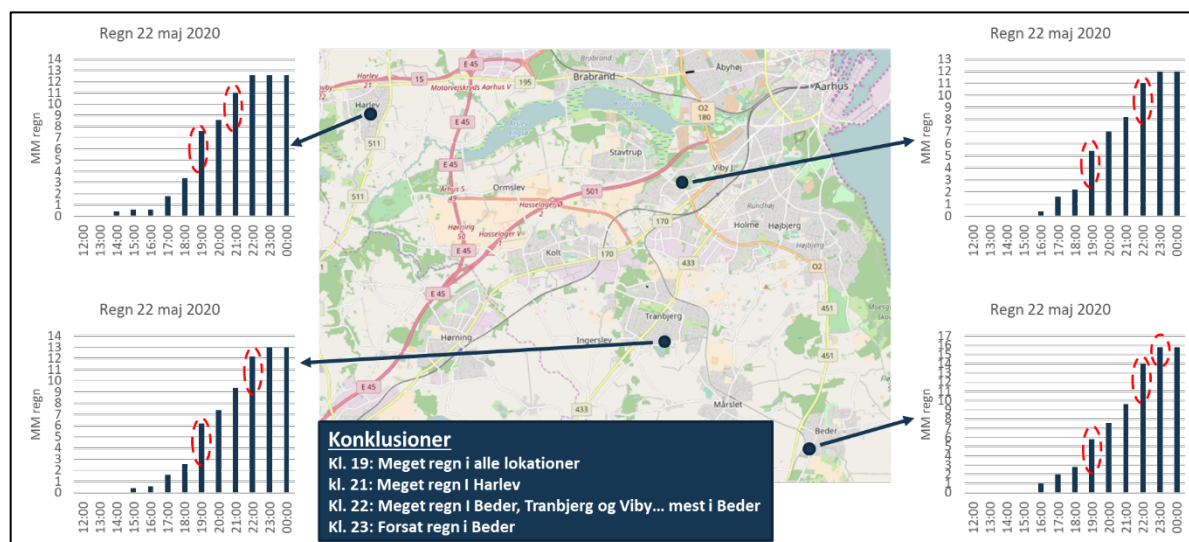


FIGUR 3.16 Beregnet regnbetinget vand i kloaksystemet i Solbjerg-område i periode 2017-2018. Orange farver indikerer kort (hurtige) respons, mens blå farver indikerer lang (fulde) respons. Linjerne er lineære tendenslinjer.

3.4.4 Realtidsdekomponering af målt flow

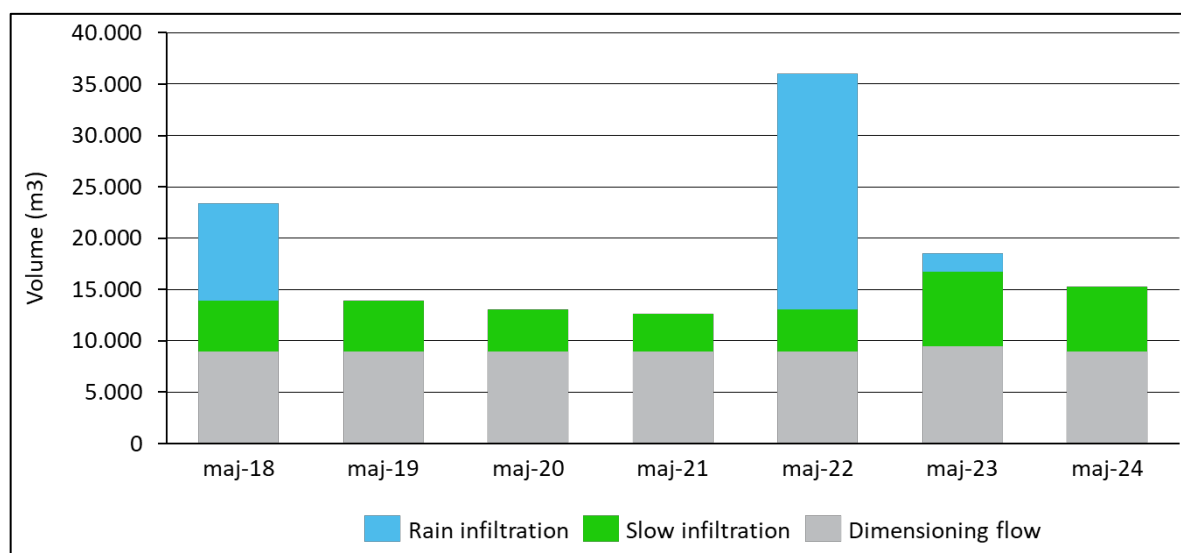
På baggrund af målt flow i gravitationssystemet og fra pumpestation, kombineret med den solgte vandmængde samt nedbørsmålinger, er en dekomponering af flowet i det samlede og sektionerede system beregnet. I det følgende gennemgås en regnhændelse på Viby-området. Uddybende og andre resultater for detektering af uvedkommende vand kan ses i bilag AP3-1.

I undersøgelse af effekten af en regnbyge er der udformet et overblik af en regnhændelse den 22. maj, hvor der er sammenlignet målt nedbør fordelt på 4 regnmålere omkring Viby-området, vist på Figur 3.17. Figuren viser, at der stort set i denne hændelse er samme mængde nedbør i alle områder, blot med en forsinkelse på 1–4 timer målepunkterne imellem.



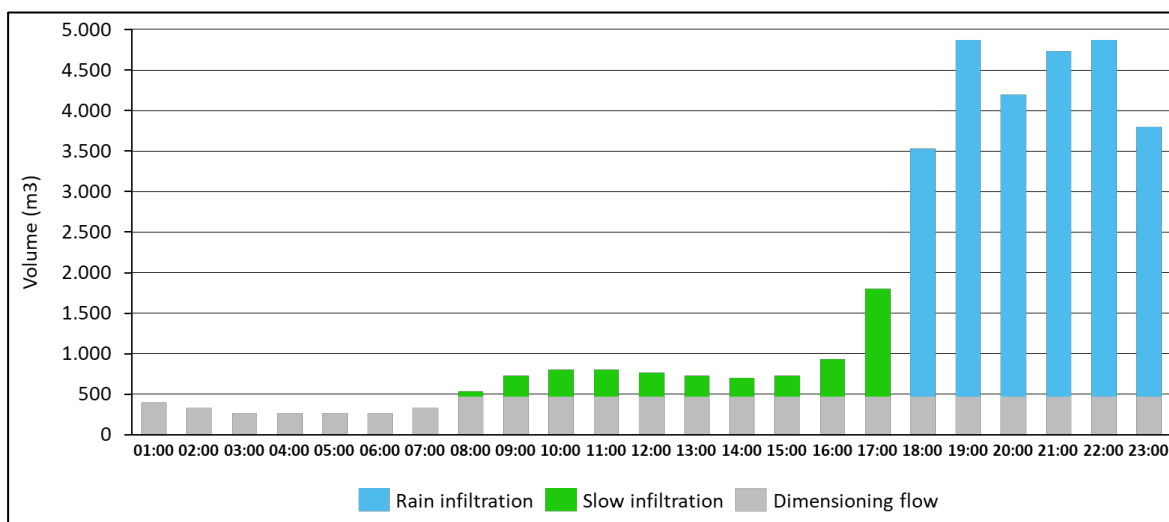
FIGUR 3.17 Regnmålinger fra den 22. maj 2020

Derfor er den velegnet til at se på hurtigt indsvivende vand i netværket. Der er foretaget dekomponering af målte flow for den 22. Maj. Data er vist for Viby renseanlæg i på dagsniveau Figur 3.18 og på timeniveau i Figur 3.19.



FIGUR 3.18 Dekomponeret flow på Viby renseanlæg for uge 21, hvor den 22. maj er torsdag.

Ved hændelsen den 22. maj faldt der 12-13 mm nedbør, hvilket forårsagede en stigning i døgnflow på ca. 400 % på Viby renseanlæg. Dette svarer til en infiltrationsfaktor på 4.



FIGUR 3.19 Dekomponeret flow for Viby renseanlæg den 22. maj på timebasis

På timeniveau ses, at indløbet til Viby renseanlæg rammes af effekten af regn lidt før der er registreret regn på regnmåleren på Viby renseanlæg. Dermed opleves en forsinkelse af regnhændelsen i forhold til den regnmængde, der reelt er faldet i oplandet. Det betyder, at transport af spildevand fra oplandet vest for Aarhus er hurtigere til Viby renseanlæg via kloakken end regnbyggerne, som driver ind over byen. Dette skal selvfølgelig med i en vurdering af inflow, men er i dette tilfælde uden praktisk betydning.

