

## **Beregning av fremmedvann i avløpssystemet i Skredderstubekken**

### **Calculation of Extraneous Water in the Sewage System of Skredderstubekken**

**Trondheim Mai 2024**

Navn studenter:

Mohammad Ebrahim Hosseini

Intern veileder:

Marius Møller Rokstad

Ekstern veileder:

Randi Aamodt

Prosjektnr:

2024 -14

Rapporten er ÅPEN



**NTNU**

Fakultet for ingeniørvitenskap

Institutt for bygg- og miljøteknikk

## Problemdefinering

Prosjektet tar for seg problematikken med fremmedvann i avløpsnett i Skredderstubekken, et nedbørsfelt i Nordre Follo kommune. På grunn av alderen på infrastrukturen er spillvannsledningene ikke fullstendig tette, noe som fører til inntrengning av fremmedvann i spillvannssystemet.

I denne prosjektoppgaven vil studenten undersøke samspillet mellom spillvannsnett og overvannsnett, en tilnærming som sjelden anvendes da de fleste kommuner kun opererer med SP-modeller. Kommunen hadde opprinnelig en SP-modell, men da de fikk en OV-modell, oppdaget de at denne var feilkalibrert. Derfor var det nødvendig å først kalibrere OV-modellen. Basert på den kalibrerte modellen vil studenten estimere andelen fremmedvann i spillvannsnett til Skredderstubekken.

## Resultatmål

- Kalibrere overvannsmodellen for Skredderstubekken.
- Analysere resultatene fra den kalibrerte modellen og sammenligne disse med måledata.
- Estimere andelen fremmedvann i spillvannssystemet under tørre værforhold og under nedbørshendelser.
- Estimere andelen fremmedvann i spillvannssystemet i løpet av måleperioden i 2021.

## Stikkord

Fremmedvann

MIKE+

Klimaendringer

Skredderstubekken

Nordre Follo Kommune

Konstant innlekking og utlekking

Nedbørsavhengig innlekking og RDI

Simulering

Værforhold

Effektivitet

## Forord

Denne oppgaven er utarbeidet av studenten Mohammad Ebrahim Hosseini, som studerer infrastruktur ved byggingeniørstudiet på Norges Teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) i Trondheim. Tidlig i studieløpet fant jeg en interesse for vann- og avløpssystemer, spesielt innen modellering og kalkulasjon, og ble derfor svært glad da jeg fikk muligheten til å jobbe med en fremmedvannoppgave gjennom Nordre Follo kommune.

Bruken av modelleringsprogrammet MIKE+ var nytt for meg, og selv om oppstarten var utfordrende med flere frustrasjoner, ble jeg etter hvert komfortabel med programmet gjennom prøving og feiling, samt ved å søke råd og stille spørsmål.

Jeg vil rette en stor takk til Randi Aamodt, rådgiver i vann- og avløp i Nordre Follo Kommune, for å ha tilbudt meg denne spennende og lærerike oppgaven, og for hennes raske tilbakemeldinger og støtte, inkludert å legge til rette for kontakt med Multiconsult for opplæring i MIKE+. En spesiell takk går også til Bhuwan Panday, min medstudent, som bistod meg med programmering når det trengtes.

Tillegg ønsker jeg å takke DHI for deres generøsitet ved å tilby en studentlisens for MIKE+.

Til slutt vil jeg uttrykke min takknemlighet til min veileder Marius Møller Rokstad fra instituttet for hans verdifulle veiledning og anbefalinger gjennom prosjektet.

Mohammad Ebrahim Hosseini

20.05.2024

## Sammendrag

Dette prosjektet undersøker problemet med fremmedvanninfiltrasjon i avløpsnett til Skredderstubekken, et nedbørsfelt i Nordre Follo kommune, Norge. Hovedmotivasjonen bak denne studien er den aldrende infrastrukturen, som gjør at avløpsrørene ikke er helt tette, noe som fører til betydelig infiltrasjon av ikke-spillvann i systemet. Prosjektet har som mål å kalibrere en overvannsmoell ved hjelp av MIKE+ programvare og deretter bruke en kombinert overvanns- og spillvannsmoell for å simulere avløpsstrømmer under ulike meteorologiske forhold. Det endelige målet er å kvantifisere andelen fremmedvann i avløpsnett ved hjelp av vannbalansemetoden.

Prosjektet startet med kalibreringen av overvannsmoellen basert på observerte hydrologiske data fra juni og juli 2023. Denne kalibreringsprosessen var essensiell for å sikre nøyaktigheten av moellens prediksjoner angående vannstrøm og infiltrasjon. Deretter ble en kombinert moell, som integrerer både overvanns- og spillvannskomponenter, utviklet og kalibrert. Denne kombinerte moellen ble så brukt til å simulere avløpsstrømmer under forskjellige værforhold observert i 2021.

Kalibreringen involverte flere viktige trinn, inkludert justering av moellens parametere for å samsvare med de empiriske dataene. Kalibreringsprosessen avdekket at den opprinnelige overvannsmoellen var feilkalibrert da den tok hensyn til for mye regnvann. Derfor ble kalibreringen av overvannsmoellen prioritert for å rette opp disse avvikene.

Den kalibrerte kombinerte moellen ga innsikt i dynamikken til fremmedvann i avløpssystemet. Funnene fra moellsimuleringene indikerte at fremmedvann betydelig bidrar til den totale avløpsstrømmen. Spesielt viste moellen at fremmedvann utgjorde omtrent 43% av den totale avløpsstrømmen i måleperioden 2021. Denne infiltrasjonen ble kategorisert i to hovedtyper: konstant lekkasje, som utgjorde 17%, og nedbørsavhengig infiltrasjon, som utgjorde 26%.

Disse resultatene oversteg de opprinnelige estimatene og fremhevet den betydelige påvirkningen av både konstant og nedbørsavhengig innlekking på avløpssystemet. Studien fremhever det kritiske behovet for robust utforming av urbane dreneringssystemer og viktigheten av å vedlikeholde og oppgradere aldrende infrastruktur for å redusere effektene av fremmedvann.

Prosjektet avsluttes med flere sentrale anbefalinger rettet mot forbedring av urban vannforvaltning. For det første er det behov for forbedret infrastruktur for å redusere både konstant og nedbørsavhengig innlekking. Regelmessig vedlikehold og oppgraderinger av avløpssystemet er

essensielt for å sikre dets effektivitet og bærekraft. For det andre anbefales videre forskning for å forbedre nøyaktigheten til hydrologiske modeller som MIKE+, slik at mer presise simuleringer og bedre informerte vannforvaltningsstrategier kan utvikles.

## Abstract

This project investigates the issue of extraneous water infiltration within the sewage network of Skredderstubekken, a catchment area located in Nordre Follo kommune, Norway. The primary motivation behind this study is the aging infrastructure, which causes the sewage pipes to be not entirely impermeable, leading to significant infiltration of non-sewage water into the system. The project aims to calibrate a stormwater model using MIKE+ software and subsequently employ a combined stormwater and wastewater model to simulate wastewater flows under various meteorological conditions. The ultimate goal is to quantify the proportion of extraneous water within the wastewater network using the water balance methodology.

The project commenced with the calibration of the stormwater model based on observed hydrological data from June and July 2023. This calibration process was essential to ensure the accuracy of the model's predictions regarding water flow and infiltration. Following this, a combined model, which integrates both stormwater and wastewater components, was developed and calibrated. This combined model was then used to simulate the wastewater flows under different weather conditions observed in 2021.

The calibration involved several key steps, including adjusting the parameters of the model to match the empirical data. The calibration process revealed that the initial stormwater model was incorrectly calibrated as it accounted for excessive rainwater. Therefore, the calibration of the stormwater model was prioritized to correct these discrepancies.

The calibrated combined model provided insights into the dynamics of extraneous water within the sewage system. The findings from the model simulations indicated that extraneous water significantly contributes to the overall wastewater flow. Specifically, the model revealed that extraneous water constituted approximately 43% of the total wastewater flow during the 2021 measurement period. This infiltration was categorized into two main types: constant leakage, which accounted for 17%, and precipitation-dependent infiltration, which made up 26%.