I Tabel 3.2 ses infiltrationsfaktorer for alle oplande fra den hierarkiske model af oplandet, hvor nogle data er beregnet, og for enkelte steder findes ingen målinger fra den 22. maj. Infiltrationsfaktoren er et udtryk for totalt flow i en målt tidsperiode i forhold til den forventede spildevandsmængde i samme periode (målt som solgt vand eller PE fra oplandet, som leverer spildevand til målepunktet). Den 22. maj er døgnsummen for indløb til Viby renseanlæg målt til 35.705 m³/d. Af disse er ca. 27.000 m³/d regnbetinget vand (grundvand, langsom- og hurtig indsyvning, samt fællesvand) ind på Viby renseanlæg (Level 1), der igen kan opdeles i ca. 5.600 m³/d fra Harlev, Kolt og Hasselager, ca. 7.400 m³/d fra Tranbjerg og ca. 5.000 m³/d fra Holme syd og Rosenhøj. Dvs. 9.000 m³/d kan beregnes til at være fra Viby syd på Level 2. Således kan infiltration og regnbetinget vand undersøges på alle levels. Mest iøjnefaldende er en faktor 25,7 på Level 4 for Tranbjerg Ø, der giver ca. 2.000 m³/d ekstra flow på denne dag.

TABEL 3.2: Infiltrationsfaktorer for regnhændelsen den 22. maj. De anførte tal under faktorer er målt flow i m³/d

Level 1	Viby renseanlæg 4,1 Total flow ind: 35.705 m³				
Level 2	Harlev, Kolt & Hasselager 3,8 7.662 m³	Viby syd Ingen data	Tranbjerg 2,4 12.913 m³	Holme syd & Rosenhøj 9,0 5.693 m³	
Level 3	Malling 2,6 1.399 m³	Beder 2,2 998 m³	Mårslet Ingen data	Tranbjerg 2,4 6.459 m³	Solbjerg 2,3 973 m³
Level 4	Tranbjerg V 1,3 152 m³	Tranbjerg NV 7,0 2.235 m³	Tranbjerg Ø 25,7 2.128 m³	Tranbjerg NØ 3,1 955 m³	

Der er i projektet beregnet infiltrationsfaktorer for 5 yderligere regnhændelser som en konsolideret periode. Her er vist den samlede effekt på flow af fem større regnhændelser samlet. Desuden er der beregnet infiltrationsfaktorer for en længere tørvejsperiode, som kan give indsigt i effekten af indsivende grundvand. Disse fremgår af bilag AP3-1.

3.5 Diskussion og perspektivering

Projektet har afprøvet fire forskellige metoder til dekomponering af vandet i spildevandssystemer. En konceptuel model-metode 1), en machine learning model 2), realtidsdekomponering af flow 3) statistisk dekomponering og 4) realtidsdekomponering af målt flow. De fire metoder er sammenlignet i nedenstående tabel.

TABEL 3. Sammenligning af de fire metoder.

Metode	Konceptuel model	Machine learning model	Statistisk dekomponering	Realtidsdekomponering af målt flow
Definition	Fysisk baseret, simpel model.	Machine learning model.	Massebalance baseret på flowmålinger i afløbssystem.	Funktionelle målinger af hydraulisk flow i realtid.
Kalibrering/træning	Ja.	Ja.	Nej (Ja) - se Data Varighed.	Nej.
Data varighed	Helst > 12 måneder.	Helst > 12 måneder. Hvis kortere opnås ikke årstidsvariation	1-2 måneder første gang for at beskrive tørvejsvariationerne statistisk. Herefter daglige værdier.	Realtidsmåling (online minut rapportering) til konsolidering af regnhændelser eller tørvejs perioder over tid.
Variabel hydrologisk "hukommelse", dvs. variation i grundvandsstand og fugtighed i umættet zone	Ja, indbygget i den fysiske model.	Ja, hvis træningsperiode er tilstrækkelig lang.	Ja – opdaterer løbende infiltration under tørvejsdøgn. Data interpoleres herefter under regnvandsdøgn.	Hydrologisk hukommelse bliver vist i realtidsflow, og løsningen kan ved hjælp af installationsindstillinger indsættes til identifikation af hydrologisk hukommelse.
Metodens begrænsninger	Kræver kalibrering, dvs. regn og flowdata for kalibreringsperioden. Ved større ændringer i oplandet skal modellen rekalibreres.	Kræver kalibrering, dvs. regn og flowdata for kalibreringsperioden. Ved større ændringer i oplandet skal modellen rekalibreres.	Kræver målinger af flow fra flowmålere. Kan bruges alle de steder, man har et flowestimat uafhængig af målemetoden.	Metoden passer ikke til alle oppumpningsbrønde ift. tilløb og fysiske dimensioner af oppumpningsbrønden og ledningsnettet, hvor målingerne skal foretages. Bruger PE eller solgt vand som datainput i dekomponering af realtidsmålt flow.
Metodens styrke	Meget nemt at sætte modellen op og hurtig at kalibrere. Inkluderer sæsonvariationer i grundvandsindsivning. Særligt velegnet til planlægning, og den kan bruges på alle 4 niveauer	Inkluderer sæsonvariationer i grundvandsindsivning. Resultaterne er kontinuerte – glatte – og metoden kan bruges på både historiske data til kortlægning og planlægning samt i realtid.	Behøver kun flowmålinger og nedbør fra nærmeste regnmåler. Kan bruges på allerede opsamlede måledata for lange historiske tidsserier, såvel analyse på seneste døgn.	Udnytter data fra allerede installeret udstyr eller tilbyder mobilt udstyr til måling af realtids flow i gennemstrømningsbrønde. Metodens dekomponering af realtidsflow har fokus på adskillelse af regnbetinget flow samt dokumentation af realtidsflow i pumpestationer og gravitation med en +/-

				10% afvigelser ift. en standardflowmåler.
Korrelation med regn hændelser	Ja, inkluderer også korrelation med målt regn i de seneste 7 dage.	Ja, inkluderer også korrelation med målt regn i de seneste 7 dage.	Ja, i forhold til at differentiere mellem tørre og våde døgn.	Ja, på samme tids-skala.
Dekomponering og antal komponenter	Ja, realtid og historisk analyse. Op til 4 komponenter.	Ja, realtid og historisk analyse. Op til 4 komponenter.	Ja, realtid og historisk analyse. Op til 4 komponenter.	Online i realtids-dekomponering i 3 komponenter.
Offline	Ja	Ja	Ja	Ja
Realtid, databehov	Ja, muligt, kræver regndata.	Ja, kræver flow- og regndata.	Ja, kræver flow- og regndata.	Ja, kræver flow- og regndata.
Opsætning og beregning, under forudsætning af, at kvalitetsdata er tilgængelige	Få dage, beregninger er hurtige (<1 minut for 1 års data).	Få timer, beregninger er meget hurtige (få sekunder for et års data).	Målinger for mindst 2 måneder tilbage i tid for at starte metoden op. Herefter beregnes dekomponeringen dagligt med onlinedata.	Opsætning tager få timer, beregninger bliver til flow per sekund.

Metode 1) og 2) giver bedste resultater, hvis de kan kalibreres/trænes på data, der gerne må strække sig over mindst 12 måneder, og begge inkluderer langperiodiske svingninger fra grundvandsbidraget. Hvis kalibrering/træning kun har korte tidsserier til rådighed, vil beregningen af grundvandskomponenten blive mindre præcis.

Metode 3) kan bruges til at analysere eksisterende flowmålinger mht. uvedkommende vand. Metoden afvikles typisk én gang i døgnet for at dekomponere de foregående døgn. For at "igangsætte" beregningen første gang laves der et profil af tørvejsvariationer på alle ugens dage, da denne er forudsigelig inden for en lille variation. Tørvejsprofilen bliver herefter løbende opdateret af metoden og kan derved tilpasse sig årstidsvariationer i tørvejsflow. Grundvandskomponenten bestemmes ligeledes på tørvejsdøgn og kræver ikke en igangsætningsperiode.

Metode 4) er en datadrevet realtidsmetode, der anvendes i forhold til måling af realtids hydraulisk flow i enkelt-punktsinstallation, hvor målingerne bruges til strukturel identifikation af uvedkommende vand i et opland, som opdeles i fraktioner. Realtidsmålinger kan bruges til konsolidering af enkelte regnhændelser eller tørvejsperioder over tid. Disse tidsperioder kan variere fra få timer til måneder eller år. Datadrevne metoder er gode til at afspejle realtidseffekter af regnbyger under hensyntagen til regnintensitet, spredning over et topografisk landskab og befæstningsgrader i oplandet.

4. Arbejdspakke 4

Målet med arbejdsplanke 4 er at indarbejde resultaterne fra arbejdsplanke 2 og 3 i et varslingssystem og skabe et dynamisk lag, som kan anvendes i beslutningstagning vedrørende renovering af spildevandsledninger i et givet opland.

4.1 Indledning

Formålet med arbejdsplanke 4 er at skabe en model, som kan anvendes til overvågning, design og varsling af det uvedkommende vand.

Overvågning og varsling håndteres i værktøjet HOMIS, hvor det er muligt at koble de dekomponerede data fra arbejdsplanke 2 og 3 og følge trends i dataene, herunder opsætte parametre til varsling for udviklingen og ændringer i det uvedkommende vand. Dekomponeringen af spildevand laves på forskellige oplande og "niveauer" i systemet.

Gennem arbejdsplanken udarbejdes et dynamisk lag, som kan anvendes i beslutningstagningen om renovering af spildevandsledninger. På baggrund af oplysninger fra ledningsregistreringen inkl. tv, oplysninger om grundvandspejl og andet genereres der et Uvedkommende Vand (UV) -indeks, som viser, hvilke ledninger der har størst risiko for at være påvirket af uvedkommende vand. På baggrund af det dynamiske lag kan der udpeges områder til nærmere undersøgelse for uvedkommende vand, typisk supplerende målinger eller tv, og der kan gennemføres scenarieberegninger for at evaluere effekten af et planlagt tiltag. Det dynamiske lag genereres ved brug af machine learning, hvor kendte data på en begrænset del af ledningsnettet gennem statistiske modeller overføres til det fulde ledningsnet. Machine learning vil genere resultater for ledningsnettets fysiske tilstand (FI) og et uvedkommende vand indeks (UV). Det uvedkommende vand indeks vil på samme måde som det fysiske indeks være tilknyttet den enkelte ledning.

4.2 Mål med arbejdsplanke

Projektmålene, som er behandlet i Arbejdsplanke 4, og som er introduceret i indledningen ovenfor, ses i tabel 4.1.

TABEL 4.1. Delmål i arbejdsplanke 4.

Projektets mål	Succeskriterier
Opstilling af samlet varslingsmodel for Viby-oplandet for at sikre 'tidlig varsling' ift. forøgede mængder af uvedkommende vand	At de dekomponerede data fra arbejdsplanke 2 og 3 er indarbejdet i værktøjet HOMIS, og at der er opsat datahåndtering, som viser udviklingen i uvedkommende vand.
Benytte Machine Learning til fastlæggelse af uvedkommende vand indeks (UV- indeks)	At opgradere datagrundlaget således at uvedkommende vand også kan forudsiges på strækninger, hvor datagrundlaget er lavere end andre steder, pga. f.eks. manglende tv.
Udarbejdelse af dynamisk lag for uvedkommende vand til anvendelse ved en samlet fornyelsesplanlægning i Viby-oplandet	At der er udarbejdet et dynamisk lag med UV-indeks på ledningsniveau, der kan benyttes som input i prioriteringsværktøj.
Gennemførelse af holistiske scenarieberegninger for forskellige løsningsforslag (cost benefit)	At de scenarier for fastlæggelse af, hvilke tiltag der giver mest effekt på reduktionen af det uvedkommende vand, sammenlignes med anlægskostning, så de strækninger, hvor der opnår størst m ³ besparelse pr. krone, kan udpeges.

Udmelding af konkrete anlægsprojekter til gennemførelse i Arbejdspakke 5

At der er gennemført scenarieberegninger af effekten af tiltag og på denne baggrund udpeget, hvilke tiltag der giver størst reduktion af uvedkommende vand.

4.3 Datagrundlag

Både det dynamiske hjælpepelag og varslingssystemet er baseret på resultaterne fra arbejdsopgave 2 og 3, hvor der på forskellige oplandsniveauer bestemmes dekomponerede mængder af uvedkommende vand. I det dynamiske hjælpepelag er de dekomponerede flows suppleret med andre informationer om ledningssystemet, som stammer fra Aarhus Vands ledningsdatabase, højdemodellen fra Kortforsyningen, en grundvandsmodel udarbejdet af NIRAS og forskellige andre data for Aarhus Kommune.

Data, der anvendes i varslingssystemet, kommer fra flowmålinger, som foretages af Aarhus Vand, flowmålinger som er foretaget i arbejdsopgave 2 samt de bearbejdede data med dekomponerede flows i arbejdsopgave 3.

4.4 Metoder

4.4.1 Varslingssystem i HOMIS

HOMIS er et management informationssystem. I HOMIS er det muligt at indlæse informationer fra forskellige datakilder og få dem koblet op på geografiske områder og vist i en samlet brugerflade. I Drainman-projektet anvendes HOMIS-platformen til at samle resultaterne fra de andre arbejdsopgaver samt pumpeflows, som allerede registreres af AAV. Når data er indlæst i HOMIS-platformen, kan både de dekomponerede flows og rådata visualiseres på de forskellige oplandsniveauer. Det er desuden muligt at overvåge mængderne af uvedkommende vand og hvordan de ændres over tid, ligesom der kan opsættes varslinger, når mængden af uvedkommende vand over en given periode overstiger en grænseværdi.

4.4.2 Dynamisk hjælpepelag

Det dynamiske hjælpepelag skal anvendes til at understøtte en datadrevet beslutningstagning for renovering af spildevandsledninger. I det dynamiske hjælpepelag samles resultaterne af de forskellige metoder for eftervisning af uvedkommende vand i Drainman-projektet, så der nemt skabes et overblik over, hvilke oplande, der er mest påvirket af uvedkommende vand. Denne viden kan, sammen med anden viden om ledningssystemet, anvendes til at bestemme, hvor i oplandet ledninger skal renoveres eller udskiftes.

Det dynamiske hjælpepelag er opdelt i flere niveauer, hvor de overordnede niveauer svarer til størrelsen på oplandet til et givet målepunkt, som varierer fra det totale opland ved renseanlægget til spildevandsplanoplande eller helt ned på ledningsniveau, vha. machine learning. Hjælpelaget kan derved anvendes til at bestemme, hvilket opland der er mest påvirket af uvedkommende vand, og anvendes til at målrette indsatsen mod dette, fx med målekampanjer, "løfte dæksler under regn" osv.

Machine learning

I dette afsnit beskrives det, hvordan machine learning er anvendt til at beregne et UV-indeks for alle ledninger i Aarhus Vands ledningsdatabase, og hvordan resultaterne heraf efterfølgende kombineres med resultaterne fra arbejdsopgave 3 til generering af et dynamisk hjælpepelag. Slutteligt beskrives det, hvordan renovering af regnpåvirkede ledninger kan prissættes ud fra standardpriser på strømpåføringer af spildevandsledninger. Det er i dette projekt antaget, at de vigtigste typer af fejl i ledningssystemet i forhold til indsivning af uvedkommende vand i spildevandsledninger er rørbrud og forskudte samlinger.

Data er anvendt i machine learning processen til beregning af fysisk indeks samt sandsynligheder for rørbrud og forskudte samlinger:

Ledningsregistreringsdatabase	Tv observationer	Andre data
Længde	Rørbrud	Grundvandskort
Materialetype	Forskudte samlinger	Digital højdemodel
Lægningsdybde	Vandstand	Vejprioritering (trafiklast)
Alder		GIS tema træer
Afløbstype		GIS tema snerydnings-prioritering af vejnettet
Fald		Jordartskort
Diameter		
Osv.		

Machine learning-algoritmen er trænet på data fra Viborg og Aarhus kommuner, og efterfølgende er sandsynligheden for uvedkommende vand beregnet for alle ledninger i Aarhus Vands ledningsdatabase. UV-indekset viser, i hvilke ledninger der sandsynligvis er størst risiko for uvedkommende vand.

UV-indeks

For at få et indeks, som på enkel vis kan bruges til at vise, hvor belastet en ledningsstrækning er af uvedkommende vand, er de beregnede sandsynligheder for rørbrud og forskudte samlinger sammenholdt med grundvandsstanden og ved et simpelt udtryk omregnet til et UV-indeks.

$$UV = ((y_{RB} \cdot 5) + (y_{FS} \cdot 5)) \cdot GV_vægt \quad (1)$$

Hvor,

UV er Uvedkommende Vand-indeks (UV-indeks),

y_{RB} er sandsynligheden for rørbrud på en given rørstrækning,

y_{FS} er sandsynligheden for en forskudt samling på en given rørstrækning,

$GV_vægt$ er den vægtede faktor for grundvandspåvirkning.