These results exceeded the initial estimates and highlighted the substantial impact of both constant and precipitation-dependent leakage on the sewage system. The study's findings underscore the critical need for robust urban drainage system design and the importance of maintaining and upgrading aging infrastructure to mitigate the effects of extraneous water.

The project concludes with several key recommendations aimed at improving urban water management. Firstly, there is a need for enhanced infrastructure to reduce both constant and precipitation-dependent leakage. Regular maintenance and upgrades to the drainage system are essential to ensure its efficiency and sustainability. Secondly, further research is recommended to refine the accuracy of hydrological models like MIKE+, enabling more precise simulations and better-informed water management strategies.

# Innholdsfortegnelse

1 Introduksjon .....	1
1.1 Bakgrunn .....	1
1.2 Formål .....	2
1.3 Oversikt over oppgavens struktur .....	2
2 Teoretiske Bakgrunn .....	4
2.1 Definisjonen av fremmedvann .....	4
2.2 Konsekvenser av fremmedvann .....	4
2.3 Metoder for identifisering av fremmedvann i avløpssystemer .....	5
2.3.1 Vannbalansemetoden .....	5
2.3.2 Fortynningsmetoden .....	6
3 Metodikk for kalibrering .....	7
3.1 Beskrivelse av studieområdet og datakilder .....	7
3.2 Oversikt over den benyttede overvannsmodellen .....	9
3.3 Fremgangsmåten for kalibrering av modellen .....	12
4 Kalibrering og Resultater- Del 1: Overvannsmodellering .....	13
4.1 Hvor kommer vannet fra? .....	13
4.1.1 Catchment: .....	13
4.1.2 Ledninger: .....	14
4.2 Kalibrering av Manning-tall i Ledninger for Tørrværs Vannføring .....	17
4.3 Andel tetteflater for nedbørshendelser .....	20
4.4 Ferdig Kalibrert Modell .....	23
4.4.1 Vannbalanse i juni .....	24
4.4.2 Vannbalanse i juli .....	25
4.5 Feilkilder i den kalibrerte modellen .....	26
5 Dataanalyse og Resultater-Del 2: sammensatt modell .....	27
5.1 Beskrivelse av Modellen .....	27
5.2 Vannføring under Tørre og våte værforhold .....	28
5.2.1 Tørrvær vannføring .....	28
5.2.2 Vannføring under regnhendelser .....	28



5.3 Bruk av vannbalansemetoden for estimering av fremmedvann .....	30
5.3.1 Teoretisk vannføring basert på antall PE .....	30
5.3.2 Andel fremmedvann i tørrvær .....	31
5.3.3 Andel fremmedvann under regnhendelser .....	33
5.3.4 Andel fremmedvann i hele måle periode i 2021.....	35
6 Diskusjon.....	37
6.1 Diskusjon om resultater.....	37
6.2 Betydning av funnen.....	37
6.3 Begrensninger i studien og forslag til fremtidig forskning.....	38
7 Referanser.....	40
8 Vedlegg .....	41
Vedlegg A: Artikkel .....	41
Vedlegg B: Observert nedbør i juni 2023.....	43
Vedlegg C: Vannføring under nedbørshendelser i juni .....	44
Vedlegg D: Filtrering av catchments etter andel av permeable flater .....	45
Vedlegg E: Vannføring etter 5 % øking i andel tetteflater .....	48
Vedlegg F: Vannføring etter integrering av vannføringsregulator.....	49
Vedlegg G: Vannføring i juni og juli etter kalibrering .....	50
Vedlegg H: Beregning av vannvolum .....	51
Vedlegg I: Observert nedbør 2021 .....	53
Vedlegg J: Måltvannføring spillvann .....	54
Vedlegg K: Beregning og plotting av vannførings data .....	55

# 1 Introduksjon

I løpet av de siste tiårene har utfordringene knyttet til håndtering av fremmedvann i urbane avløpssystemer blitt stadig mer fremtredende både i Norge og på global skala. Forskning indikerer at gjennomsnittlig innslag av fremmedvann i norske kommunale avløpsnett kan overstige 50%, noe som påvirker effektiviteten og økonomien i vannbehandlingsprosesser [6]. Med fokus på Skredderstubekken, et nedbørsfelt i Nordre Follo kommune, utforsker denne studien mulighetene for presis modellering av fremmedvann ved hjelp av overvannsmodellen og spillvannmodellen i modelleringsprogrammet MIKE+.

## 1.1 Bakgrunn

Fremmedvann i avløpsnett representerer en betydelig utfordring for effektiviteten i urban spillvannhåndtering. Denne problemstillingen, som omfatter uønsket tilstrømming av grunnvann, overflatevann og andre eksterne vannkilder til avløpssystemer, har vist seg å være en betydelig belastning for behandlingsanlegg og infrastruktur, med potensielle oversvømmelser og forurensning som følge [5]. En rapport fra Vannforeningen har belyst at over halvparten av vannet i noen norske kommunale avløpsnett er fremmedvann, noe som underbygger alvoret i situasjonen [6].

Modellering spiller en avgjørende rolle i håndteringen av disse utfordringene. Den tillater detaljerte analyser av avløpsnett under forskjellige forhold og hjelper i planleggingen av både kortsiktige og langsiktige tiltak [1]. Bruken av modelleringsverktøy strekker seg over flere områder:

1. Hovedplaner: Utvikling av kapasitetskart, utførelse av utslippsanalyser, og flomanalyser for å sikre robuste systemer.
2. Saneringsplaner: Integrasjon av tiltaksanalyser og kost-nyttevurderinger for å forbedre eksisterende infrastruktur.
3. Utbyggingsplaner: Sørger for at nye tilføyelser til nettverket er bærekraftige og ikke overbelaster eksisterende strukturer.
4. Klimatilpassning: Scenarioanalyser som tar høyde for fremtidige klimaendringer og potensiell innvirkning på vannstanden i lokale resipienter.
5. Systemanalyser: Innebarer en grundig evaluering av nettets funksjonalitet og identifisering av kritiske svakheter.

6. Sikkerhetsanalyser: Omhandler strategier for å sikre vannforsyning under krisebetingelser.
7. Risikoanalyser: Fokuserer på aspekter som vannkvalitet, forurensningsrisiko, og flomrisiko.

MIKE+ er brukt som modelleringsverktøy for denne studien fordi Nordre Follo kommune har modellen i denne programvaren. Til tross for at forfatteren ikke har tidligere erfaring med MIKE+, vil dette prosjektet bidra til å utvikle nødvendig kompetanse og gi verdifulle innsikter i avløpsnettets dynamikk og utfordringer knyttet til fremmedvann.

## 1.2 Formål

Formålet med denne oppgaven er å fordype seg i studiet av fremmedvann i nedbørsfeltet Skredderstubekken i Nordre Follo kommune. Først vil jeg utforske utfordringene knyttet til fremmedvann i avløpsnett og undersøke eksisterende metoder for å estimere andelen fremmedvann. Deretter vil fokuset være på å kalibrere en overvannsmodell ved hjelp av simuleringsprogrammet MIKE+, basert på tilgjengelige måledata. Dette er nødvendig siden den opprinnelige OV-modellen ga for høye vannføringsverdier, og derfor må OV-modellen kalibreres først for å sikre presise simuleringer og pålitelige resultater. Den kalibrerte OV-modellen skal deretter brukes i sammenheng med en spillvannsmodell for å estimere andelen fremmedvann i spillvannsnettet.

Hovedmålet er å kunne estimere andelen fremmedvann under ulike værforhold i dette området. Gjennom en kombinasjon av teoretisk innsikt og praktiske ferdigheter vil oppgaven gi studenten verdifull kunnskap om håndtering av fremmedvann og bruk av simuleringsverktøy i vannforvaltning.

## 1.3 Oversikt over oppgavens struktur

Oppgaven er strukturert i åtte kapitler, som hver tar for seg ulike aspekter av studien:

1. Introduksjon: Dette kapitlet gir en grundig oversikt over formålet, omfanget og den overordnede relevansen av forskningen.
2. Teoretisk bakgrunn: Her utforskes den vitenskapelige og teoretiske rammen som understøtter studien, med fokus på tidligere arbeid og teorier knyttet til fremmedvann i avløpsnett.

3. Metodikk for kalibrering av overvannsmodellen: Dette kapitlet beskriver i detalj metodene og prosedyrene som benyttes for å kalibrere overvannsmodellen, herunder valg av parametere og tilnærminger.
4. Gjennomgang av kalibreringen av overvannsmodellen: Her presenteres den faktiske kalibreringsprosessen og en analyse av resultatene oppnådd gjennom kalibreringen.
5. Dataanalyse for den sammensatte overvanns- og spillvannsmodellen: Dette kapitlet fokuserer på å studere den sammensatte modellen og utvinne data fra modellen for å estimere fremmedvann ved hjelp av vannbalansemetoden.
6. Diskusjon: Diskusjonen fokuserer på tolkning av resultater, implikasjoner for både teori og praksis, samt eventuelle begrensninger ved studien.
7. Referanser: En detaljert liste over alle vitenskapelige verk og kilder som er sitert eller brukt som grunnlag for forskningen.
8. Vedlegg: Dette kapitlet inneholder ytterligere materiale som støtter studien, som for eksempel datatabeller, teknisk dokumentasjon og tilleggsanalyser.

## 2 Teoretiske Bakgrunn

Dette kapitlet tar for seg definisjonen av fremmedvann, de ulike konsekvensene det medfører, og metodene som anvendes for å identifisere tilstedeværelsen av fremmedvann i avløpssystemer.

### 2.1 Definisjonen av fremmedvann

Det finnes en rekke definisjoner av fremmedvann, som kan variere avhengig av konteksten og den spesifikke avløpssystemets utforming. I separate avløpssystemer, som er designet utelukkende for å håndtere spillvann, regnes alt inntrengende overvann og grunnvann som fremmedvann. Dette er fordi disse systemene ikke er dimensjonert for å transportere annet enn spillvann. I felles avløpssystemer, derimot, er infrastrukturen designet for å kunne transportere både spillvann og andre former for vann som overvann, grunnvann og drensvann. I disse systemene er ikke nødvendigvis all slik vanninntrenging klassifisert som fremmedvann [5].

For denne studien er fremmedvann definert som alt vann som inntrenger i spillvannsrørene som ikke er spillvann. Dette inkluderer overvann og grunnvann som infiltrasjon, som i teorien ikke skulle ha vært til stede i et rent spillvannssystem.

### 2.2 Konsekvenser av fremmedvann

Fremmedvann medfører flere uønskede konsekvenser for avløpssystemer og deres drift. Disse konsekvensene omfatter at fremmedvann tar opp nødvendig kapasitet i avløpsrørene, noe som fører til en rekke operasjonelle og økonomiske utfordringer. For det første øker det behovet for vedlikehold av rørsystemene, ettersom større vannmengder krever hyppigere inspeksjoner og reparasjoner. Dette fører igjen til økte driftsutgifter [5].

Kapasitetsproblemer i både ledningsnett og avløpsrenseanlegg er en direkte følge av fremmedvann. Systemene, som ofte er dimensjonert kun for behandling av spillvann, kan bli overbelastet av det uforutsette volumet, noe som resulterer i redusert effektivitet og økte kostnader. Det går også i overløp før renseanleggene, noe som utgjør en stor del av problemet. I tillegg kan overskudd av vann føre til at renseanleggene må håndtere større mengder enn hva de er bygget for, noe som kan resultere i utilstrekkelig behandling og dermed økt utslipp av næringsstoffer og andre forurensende stoffer. Dette kan forverre tilstanden til resipientene – de naturlige vannforekomstene som mottar behandlet avløpsvann. [5].

En annen alvorlig konsekvens er risikoen for kjelleroversvømmelser, spesielt under kraftige regnhendelser når kapasiteten i avløpssystemet overstiges. Dette skaper ikke bare materielle skader for eiendomseiere, men kan også medføre helserisikoer knyttet til kontaminasjon og muggdannelse [5].

Samlet sett påvirker disse problemene ikke bare den umiddelbare funksjonaliteten til avløpssystemet, men også dets langvarige bærekraft og pålitelighet.

### 2.3 Metoder for identifisering av fremmedvann i avløpssystemer

Det finnes en rekke metoder for å identifisere fremmedvann i avløpssystemer, både gjennom direkte observasjon og målbare teknikker. Direkte observasjonsmetoder inkluderer befaring under ulike værforhold for å observere innlekkasje, rørinspeksjon for å oppdage fysiske defekter, samt fargestoffsporing og røyktesting for å identifisere og spore kilder til innlekkasje. På den andre siden benytter målbare metoder vannføringsdata for å analysere inn- og utstrømming av vann i avløpssystemet, og eventuelle uoverensstemmelser under tørre forhold kan indikere tilstedeværelse av fremmedvann. Fortynningsmetoden, som måler konsentrasjonen av indikatorer som total fosfor over tid, benyttes også for å estimere mengden fremmedvann ved å observere hvordan disse konsentrasjonene fortynnes. Disse metodene er essensielle for nøyaktig identifikasjon og forvaltning av fremmedvann, noe som bidrar til bedre drift og vedlikehold av avløpssystemer [3,5,6].

#### 2.3.1 Vannbalansemetoden

For å anvende vannbalansemetoden effektivt i beregningen av fremmedvann, er det essensielt å ha en grundig oversikt over vannforbruket. I denne metoden beregnes fremmedvannet som differansen mellom de målte avløpsmengdene og det målte vannforbruket. Selv om drikkevannforbruket kan variere betydelig over tid, tillater overslagsberegninger bruk av disse dataene til å estimere andelen fremmedvann i avløpssystemet. Beregninger i vannbalansemetoden utføres ved hjelp av formel 1 [7].

$$\text{Andel fremmedvann [\%]} = \frac{Q_{tot} - PE * Q_{ap}}{Q_{tot}} * 100 \quad (1)$$

Hvor:

$Q_{tot}$  = totale mengder avløpsvann som kommer frem til målepunktet  $\left[ \frac{l}{dag} \right]$

$PE$  = antall personer som er registrert innenfor målesonen.

$Q_{ap}$  = de avløpsmengden hver person produserer hver dag  $\left[\frac{l}{PE \text{ dag}}\right]$

### 2.3.2 Fortynningsmetoden

Fortynningsmetoden bygger på antakelsen om at hver person bidrar med en bestemt mengde sporstoffer, som for eksempel totalfosfor (Tot-P), hver dag. Hvis man måler en høy konsentrasjon av Tot-P i avløpsvannet ved et gitt målepunkt, indikerer dette en lav tilstedeværelse av fremmedvann, siden konsentrasjonen av Tot-P ikke er uttynnet. Omvendt, jo mer avløpsvannet er uttynnet med fremmedvann, desto lavere vil konsentrasjonen av Tot-P være. Dette forholdet gjør det mulig å estimere mengden fremmedvann i avløpssystemet ved å sammenligne målte Tot-P-verdier mot forventede verdier basert på befolkningstall og typisk Tot-P-utslipp per person. For å beregne andelen fremmedvann med fortynningsmetoden, kan man anvende formel 2 [7].

$$\text{andel fremmedvann [\%]} = \left(1 - \frac{c_i}{\frac{P_{pd}}{Q_{ap}}}\right) * 100 \quad (2)$$

Hvor:

$P_{pd}$  = produsert mengde total fosfor (Tot-P) per person og dag  $\left[\frac{mg}{PE \text{ dag}}\right]$

$C_i$  = konsentrasjon av Tot-P inn på målepunktet  $\left[\frac{mg}{l}\right]$

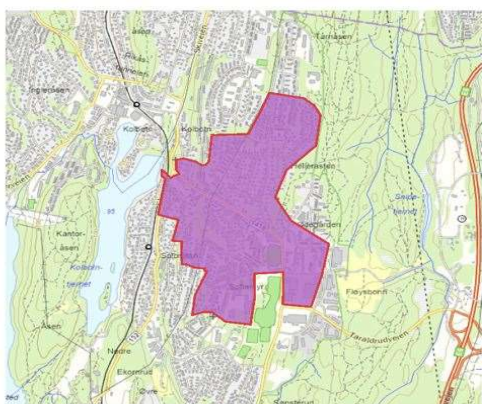
$Q_{ap}$  = de avløpsmengden hver person produserer hver dag  $\left[\frac{l}{PE \text{ dag}}\right]$

### 3 Metodikk for kalibrering

Dette kapittelet tar for seg prosessen med å kalibrere en overvannsmodell for Skredderstubekken nedbørsfelt, basert på målte vannføringer i feltet og tilhørende nedbørsdata. En omfattende beskrivelse av alle tilgjengelige data presenteres for å gi en helhetlig forståelse av modellen før kalibreringen påbegynnes. Dette innebærer en grundig gjennomgang av innsamlede hydrologiske og meteorologiske data, samt en initial vurdering av modellens nåværende tilstand og ytelse. Videre forklarer kapittelet detaljert den metodikken som anvendes for å justere modellparametrene slik at de nøyaktig gjenspeiler de observerte forholdene i nedbørsfeltet. Denne tilnærmingen har som formål å forbedre modellens prediktive nøyaktighet og sikre at den gir pålitelige resultater i simuleringen av vannstrømmene i Skredderstubekken nedbørsfelt.