Sandsynlighederne for rørbrud og forskudte samlinger er et tal mellem 0-1. Ligeledes er den vægtede faktor på grundvandspåvirkning. Derved beregnes der med udtrykket et UV-indeks, som går fra 0-10, hvor rørbrud og forskudte samlinger vægtes lige højt.

Yderligere beskrivelser findes i bilag AP4-1.

4.4.3 Scenarieberegninger

Formålet med gennemførelse af scenarieberegninger er at vurdere effekten af planlagte tiltag til reduktion af uvedkommende vand. På grundlag af scenarieberegningerne er det muligt at vurdere den forventede effekt af et planlagt tiltag; herunder om effekten af tiltaget er tilstrækkeligt til, at det giver værdi at gennemføre tiltaget.

Der har i projektet ikke været gennemført anlægstiltag, og der har således ikke været mulighed for at eftervise de beregnede scenarier.

I stedet gennemføres der scenarieberegninger for anlægsøkonomien sammenlignet med den forventede reduktion af uvedkommende vand, hvorved der kan udmeldes anlægsprojekter, der giver størst effekt pr. investeret krone.

Yderligere beskrivelser findes i bilag AP4-1.

4.5 Resultater

4.5.1 Varslingssystem i HOMIS

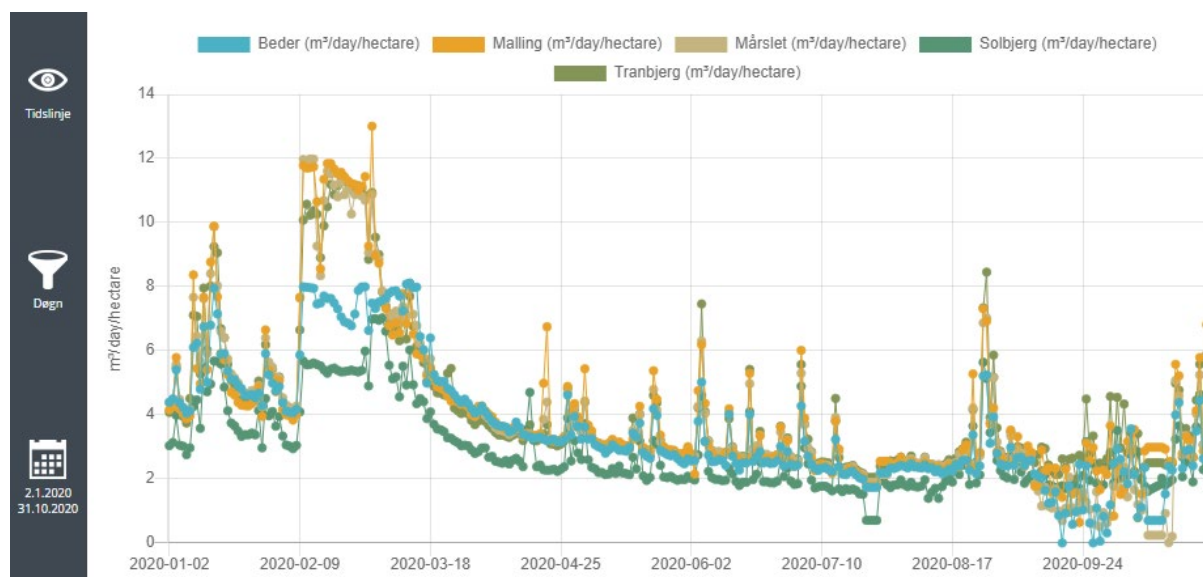
I HOMIS er der indlæst data fra to forskellige kilder. Den ene er rå pumpedata fra Aarhus Vands SRO-system.

Den anden er resultaterne fra machine learning metoden udarbejdet i arbejdsplan 3, beskrevet i afsnit 3.3.2.

Disse data er anvendt til at vise, hvordan man kan overvåge og opsætte et varslingssystem i HOMIS. Ud over at præsentere data kan HOMIS også lave simple operationer på data, såsom at beregne min, max og gennemsnit af

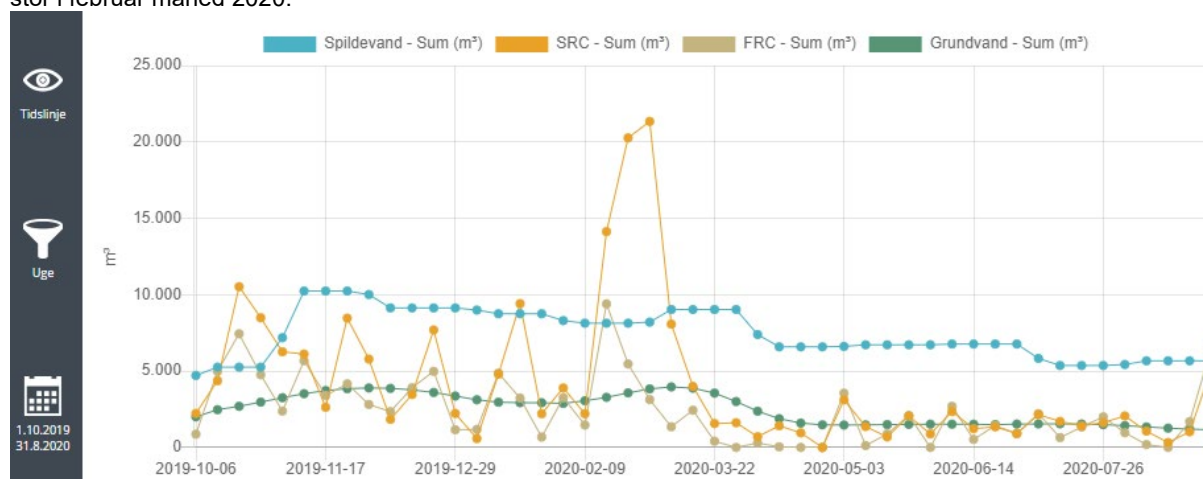
flow, summere over forskellige perioder og lignende. Al data i HOMIS er tilknyttet et geografisk GIS-lag, hvorfor det også er muligt at omregne rådata i forhold til oplandsstørrelse eller antal PE i oplandet.

I figur 4.1 ses data, som er opsamlet i pumpestationerne i de 5 oplandsbyer syd for Aarhus, nemlig Beder, Malling, Solbjerg, Mårslet og Tranbjerg. I figuren ses det, at pumpedata er summeret til døgnværdier og divideret med oplandsarealet i hvert pumpeopland. Herved er der en tidlig indikation på, at Solbjerg er mindst påvirket af uvedkommende vand, mens Malling er mest påvirket under regn. Dette er ikke overraskende, da en stor del af Malling stadig er fælleskloakeret. Fælles- og spildevand fra Malling pumpes til Mårslet, hvorfra det pumpes til Tranbjerg, hvorfor både Mårslet og Tranbjerg også er meget regnpåvirket.



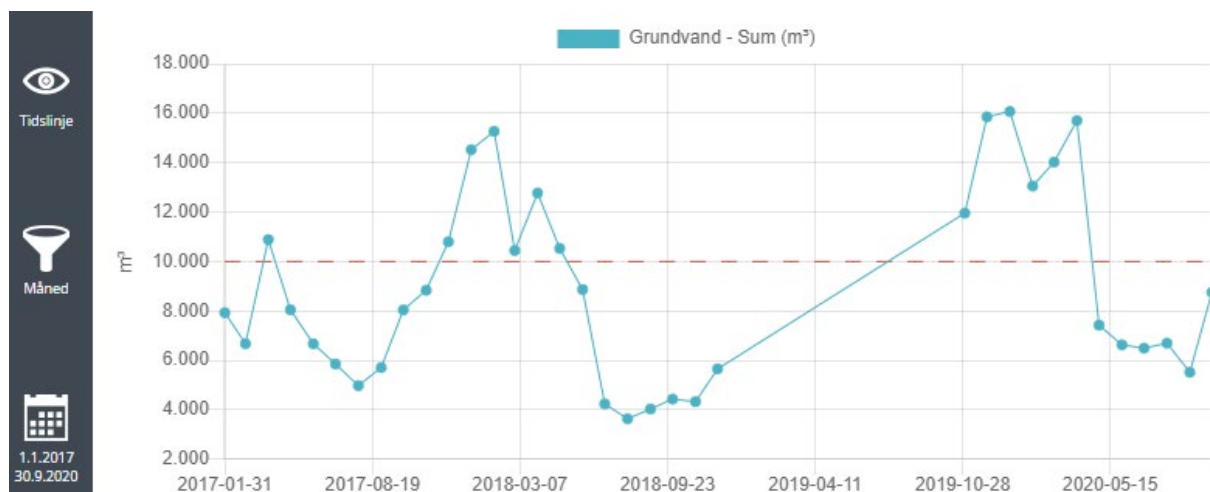
FIGUR 4.1. Pumpedata for de 5 oplandsbyer, døgnsummen er divideret med oplandsarealet

I Figur 4.2 ses de dekomponerede flows fra machine learning metoden, beskrevet i afsnit 3.3.2. I HOMIS er værdierne her summeret til ugeværdier for at give et bedre overblik over hele perioden. Det ses tydeligt, at i vinterperioden er oplandet påvirket af uvedkommende vand af alle typer, især er den langsomme regnpåvirkede indsivning stor i februar måned 2020.