#### 3.1 Beskrivelse av studieområdet og datakilder

I denne studien rettes fokuset mot Skredderstubekken, et urbant område innenfor grensene til Nordre Follo kommune. Det aktuelle nedbørsfeltet, som dekker et areal på rundt 1,2 kvadratkilometer, er identifisert gjennom den mottatte overvannsmodellen og tjener som et representativt eksempel for urbane nedbørsfelt. Utvelgelsen av Skredderstubekken for denne studien, et valg foretatt av kommunen, understreker områdets betydning og relevans i forhold til forskningsfeltet. Figur 1 viser en oversikt over nedbørsfeltet, hentet fra nevina.nve.no [2], som er bearbeidet for å korrespondere med nedbørsfeltets representasjon i modellen.



Norges vassdrags- og energidirektorat  
NVE

Kartbakgrunn: Statens Kartverk  
Kartdatum: EUREF89 WGS84  
Projeksjon: UTM 33N  
Beregningpunkt: 264713 E  
6637220 N

Nedbørfeltgrenser og feltparametere er automatisk generert og kan inneholde feil. Resultatene må kvalitetssikres.

#### Nedbørfeltparametere

Vassdragsnr.: 005.4B  
Kommune.: Nordre Follo  
Fylke.: Akershus  
Vassdrag.: Gjersjøelva

##### Feltparametere

Areal (A)	1.2 km <sup>2</sup>
Effektiv sjø (A <sub>SE</sub> )	-999 %
Elveengde (E <sub>L</sub> )	-999 km
Elvegradient (E <sub>G</sub> )	-999 m/km
Elvegradient <sub>1085</sub> (E <sub>G,1085</sub> )	-999 m/km
Helning	4 °
Dreneringstetthet (D <sub>T</sub> )	-999 km <sup>-1</sup>
Feltlengde (F <sub>L</sub> )	1.4 km

##### Arealklasse

Bre (A <sub>BRE</sub> )	0 %
Dyrket mark (A <sub>JORD</sub> )	0 %
Myr (A <sub>MVR</sub> )	0 %
Leire (A <sub>LEIRE</sub> )	15.3 %
Skog (A <sub>SKOG</sub> )	16.8 %
Sjø (A <sub>SJO</sub> )	0 %
Snaufell (A <sub>SF</sub> )	0 %
Urban (A <sub>U</sub> )	70.4 %
Uklassifisert areal (A <sub>REST</sub> )	13.2 %

##### Hypsografisk kurve

Høyde <sub>MIN</sub>	99 m
Høyde <sub>10</sub>	136 m
Høyde <sub>20</sub>	149 m
Høyde <sub>30</sub>	153 m
Høyde <sub>40</sub>	156 m
Høyde <sub>50</sub>	158 m
Høyde <sub>60</sub>	160 m
Høyde <sub>70</sub>	163 m
Høyde <sub>80</sub>	165 m
Høyde <sub>90</sub>	168 m
Høyde <sub>MAX</sub>	176 m

##### Klima- /hydrologiske parametere

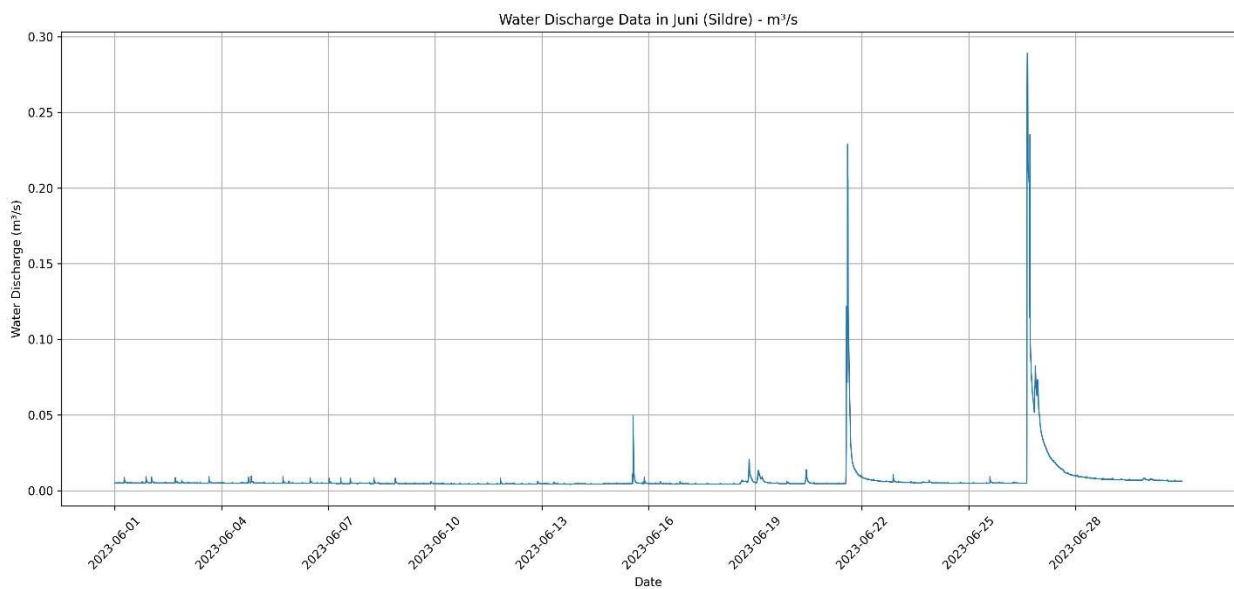
Avrenning 1961-90 (Q <sub>N</sub> )	16.9 l/s*km <sup>2</sup>
Sommernedbør	376 mm
Vinternedbør	395 mm
Årstemperatur	5.0 °C
Sommertemperatur	13.0 °C
Vintertemperatur	-0.8 °C

Figur 1: Oversikt over nedbørsfeltparametere i Skredderstubekken

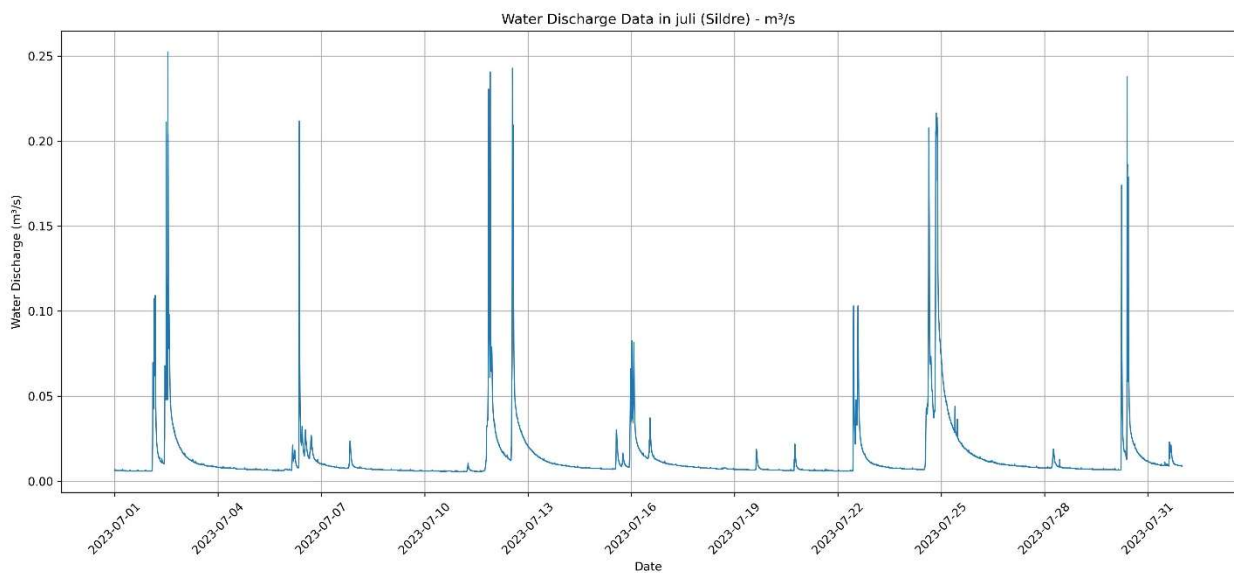


Flere typer data har blitt benyttet for å gjennomføre kalibrering:

- Hydrologiske Data fra Sildre: Denne studien inkluderer vannføringsdata som er hentet fra Sildre.nve.no [4]. Dataene, som gir innsikt i vannmengdene innenfor Skredderstubbekkens nedbørsfelt over tid, er samlet for perioden juni og juli 2023. Figur 2 viser den målte vannføringen i juni, mens figur 3 illustrerer vannføringen i juli.

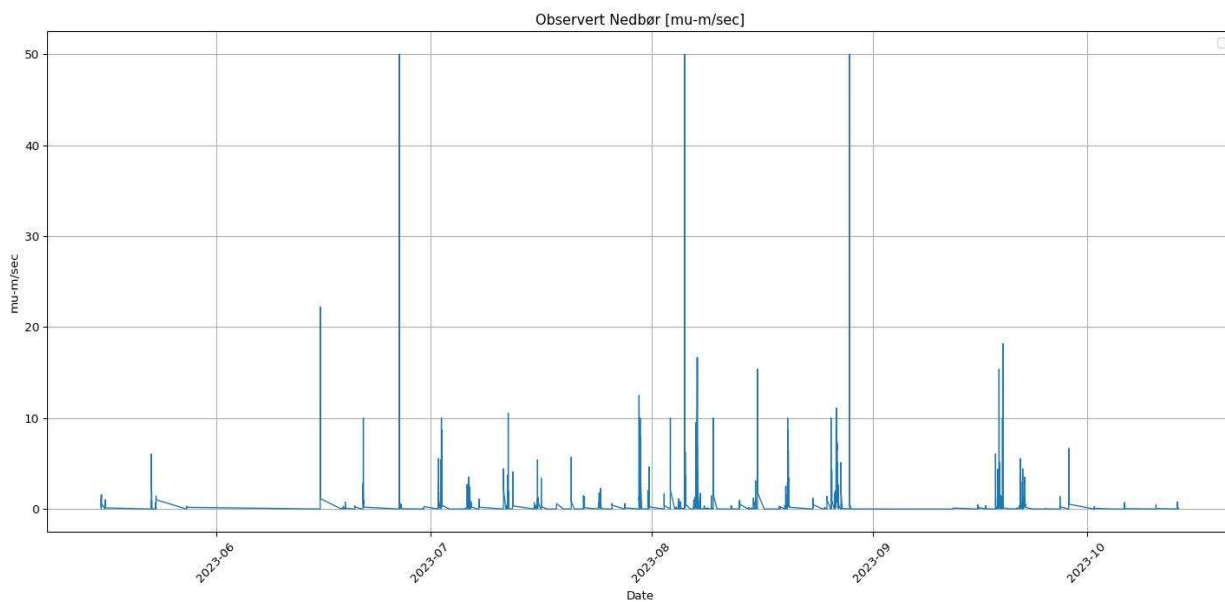


Figur 2: Målt vannføring i juni 2023 (OV).



Figur 3: Målt vannføring i juli 2023 (OV)

- Observasjoner av Nedbør: Konsulent firmaet Rosim AS har levert nedbørsdata, sammen med overvannsmodellen. Disse dataene spenner over perioden fra 15. mai 2023 kl. 21:31 til 13. oktober 2023 kl. 23:26. En grafisk fremstilling av de observerte nedbørsdataene er presentert i Figur 4.



Figur 4: Observert nedbør i 2023

### 3.2 Oversikt over den benyttede overvannsmodellen

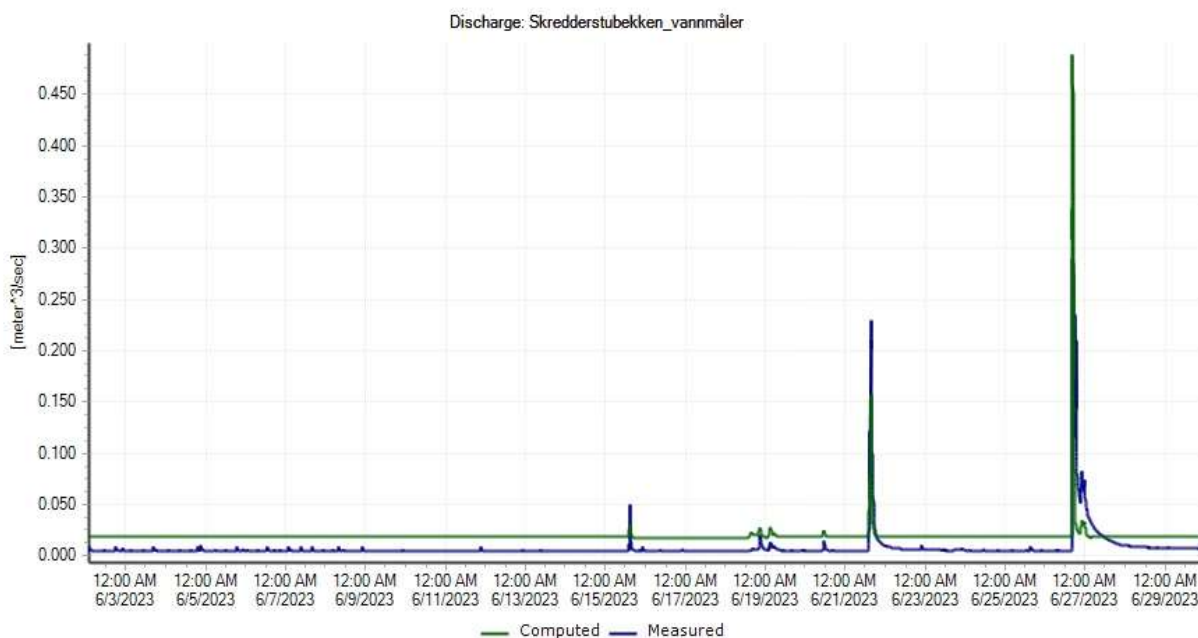
Multiconsults utleverte modell, som ikke er kalibrert, omfatter 238 catchments (nedbørsfelt), med et samlet areal på 114,352 hektar, hvilket tilsvarer 1,144 kvadratkilometer. Videre inkluderer modellen 315 ledninger, hvorav seks er klassifisert som åpne bekker. I tabell1 presenteres en oversikt over de vesentlige egenskapene til disse bekkene.

Tabell 1: Egenskaper til åpne bekker i modellen

ID	Åpen_bekk 1	Åpen_bekk_2	Åpen_bekk_3	Åpen_bekk 4	Åpen_bekk_5	Åpen_bekk_6
From node	ADes_324	Utløp_åpen_bek k_2	55539	93572	Utløp_til_åpen_be kk_5	Utløp_til_Åpen_be kk_6

To node	91915	ADes 329	Utløp_åpen_bek k 2	55539	93572	93572
Height [m]	2	2	1	1	1	1
Width [m]	3	4	3	3	2	3
Diameter						
Lenght [m]		62.86271	34.93667			
Geometric length [m]	70.531088 05	169.5237193	34.14685139	48.158371 96	16.34517852	160.004687
Upstream level [m]	150.064	113	115	116	118.5	134.365
Downstre am level [m]	144.848	107.567	113	115	116	116
Manning	85	85	85	85	85	85

Etter kjøring av den ikke-kalibrerte modellen fra 1. juni 2023, klokken 12:00:00, til 30. juni 2023, klokken 12:00:00, ble følgende observasjon gjort: En graf ble generert for å sammenligne faktisk vannføring med de estimerte verdiene produsert av modellen. I denne sammenhengen representerer 'Measured' den faktiske vannføringen i Skredderstubekken, mens 'Computed' betegner vannføringen slik den er estimert av modellen.