FIGUR 4.2. Dekomponerede flows fra machine learning metoden beskrevet i afsnit 3.3.2. Her vist for Tranbjerg-oplandet, med summerede værdier pr. uge.

I figur 4.3 vises grundvandsindsivningen i Tranbjerg, som er beregnet med machine learning, beskrevet i afsnit 3.3.2. Mængderne er summeret op på månedsniveau, og udviklingen over årene er illustreret. I HOMIS er der indsat en grænseværdi på 10.000 m³ pr. måned, så systemet afgiver en varsel, hvis denne overskrides.

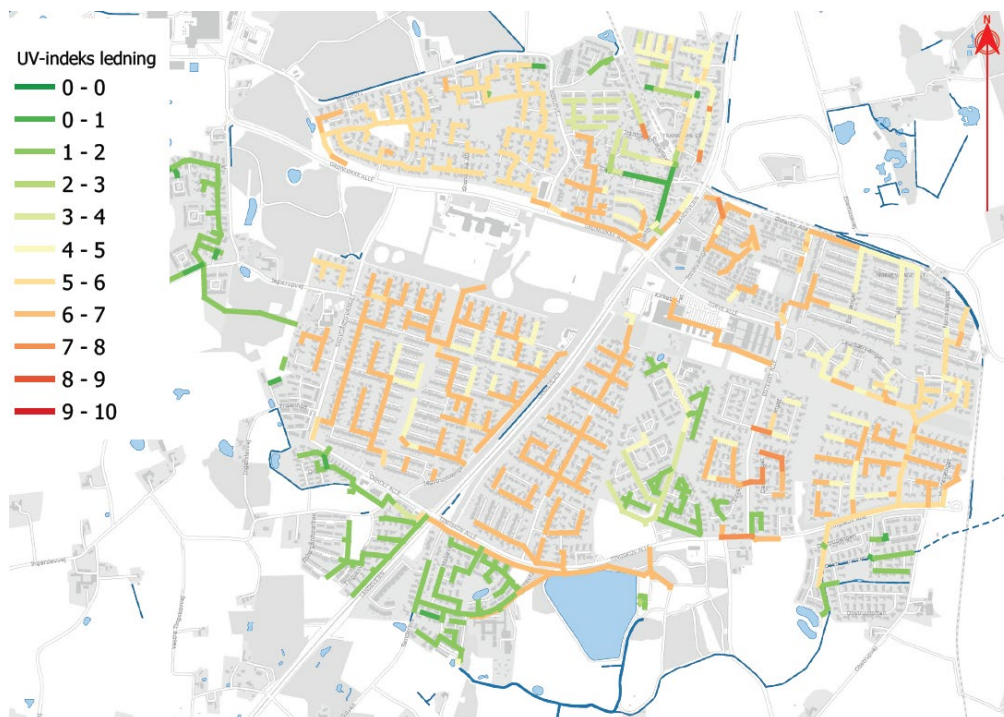


FIGUR 4.3. Dekomponeret flow fra machine learning metoden beskrevet i afsnit 3.3.2. Her er vist den grundvands-påvirkede indsivning, data er summeret pr. måned. Den røde stiplede linje angiver, at der er indsat en varslings, hvis månedsmængden overstiger denne.

Det ses, at det giver stor værdi at indlæse både de rå pumpedata samt de dekomponerede flowdata af forskellige typer uvedkommende vand i HOMIS, da man nemt kan se, hvilken type der er dominerede, samt hvilket opland der er mest påvirket, hvilket understøtter en målrettet indsats. Desuden giver det et godt overblik om omfanget af uvedkommende vand. I nærværende projekt har formålet alene været at skabe grundlaget for, at der kan opsættes en varslings, hvis fastsatte grænseværdier overskrides. Efterfølgende kan varslingen udbygges med varslings, hvis vandmængderne afviger fra fx de foregående år.

4.5.2 Dynamisk hjælpelag

Det dynamiske hjælpelag giver et enkelt overblik over forskellige oplande og hvordan andelen af ledninger med stor sandsynlighed for uvedkommende vand fordeler sig. Laget kan enten bruges alene eller som input i et andet prioriteringsværktøj som fx Rehab-It. I figur 4.4 ses det beregnede UV-indeks for Tranbjerg. I Tranbjerg har en stor andel af ledningerne et UV-indeks omkring 6-8. I yderkanten af byen er der områder, hvor indekset er væsentligt lavere. I områderne, hvor indekset er omkring 7, er ledningerne etableret i slutningen af 1960'erne og frem til midten af 1970'erne. I områderne, hvor indekset er lavere, er ledningerne af nyere dato. Yderligere beskrivelser findes i bilag AP4-1.

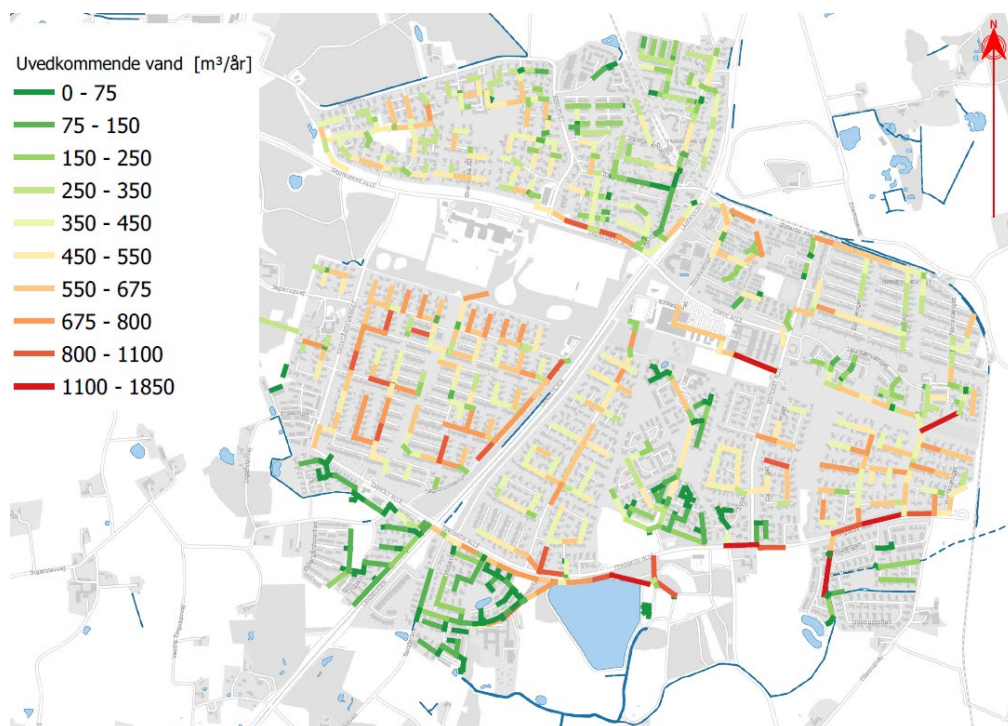


FIGUR 4.4. UV-indeks på ledninger i Tranbjerg. Grøn svarer til lav risiko og rød er høj risiko for uvedkommende vand.

4.5.3 Scenarieberegninger

Scenarieberegningerne, hvor anlægsøkonomi sammenholdes med mængden af uvedkommende vand på ledningsniveau, viser, at der ikke nødvendigvis er sammenfald mellem højeste UV-indeks, uvedkommende vandmængde og hvilke ledninger, et bedst kan betale sig at renovere. Dette er særligt gældende for ledninger med stor dimension og/eller lange ledningsstræk. For øvrige ledninger er der en tydelig sammenhæng mellem mængden af uvedkommende vand i ledningen og økonomisk rentabilitet.

I Figur 4.5 ses de årlige mængder uvedkommende vand af komponenten grundvandsindsivning fordelt ud på ledningerne vha. fordelingen beregnet med UV-indekset i det dynamiske lag. De anvendte mængder stammer fra den statistiske metode beskrevet i afsnit 3.3.3. Yderligere beskrivelser findes i bilag AP4-1.