Figur 5: Målt og modellert vannføring før kalibrering (OV)

Ved en detaljert evaluering av den grafiske fremstillingen i figur 5, av vannføringsdataene blir det tydelig at modellens estimerer systematisk overstiger de faktisk observert vannføringsverdiene i et tørrvær periode. Dette fenomenet er særlig fremtredende i perioden fra 1. juni 2023 til 14. juni 2023, en periode karakterisert av fravær av nedbør. I løpet av dette tidsintervallet, ble den gjennomsnittlige målte vannføringen i Skredderstubekken fastsatt til  $0.005 \text{ m}^3/\text{s}$ , mens modellen indikerer en gjennomsnittlig vannføring på  $0.019 \text{ m}^3/\text{s}$ . Dermed impliserer resultatene at modellen forutser en økning i vannføring på  $0.014 \text{ m}^3/\text{s}$  i forhold til de faktiske målingene under tørre værforhold.

Videre analyse av modellens data for hele juni-perioden avdekker at modellen registrerer en maksimal vannføring på  $0.489 \text{ m}^3/\text{s}$  den 26. juni 2023 klokken 16:31. I motsetning viser de faktiske målingene fra Skredderstubekken en topp på  $0.289 \text{ m}^3/\text{s}$ , målt et minutt tidligere, klokken 16:30. Denne sammenligningen indikerer at modellen estimerer en maks vannføring som er 70 % høyere enn den faktisk målte toppvannføringen for hele juni-perioden i 2023.

Når det gjelder total vannmengde, viser modellen et samlet volum på  $48,527.717 \text{ m}^3$  for juni, mens de faktiske målingene indikerer et totalvolum på  $19,208.492 \text{ m}^3$  for samme periode. Dette

innebærer at modellen beregner et tilleggs vannvolum på 29,319.255 m<sup>3</sup> for juni. Dette betyr at modellen produserer cirka 0.0117 m<sup>3</sup>/s i snitt mer enn det som er målt.

### 3.3 Fremgangsmåten for kalibrering av modellen

For å kalibrere modellen nøyaktig med tanke på både Peak-vannføring og den totale vannmengden, følgende trinn skal gjennomføres:

1. **Analyse av Ledningene med Høy Vannføring:** Identifiser ledninger som rapporterer unormalt høye vannføringer. En detaljert gjennomgang av parameterne i disse ledningene skal utføres for å sikre at de representerer realistiske og fornuftige verdier.
2. **Evaluerer av Catchment-Parameter:** Gjennomgå alle catchments for å identifisere de med uvanlig høy total avrenning. Kritisk vurdering av parametre i disse områdene er nødvendig for å bekrefte deres adekvans.
3. **Justering av RDI (Rain depended infiltration) parametre i tørrværsperiode:** Tilpass parameterne i både ledninger og catchment for å sikre at de resulterer i realistiske vannføringsverdier i perioder med tørt vær.
4. **Bestemmelse av Peakvannføringsparametre:** Fastsett parameterne i ledningene og catchmentene på en måte som sikrer at Peak vannføringen i modellen samsvarer med de målte vannføringsverdiene.

Ved å følge disse trinnene kan modellen justeres for å gi mer pålitelige og realistiske resultater, og dermed forbedre dens nøyaktighet i simuleringer av vannføringsdynamikk. Det er viktig å først kalibrere for en tørrværsperiode og deretter kalibrere for en eller flere nedbørshendelser.

## 4 Kalibrering og Resultater- Del 1: Overvannsmodellering

I det følgende kapittelet vil det bli foretatt en omfattende kalibrering av overvannsmodellen, spesifikt for perioden som dekker hele juni i 2023. Hensikten med denne kalibreringen er å finjustere modellen slik at den nøyaktig reflekterer både vannføringsdynamikken under tørrværsforhold og responsen på nedbørshendelser. Det sentrale målet er å justere modellen så den gir presise estimater for både Peak-vannføring og totalt vannvolum, som er i samsvar med faktisk målte vannføringsdata. Denne prosessen vil innebære en detaljert evaluering og tilpasning av modellens parametere for å sikre at den leverer realistiske og pålitelige resultater, og dermed bidrar til en dypere forståelse av overvannsforvaltningen i det studerte området.

### 4.1 Hvor kommer vannet fra?

Modellen ble kjørt for en tør vær periode fra 1. juni 2023 til 14. juni 2023. og følgende ble observert fra modellen.

#### 4.1.1 Catchment:

Etter implementering av modellen for den angitte tørre perioden, resulterte det i utarbeidelsen av en tabell som kvantifiserer den totale avrenningen, målt i kubikkmeter per sekund ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), fra hvert catchments.

For å identifisere de catchmentene som opplevde signifikant avrenning – definert som en total avrenning større enn null  $\text{m}^3/\text{s}$  – ble det utarbeidet en Python-kode for dataanalyse og følgende ble observert.

```
import pandas as pd
# Leser inn Excel-fil
file = "Multiconsult_første modell.xlsx"
sheet = 'Totalrunoff_Catchments'
df = pd.read_excel(file, sheet_name=sheet)

# Funksjon for å bestemme hvilke catchments har avrenning mer enn null
def catchments_runoff():
    mer_enn_null = []
    null = []
    for i in range(len(df['Catchment Total Runoff [m^3/s]')):
        if df['Catchment Total Runoff [m^3/s]'][i] > 0:
            mer_enn_null.append(df['ID'][i])
        else:
            null.append(df['ID'][i])
```

```

if len(mer_enn_null) > 0:
    return f'Disse catchments har Total runoff mer enn 0 [m^3/s]:
{mer_enn_null}'
else:
    return 'Ingen av catchments har Total runoff mer enn 0 [m^3/s]'

# Kaller funksjonen og skriver ut resultatene
print(catchments_runoff())
output:

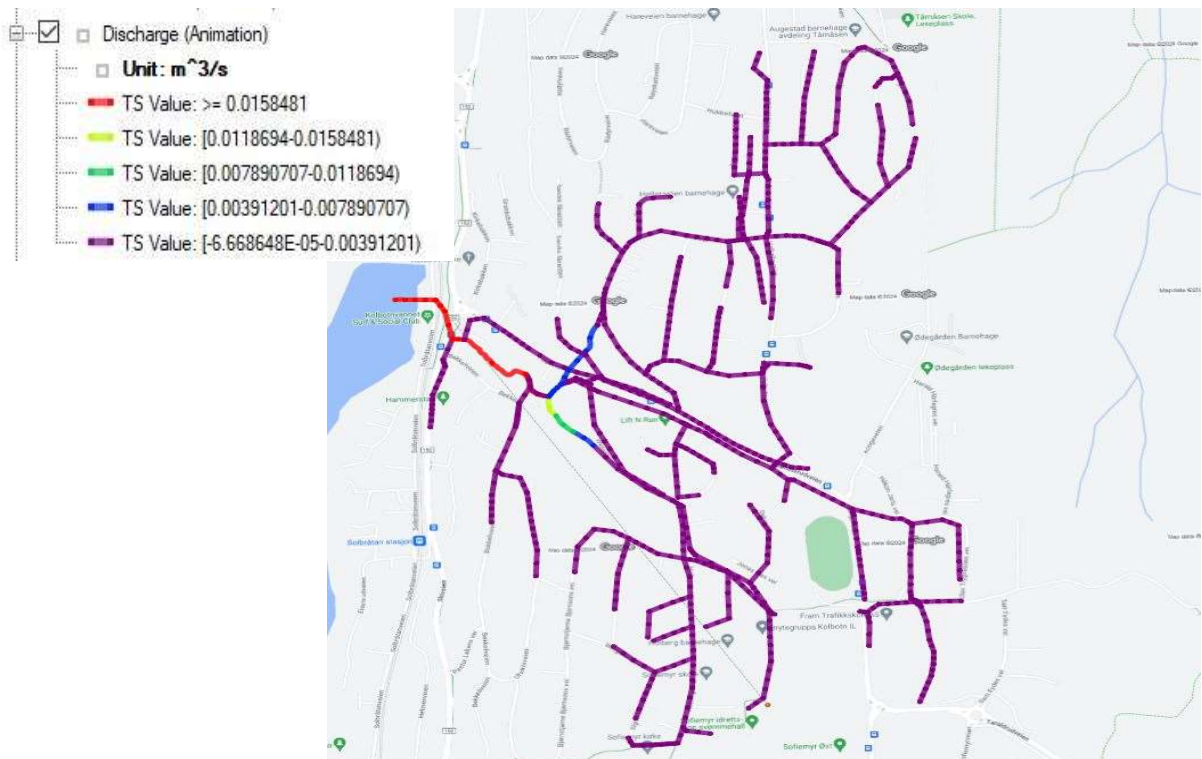
Ingen av catchments har Total runoff mer enn 0 [m^3/s]

```

Det viser seg at ingen av Catchments har en total avrenning på mer enn null m<sup>3</sup>/s.

#### 4.1.2 Ledninger:

Fra forrige avsnitt (4.1.1) observerte vi at det ikke ble produsert noe vann fra catchments i løpet av den angitte perioden med tørt vær. Imidlertid viser modellen at det fortsatt er vannføring i alle ledningene. Dette fremkommer tydelig i Figur 6, hvor et utklipp av kartet viser vannføringen i ledningsnett.



Figur 6: Ledninger med unormal høy vannføring under tørt vær

Fra figur 6 kan det observeres at det forekommer vannføring i alle ledningene, men noen av ledningene utmerker seg med unormalt høye vannføringer. For å sikre en nøyaktig analyse av disse ledningene, ble de systematisk kategorisert i fem distinkte grupper basert på vannføringen gjennom dem.

Tabell 2: Grupperte ledninger basert på vannføring

ID	$Q$ [ $m^3/s$ ]
Gruppe 1	$0 < Q < 0.0038$
Gruppe 2	$0.0039 < Q < 0.0076$
Gruppe 3	$0.0077 < Q < 0.0114$
Gruppe 4	$0.0115 < Q < 0.0152$
Gruppe 5	$0.0153 < Q$

Den gjennomsnittlige vannføringen i hele systemet, som målt i perioden med tørt vær, er dokumentert til å være  $0.005 m^3/s$  (3.2). Basert på disse målingene, er det besluttet at alle ledninger med en vannføring som overstiger dette gjennomsnittet, skal underlegges ytterligere analyser. Dette kriteriet resulterer i at ledninger i gruppe 3, 4 og 5 vil være fokus for videre undersøkelser.

```
import pandas as pd

# Leser inn Excel-fil
file = "Multiconsult_første modell.xlsx"
sheet = 'Links_Vannføring'
df = pd.read_excel(file, sheet_name=sheet)

# Oppretter lister for hver gruppe
Gruppe_1 = []
Gruppe_2 = []
Gruppe_3 = []
Gruppe_4 = []
Gruppe_5 = []

def gruppe():
    for i in range(len(df)):
        max_discharge = df['Link Discharge, max. [m^3/s]'][i]
        if 0 <= max_discharge <= 0.0038:
            Gruppe_1.append(df['ID'][i])
        elif 0.0039 <= max_discharge <= 0.0076:
            Gruppe_2.append(df['ID'][i])
        elif 0.0077 <= max_discharge <= 0.0114:
```



```

Gruppe_3.append(df['ID'][i])
elif 0.0115 <= max_discharge <= 0.0152:
    Gruppe_4.append(df['ID'][i])
elif max_discharge >= 0.0153:
    Gruppe_5.append(df['ID'][i])

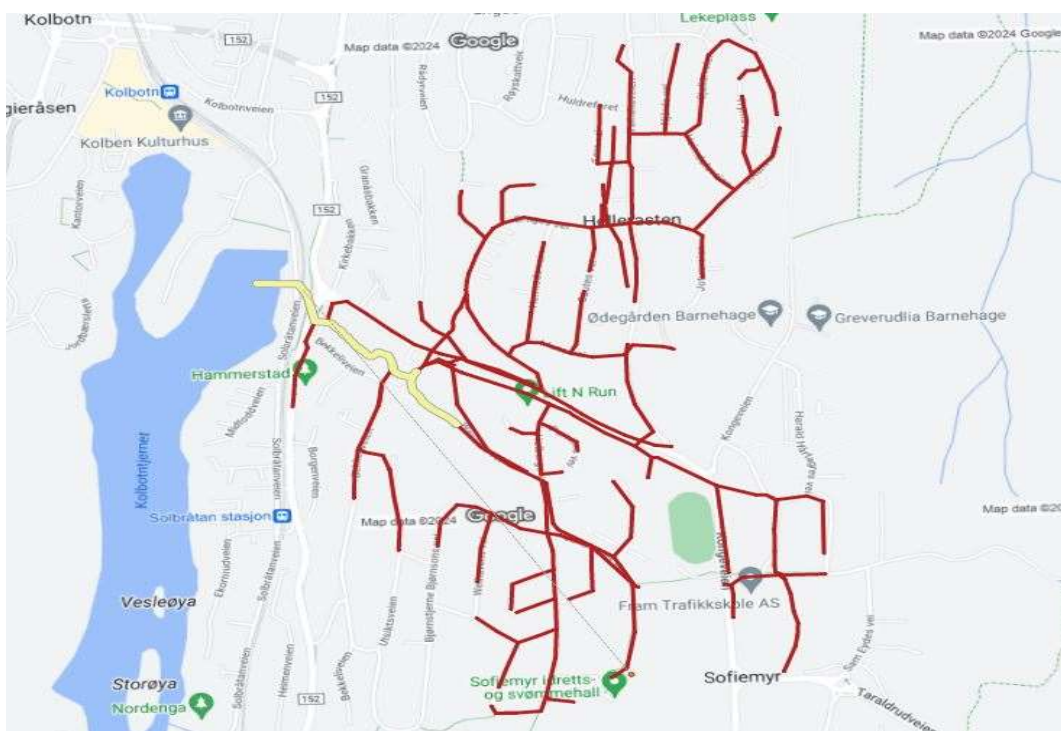
# Kjører funksjonen for å gruppere data
gruppe()

# Printer ut innholdet i Gruppe 3,4 og 5
print(f'Gruppe_3 : {Gruppe_3}')
print(f'Gruppe_4 : {Gruppe_4}')
print(f'Gruppe_5 : {Gruppe_5}')

output:
Gruppe_3 : ['Åpen_bekk_5,8.17', 'Åpen_bekk_6,26.67']
Gruppe_4 : ['Åpen_bekk_6,80', 'Åpen_bekk_6,133.34']
Gruppe_5 : ['22183,16.14', '22184,35.5', '22198_A,11.67', '95864,19.8',
'95864,59.39', '95865,5', 'Åpen_bekk_2,31.43', 'Åpen_bekk_3,17.47',
'Åpen_bekk_4,24.08']

```

Ledningene tilhørende gruppe 3, 4 og 5 er tydelig identifisert og merket på det tilhørende kartet, som kommer frem i Figur 7. Resultatene fra denne markeringen viser at det forekommer unormalt høy vannproduksjon i samtlige åpne bekker, med unntak av Åpen\_bekk\_1 og de nedre ledningene som leder mot utløpet.



Figur 7: Ledninger som tilhører gruppe 3,4 og 5

De nederste ledningene viser naturligvis høy vannføring ettersom alt vannet i systemet strømmer gjennom dem. Parameterne i de åpne bekkene, med unntak av Åpen\_bekk\_1, krever ytterligere undersøkelser og justeringer. Denne analysen vil bli utført og diskutert i detalj i det påfølgende kapittelet.

## 4.2 Kalibrering av Manning-tall i Ledninger for Tørrværs Vannføring

I modellen er de åpne bekkenes Manning-tall bestemt av materialet de er laget av. Den nedenstående figuren, figur 8 illustrerer hvilke materialer som har blitt benyttet. Videre bruker programvaren MIKE+ disse materialene til å automatisk tildele et tilhørende Manning-tall, som er nærmere spesifisert i Tabell 3.