FIGUR 4.5. Grundvandsindsivning pr. ledningsstrækning pr. år

4.6 Diskussion og perspektivering

Uvedkommende vand kan være vanskeligt og omkostningstungt at lokalisere på ledningsniveau. Gennem machine learning er det muligt at give et kvalificeret bud på et uvedkommende vand indeks på det enkelte ledningsstræk baseret på kendte og tilgængelige data. Dette giver Aarhus Vand og andre forsyninger en enklere og langt billigere metode i jagten på det uvedkommende vand. Ved at kombinere resultater for dekomponering af det uvedkommende vand gøres det muligt at foretage en målrettet indsats mod netop den del af det uvedkommende vand, hvor løsninger er mest enkle og økonomisk mest fordelagtige. Samtidig understøtter denne metode muligheden for at lave en indsats de steder, hvor der opnås størst effekt.

Ydermere vil der med skabelse af det dynamiske lag, hvor resultaterne af machine learning anvendes, give mulighed for en understøttelse af forsyningens planlægning. I den tidlige saneringsplanlægning hos Aarhus Vand og andre forsyninger er det afgørende, at beslutninger træffes på et så oplyst og bredt grundlag som muligt. Dermed vil uvedkommende vand indeks blot være et element af mange.

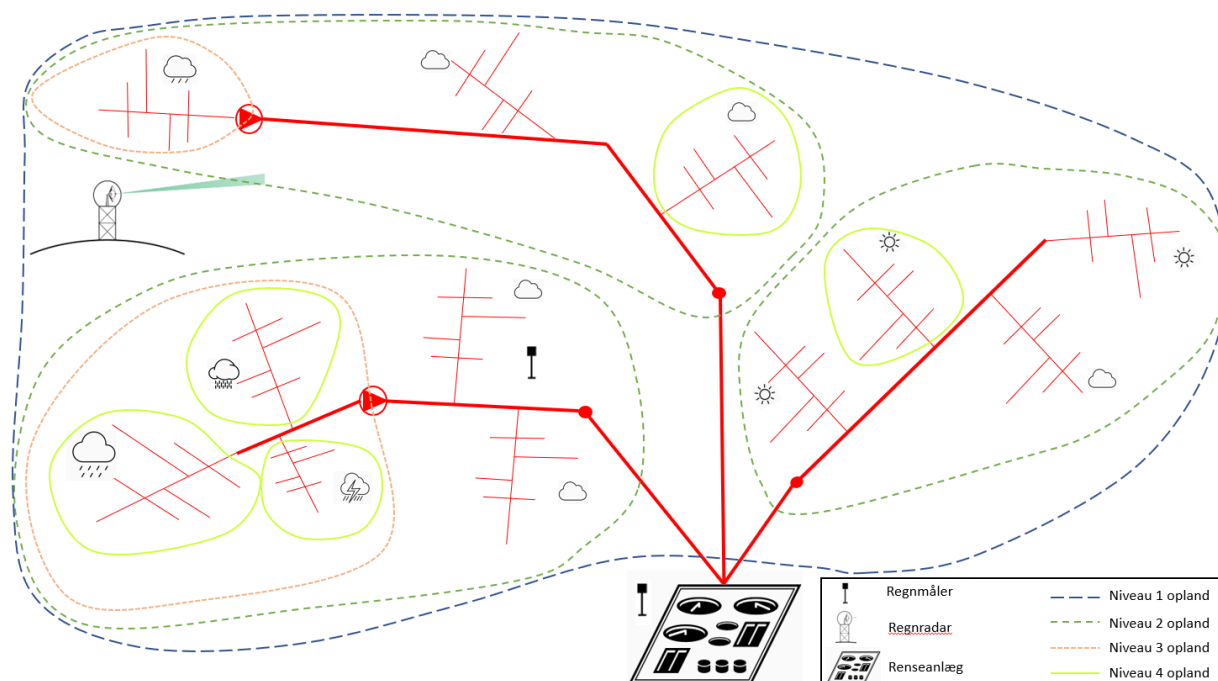
Ved indlæsning af pumpedata og dekomponerede flows fra hhv. Aarhus Vand og arbejdsplan 3 har HOMIS vist sig at være en god platform til at udstille data, så det er nemt at se udviklingen af uvedkommende vand over tid samt opsætte et varslingsystem til automatisk overvågning. I HOMIS bliver data håndteret real-time og henter automatisk data fra flere kilder, hvorfor systemet kan opsættes til at hente rå pumpedata fra SRO-systemet. Ydermere kan andre data, såsom nedbørsmålinger og overløbsregistreringer, give værdi i varslingsystemet. Alle data, der kører i real-time på online data kan indlæses automatisk i real-time. HOMIS giver mulighed for at opstille forskellige KPI'er for ledningsnettet, som kan anvendes i varslingsystemet. Af andre KPI'er kan nævnes døgnmængder ift. oplandsareal eller antal PE i et opland, akkumulering af antal overløbshændelser/-volumen pr. år.

5. Konklusion og perspektivering

Sammenstilling af metoderne

I Drainman var intentionen at arbejde med dekomponeringen på forskellige oplandsniveauer henholdsvis

- Niveau 1: Renseanlægsopland
- Niveau 2: Hovedstrukturen for afløbssystemet til renseanlægget
- Niveau 3: Pumpestationsoplande
- Niveau 4: Detailoplande



FIGUR 5.1. Opdeling af afløbssystemet i oplande og deloplande samt opsamling af regndata

Filosofien i Drainman er at skabe en systematisk tilgang til identifikation af uvedkommende vand for derigennem at kunne lave en målrettet indsats for at minimere mængden af uvedkommende vand i oplandet. Projektet har set på Viby-oplandet i Aarhus Vands forsyningsområde, hvor oplandet blev opdelt i fire niveauer, som illustreret i Figur 5.1.

I en normal situation, hvor tidsperspektivet ikke er en faktor, vil forsyninger sandsynligvis gå til de 4 niveauer sekventielt og ikke på samme tid. Dermed vil identifikationen af det uvedkommende vand på ledningsniveau, niveau 4, være målrettet de oplande, hvor problematikken med uvedkommende vand vil være størst baseret på analyse fra et lavere niveau.

I Drainman indeholder niveau 1 en kortlægning af flow ind på renseanlægget i Viby med en identifikation af flow profiler og dekomponeringer af flowet. Dekomponeringen på niveau 1 vil synliggøre, hvorvidt der er problemer med uvedkommende vand.

Niveau 2 vil kortlægge, om uvedkommende vand kan lokaliseres til delområderne på renseanlægsniveau. Gennem dekomponering vil det være muligt at synliggøre, om det er samme komponent, som giver problemer med det uvedkommende vand i alle delområder. En sammenligning mellem de forskellige delområder vil give forsyningen indblik i, hvilket delområde giver det største bidrag, og dermed kunne målrette indsatsen mod det uvedkommende

vand. Aarhus Vand havde i projektets opstart udpeget Tranbjerg, Beder, Mårslet og Solbjerg som delområderne til Viby renseanlæg med mest uvedkommende vand.

For niveau 3 vil der gennem en dekomponering på pumpestationsoplandsniveau skabes et overblik over, hvilket delopland har størst problemer med uvedkommende vand og hvilken komponent, som er årsag hertil.

For niveau 4 er der gennem realtidsdekomponering af flow og machine learning skabt et uvedkommende vand indeks på ledningsniveau i Tranbjerg. Dette giver Aarhus Vand et grundlag for yderligere undersøgelser af enkelt-ledningsstræk og herefter målrette indsatser til fjernelse af det uvedkommende vand.

Formålet med arbejdsplaner 2, 3 og 4 har været at give Aarhus Vand en værktøjskasse og vurdering af forskellige metoder til identifikation af uvedkommende vand. Gennem Drainman er skabt en systematisk tilgang til identifikation af det uvedkommende vand gennem forskellige metoder til dekomponering. Denne tilgang kan anvendes direkte hos andre forsyninger og kan desuden skabe grundlag for en standardisering af metoden for lokalisering af uvedkommende vand i separate spildevandssystemer.

Erfaringer fra Drainman

Ved at arbejde på niveau 1 (Renseanlægsoiland) vil man hurtigt kunne kortlægge omfanget og komponenterne af uvedkommende vand, hvilket kan bruges til analyse af, hvorvidt denne komponent er problematisk i forhold til driften af systemerne og til vurdering af, om komponenten er årsag til manglende overholdelse af krav til serviceniveau og målopfyldelse til recipienten. Analysen kan ligeledes bruges i asset management-systemer til vurdering af, om det er økonomisk fordelagtigt at nedbringe delkomponenterne af uvedkommende vand.