	ID	Resistance formulation	Friction type	Material ID	Manning
1	Åpen_bekk_4	Manning (M)	Use material	Concrete (Rough) MOUSE	85
2	Åpen_bekk_6	Manning (M)	Use material	Concrete (Smooth)	85
3	Åpen_bekk_1	Manning (M)	Use material	Concrete (Rough) MOUSE	85
4	Åpen_bekk_2	Manning (M)	Use material	Concrete (Rough) MOUSE	85
5	Åpen_bekk_3	Manning (M)	Use material	Concrete (Smooth)	85
▶ 6	Åpen_bekk_5	Manning (M)	Use material	Concrete (Smooth)	85

Figur 8: Benyttede material til åpne bekker

Tabell 3: Materialets Manning-tall

Material	Manning [ $m^{1/3}/s$ ]
Concrete (Smooth) MOUSE	85
Concrete (Normal) MOUSE	75
Concrete (Rough) MOUSE	68
Plastic MOUSE	80
Iron MOUSE	70
Ceramics MOUSE	70
Stone MOUSE	80
Other MOUSE	50
Cement Mortar	77
Ceramics	70
Concrete (Normal)	75
Concrete (Rough)	68
Concrete (Smooth)	85
Iron (cast)	70
Iron (wrought)	65
Plastic	80
Stone	80

Åpen\_bekk\_2, til tross for å være en naturlig bekk, er definert i modellen som en betongledning, med et Manning-tall på  $68 [m^{1/3}/s]$ . Videre indikerer modellen at det er null vannføring i ledninger 22197 og 22216, som er illustrert i Figur 9. Dette antyder at all vannstrømmen i dette området skjer gjennom Åpen\_bekk\_2.



Figur 9: Ledninger 22197, 22216 og åpenbekk 2

Manning-formel ble anvendt for å fastsette et nytt Manning-tall for Åpen\_bekk\_2. Etter gjennomføring av denne beregningen, ble det nye Manning-tallet for Åpen\_bekk\_2 bestemt til å være  $17.347 [m^{1/3}/s]$ .

```
# Manning-formel er  $Q = M \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2}$ 
# før justering av Manning-tall
Q = 0.0196
M = 68
# sette  $A \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2}$  som en konstant
#  $k = A \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2}$ 
k = Q / M
# finner passende Manning-tall
```

```

Q_faktisk = 0.005
M_ny = Q_faktisk /k

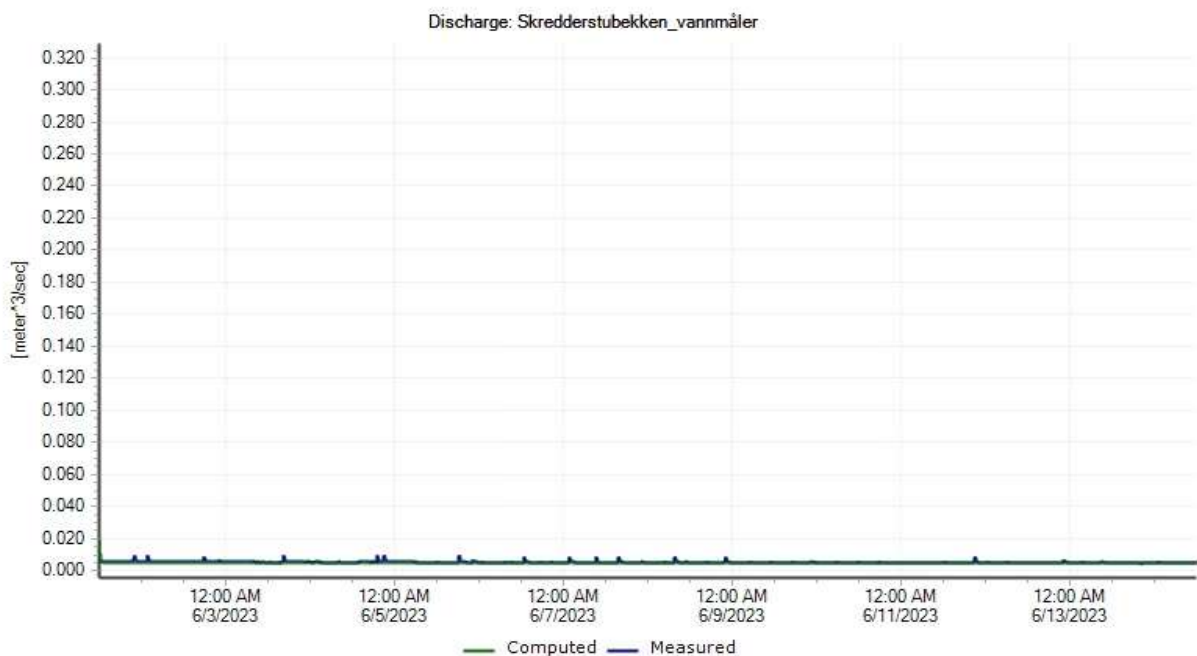
print(f'Den nye Manning-tall bør være: {round(M_ny,3)} [m^(1/3)/s] ')

output:

Den nye Manning-tall bør være: 17.347 [m^(1/3)/s].

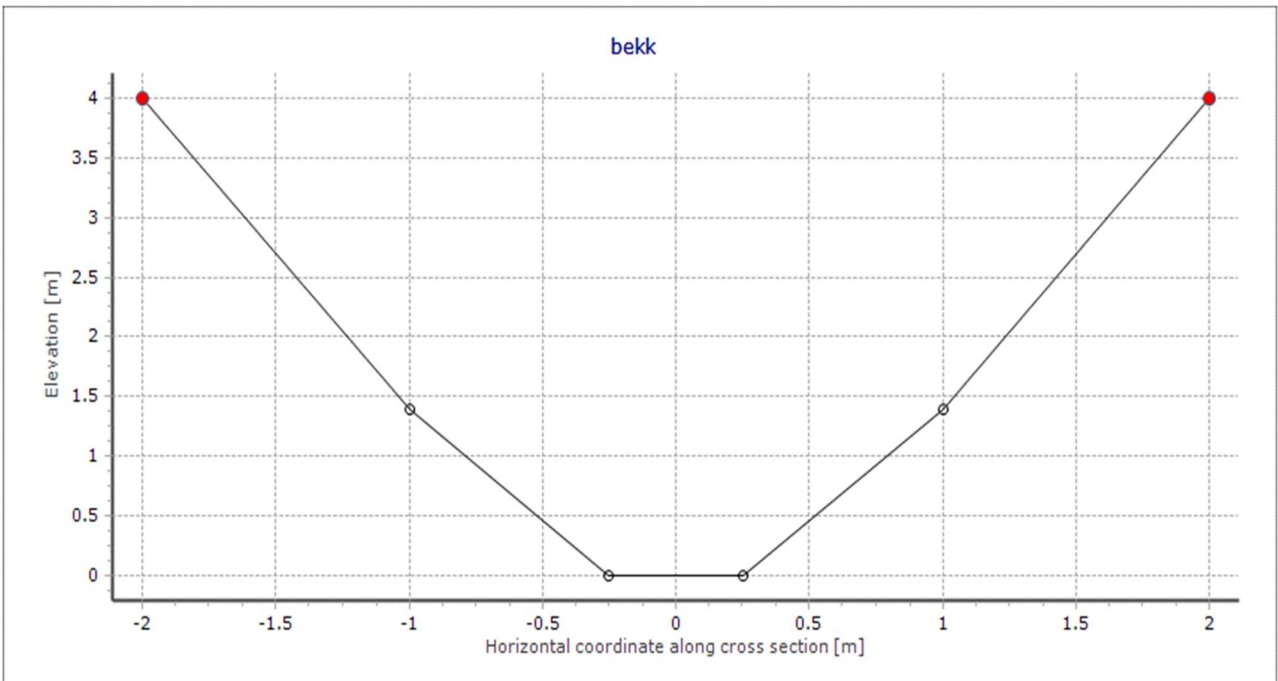
```

Etter justeringen av Manning-tallet til en verdi på  $17.347 \text{ [m}^{\frac{1}{3}}/\text{s]}$  for alle åpne bekker, ble vannføringen i modellen observert og presentert i Figur 10.



Figur 10: Målt og modellert vannføring etter justering av Manning-tall