Gennem erfaringer fra Drainman-projektet er det blevet overkommeligt at implementere nogle af analysemetoderne på de forskellige niveauer, såfremt der eksisterer sensorer ved indløbet til renseanlæggene og ved eksisterende pumpestationer. I de tilfælde, hvor der ikke eksisterer sensorer i oplandet til renseanlægget, vil det være fordelagtigt at starte kortlægningen på renseanlægsoilandet og hovedvandvejene til renseanlægget. Denne kortlægning vil hurtigt kunne kvantificere mængden af uvedkommende vand for de forskellige delkomponenter fordelt på hovedvandvejene, dvs. på baggrund af en struktureret opdeling af oplandet og en systematiseret tilgang til identifikationen af det uvedkommende vand.

Med et overblik over, hvilke delkomponenter af uvedkommende vand der bidrager på hovedoplandet og sammenholdt med resultaterne af asset management værktøjerne, kan en forsyning aktivt vælge at opsætte flere målere på forskellige niveauer for aktivt at kortlægge kilderne til uvedkommende vand og lave indsatser for at reducere disse. Det vil dog blive en bekostelig investering for forsyningen at implementere faste Niveau 4-målere på alle oplande. Læringen fra Drainman er, at niveau 1, 2 og 3 ofte skaber et tilstrækkeligt overblik over tilstedeværelsen af uvedkommende vand udelukkende med brug af eksisterende sensorer suppleret med få ekstra sensorer. Det er først økonomisk fordelagtigt at instrumentere på Niveau 4, når de andre niveauer indikerer uvedkommende vand, hvor delkomponenten af det uvedkommende vand er identificeret og gevinsten ved at reducere denne er til stede. Alternativet til mange målere på Niveau 4 er skabelse af et dynamisk hjælpeag, hvorigennem det vil være muligt at indkredse de områder, som aktivt bidrager med uvedkommende vand. Det dynamiske hjælpeag kan skabes ved anvendelse af machine learning til "mønstergenkendelse" af "typiske" parametre i det fysiske system (alder på ledninger, anlægsår, jordtyper, grundvandsstand osv.), som giver sandsynlighed for at identificere uvedkommende vand. Det dynamiske hjælpeag, skabt med machine learning, kan forfines ved en kombination med realtidsflowmålinger. Realtidsmålinger fanger nuancerne i flowmønsteret og gengiver det fysiske flow i forhold til de forventede værdier. En styrke i realtidsmålinger er, at disse altid er up-to-date og ikke afhængige af forudsætninger, som kan være af ældre dato. En ulempe er dog, at værdien af realtidsmålinger kræver måling over lang tid, med en uges målinger for en sensor på forskellige lokationer eller flere sensorer i drift på forskellige lokationer, hvilket er forholdsmæssigt udstyrstungt.

Den opnåede viden om uvedkommende vand sammenholdt med andre indikatorer til udpegning af systematisk fornyelse af ledningssystemet vil bidrage til en god langsigtet strategi for nedbringelse af uvedkommende vand med færreste investeringer med kort afskrivningsperiode.

Ydermere vil det for Aarhus Vand bidrage til nedbringelse af uvedkommende vand fra spildevandssystemet til rensningsanlæg og pumpestationer samt til nedbringelse af den maksimale peak under regn, således at Aarhus Vand vil

- Minimere driftsudgifterne til pumpning og rensning
- Minimere anlægsudgifterne til ledningsanlæg og bygværker
- Reducere de utilsigtede miljømæssige påvirkninger af recipienten
- Reducere manglende overholdelse af kravene

5.1 Videre anvendelse / Perspektivering

I Drainman-projektet er der arbejdet med kvantificering af uvedkommende vand i spildevandssystemet og dekomponering af uvedkommende vand i fraktionerne spildevand, grundvand samt langsom og hurtig regnbetinget uvedkommende vand.

Fremadrettet kan disse dynamiske analyser bruges til at "holde øje" med uvedkommende vand, således at det sikres, at servicesystemet lever op til gældende krav og ikke giver driftsmæssige forstyrrelser i alle funktionssituationer. Metoden kan bringes i anvendelse på alle sensorer i systemet, hvilket kan give et overblik over de geografiske og årstidsbestemte forskelle i de enkelte komponenter.

Drainman kan hjælpe med at skabe et overblik over uvedkommende vand og konsekvenserne heraf, således at forsyningen kan vurdere, hvorvidt denne fremadrettet skal designe systemerne for uvedkommende vand med en geografisk variation i designkriterierne, eller om forsyningen skal forsøge at kortlægge og afhjælpe mængden af uvedkommende vand gennem systematisk fornyelse og sporing af kilderne. Sporingen af kilderne vil desuden bidrage til en indsigt i, hvor fornyelsesbudgettet for afløbssystemet bedst anvendes.

Det vil være muligt at opnå en endnu bedre kvalificering af delkomponenterne for det uvedkommende vand pr. delopland ved at supplere SVK-regnmålerne med radarnedbør. Målingen af den spatiale regn vil dermed kunne supplere analyserne med en bedre viden om responsen i afløbssystemet fra det regnpåvirkede oplandsareal.

Planlægningsmæssige perspektiver:

Kvantificeringen og dekomponeringen af uvedkommende vand kan bruges som input til validering af hydrauliske modeller. De hydrauliske modeller anvendes som værktøj til den langsigtede planlægning og anlægsinvestering.

Teoretisk set designer forsyningerne ikke spildevandssystemerne for regnbetinget uvedkommende vand, men anvender sikkerhedsfaktorer. Med et større kendskab til de geografiske og årstidsbestemte forskelle i de enkelte komponenter af uvedkommende vand vil sikkerhedsfaktoren kunne nedjusteres og erstattes af en mere kendt viden om de utilsigtede vandstrømme.

Idet metoderne kan give et geografisk overblik over de enkelte komponenter, kan det bidrage som input til asset management-prioriteringsværktøjet til fornyelse af systemerne.

Værktøjet kan hjælpe med at udpege en prioriteret målestrategi til nedbringelse af uvedkommende vand og dermed også nedbringelse af overløb.

Driftsmæssige perspektiver:

Ved at dekomponere uvedkommende vand kan der skelnes imellem kilderne, hvilket kan bruges til en driftsmæssig optimering. F.eks. kan pumpestationens ydelse optimeres i forhold til kilderne, som kan være årstidsafhængige.

Ligeledes kan man med et dynamisk værktøj til bestemmelse af uvedkommende vand i fremtiden "styre" systemerne med henblik på at minimere konsekvensen af utilsigtede vandstrømme ved brug af f.eks. machine-learning til genkendelse af lignende situationer. Som eksempel kan bevidst drosles på opstrømsliggende pumpestationer, således at der kun sker en "lokal" overbelastning og aflastning i oplandet med mest uvedkommende vand fremfor i alle de nedstrømsliggende systemer.

De fire metoder

De forskellige metoder for dekomponering fungerer fundamentalt set fint og løser opgaven. Der er forskelle i metoder og dermed også forskelle i resultaterne. Fælles for alle metoderne er dog en direkte afhængighed af pålidelige regndata og flowdata. Specielt for realtidsanvendelserne er det kritisk, at data er af god kvalitet og kommer som en kontinuert strøm. De metoder, der også understøtter planlægning og dermed kigger på lange tidsserier, er mindre følsomme for huller i data eller svingende kvalitet. I dette projekt har vi været begunstiget af god datakvalitet og datatilgængelighed. Både de historiske data og realtidsdata har kunnet anvendes til analyserne, men selv i et meget velorganiseret og vedligeholdt system som hos Aarhus Vand optræder der huller i data, anomalier og andre skævheder, der tilsiger, at data ikke bør anvendes uden et kritisk eftersyn ift. det aktuelle formål.

Som diskuteret ovenfor giver alle 4 metoder en opdeling på flowkomponenter, der ikke er markant forskellige. Et par korte kommentarer til de enkelte metoders styrke, som kan give inspiration til andre forsyninger:

RDI-model

Giver en fin beskrivelse af sæsonvariationer på grundvandsindsivning, men kræver mindst et års data for at få denne variation med. RDI-modellen er hurtig og nem at sætte op og kan bruges som overfladebeskrivelse til MIKE URBAN. Det er nemt og hurtigt at udvide overflademodellerne i MIKE URBAN til at inkludere RDI. Modellen er stærkest til planlægning og skalerbar fra hele oplandet til mindre delområder. Resultaterne er kontinuerte og har ikke spring i værdierne for det dekomponerede vand.

Machine Learning model

Modellen er opbygget således, at en række grundlæggende parametre fastlægges ved en træningsprocedure. For at få årstidsvariationer med skal træningsdatasættet helst dække 12 måneder og gerne mere. Modellen giver kontinuerte variationer i de forskellige delkomponenter og svarer derfor fint til de fysiske processer i den virkelige verden. Modellen er lige anvendelig til planlægning og realtid under forudsætning af, at den bliver fodret med realtidsdata for regn og flow. Modellen er skalerbar for de forskellige niveauer.

Statistisk dekomponering

Bruger både eksisterende og nye flowmålere til at lave en analyse af flowmålinger. Ved at analysere tørvejrflow er det muligt at finde indsyning og et karakteristisk spildevandsprofil. Disse variationer hen over året kan simpelt findes ved løbende at opdatere "standard ugevariation" af tørvejrsmålinger. Metoden kan anvendes på alle 4 niveauer i både off- og online konfiguration. Typisk kan der laves analyser hvert døgn. Metoden giver et overblik over opland og kan bruges til at evaluere andre målinger og modeller. Metoden er velegnet i situationer med løbende driftsovervågning.

Realtidsdekomponering af målt flow

Realtidsmåling af flow ved hjælp af ultralyds- og niveausensor giver et punktindsigt i totalt flow i afløbssystemet, som nemt kan opnås ved brug af mobilt udstyr, der let flyttes fra lokation til lokation. I Drainman bliver realtidsflowet dekomponeret i realtid i forhold til opdeling af "solgt vand" eller modelsat PE per opland, regnbetinget flow og langsomt indtrængende uvedkommende vand. Styrken ved denne metode er fleksibilitet og dokumentationen af, hvad der sker i virkeligheden. Yderligere kan realtidsflowet bruges til kalibrering af modeller, som hurtigere giver resultater for hele afløbssystemer.

5.2 Konklusion

Projektet Drainman har arbejdet med at dokumentere forskellige tilgange til identifikation af uvedkommende vand og en foreslået systematik i detektivarbejdet med at finde uvedkommende vand. Erfaringerne på tværs af projektet er, at alle metoder har forskellige styrker og svagheder, og at metoderne bruges bedst på tværs til at identificere uvedkommende vand fra forskellige vinkler.

Uvedkommende vand er relevant både i en planlægningsfase og i driftsfasen. Resultaterne i Drainman giver værdi i begge faser, hvor forsyninger, myndigheder eller andre ledningsejere får tilført en fornyet indsigt i nye metoder, systematisk tilgang og et begrebsapparat. Gennem hele projektet har partnerne udvekslet viden og synsvinkler i

kortlægningen af det uvedkommende vand. Vi har med projektet forsøgt at bidrage til en ensartet definition af uvedkommende vand i spildevandssystemet gennem dekomponeringen og en struktureret metodeanvendelse.

6. Bilagsliste

Arbejdspakke 2

AP2-1: Sensitivitets analyse af 3 forskellige målemetoder (UK)

AP2-2: Evaluering af Hydraulisk flow måleudstyr

AP2-3: Proof of Concept: Capacitance – water level sensor

AP2-4: Method to estimate gravitation flow (UK)

Arbejdspakke 3

AP3-1: Dekomponering af målt flow (UK)

AP3-2: Dekomponering RDI model

AP3-3: Machine learning

AP3-4: Statistisk dekomponering

Arbejdspakke 4

AP4-1: Dynamisk lag

7. Figur-/tabeloversigt

Figur 1.1 Opdeling af afløbssystemet i oplande og deloplande samt opsamling af regndata.	9
Figur 2.1 (Venstre) Brønden med sensorer i bunden. Nummeret svarer til sensornummer, som findes på grafen. (Højre) Graf, som viser højde af vandspejl over bunden (Y-akse), når målingen fra den bestemte sensor (X-akse) falder under 30 μF .	13
Figur 3.1. Flowdiagram for statistisk adskillelse af flowmåling i hovedkomponenter	16
Figur 3.2 Hierarkisk struktur af oplandet til Viby renseanlæg	17
Figur 3.3 Sammenhæng mellem nedbør og afstrømning (pr måned) fra Tranbjerg for 2-årig periode 2017-2018.	18
Figur 3.4 Sammenligning målt/beregnet af døgnværdier for afstrømning for hhv. 2017 og 2018	18
Figur 3.5 Beregnet fordeling af årlige værdier for afstrømning for hhv. 2017 og 2018	19
Figur 3.6 Beregnet fordeling mellem hurtig og langsom afstrømning for kraftig regnhændelse	19
Figur 3.7 Flowfordelingen for hhv. 2017 og 2018	20
Figur 3.8 Sammenligning mellem målt og beregnet flow i perioden 30/12-17 til 11/1-18	21
Figur 3.9 Komponentfordeling, hvor rød markering viser match med målt hændelse d. 10 januar 2018	21
Figur 3.10 Sammenligning mellem målt og beregnet for en given periode, hvor der formentlig mangler registrering af en regnhændelse	22
Figur 3.11 Beregnet flowfordeling for perioden oktober 2019 til september 2020 - og de to kalibreringsår	22
Figur 3.12 Beregnede og målte resultater for perioden 26/1 - 8/3 2020	23
Figur 3.13 Beregnede og målte resultater for 23/7-15/8 2020	23
Figur 3.14 Beregnede og målte resultater for 1/10-2019 til 30/9 2020, forskellige integrationsintervaller, event defineret som afsluttet, når der ikke har været hurtig afstrømning i 3 timer	24
Figur 3.15 Eksempel på web-dashboard, hvor forsyningen kan vælge nøgleparametre for alle deloplande i forvaltningsområdet	25
Figur 3.16 Beregnet regnbetinget vand i kloaksystemet i Solbjerg-område i periode 2017-2018. Orange farver indikerer kort (hurtige) respons, mens blå farver indikerer lang (fulde) respons. Linjerne er lineære tendenslinjer.	25
Figur 3.17 Regnmålinger fra den 22. maj 2020	26
Figur 3.18 Dekomponeret flow på Viby renseanlæg for uge 21, hvor den 22. maj er torsdag.	26
Figur 3.19 Dekomponeret flow for Viby renseanlæg den 22. maj på timebasis	27
Figur 4.1. Pumpedata for de 5 oplandsbyer, døgnsummen er divideret med oplandsarealet	33
Figur 4.2. Dekomponerede flows fra machine learning metoden beskrevet i afsnit 3.3.2. Her vist for Tranbjerg-oplandet, med summerede værdier pr. uge.	33
Figur 4.3. Dekomponeret flow fra machine learning metoden beskrevet i afsnit 3.3.2. Her er vist den grundvandspåvirkede indsivning, data er summeret pr. måned. Den røde stiplede linje angiver, at der er indsat en varslings, hvis månedsmængden overstiger denne.	34
Figur 4.4. UV-indeks på ledninger i Tranbjerg. Grøn svarer til lav risiko og rød er høj risiko for uvedkommende vand.	35
Figur 4.5. Grundvandsindsivning pr. ledningsstrækning pr. år	36
Figur 5.1. Opdeling af afløbssystemet i oplande og deloplande samt opsamling af regndata	37

Tabel 1.1: Komponenter af uvedkommende vand, deres konsekvenser og mulige tiltag.	8
Tabel 1.2: Følgende mål er formuleret som de vigtigste i Drainman-projektet	10
Tabel 2.1: Mål med arbejdspakke 2.	11
Tabel 3.1: Oversigt over projektmål, der er behandlet i Arbejdspakke 3.	15
Tabel 3.2: Infiltrationsfaktorer for regnhændelsen den 22. maj. De anførte tal under faktorer er målt flow i m ³ /d	27
Tabel 3 Sammenligning af de fire metoder.	28
Tabel 4.1. Delmål i arbejdspakke 4.	30

Drainman – Uvedkommende vand og det intelligente spildevandssystem

Drainman-projektet består af flere elementer i jagten på forståelsen af det uvedkommende vand. Gennem projektet er der afprøvet forskellige metoder for måling af realtidsflow for at analysere og dekomponere flow i søgen efter kilderne til uvedkommende vand: spildevand, langsom afstrømning, hurtig afstrømning samt grundvandsfraktion. Gennem en række analyser er det afdækket, at bl.a. afløbsledningens diameter er af stor betydning for nøjagtigheden i omsætning af målt vandstand til beregnet flow.

Desuden er der udarbejdet et koncept til måling af flow i en brønd med det formål at reducere omkostninger til måleudstyr og arbejdsindsatsen med at vedligeholde måleudstyr i et aggressivt miljø og uforudsigeligt spildevandsflow.



Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk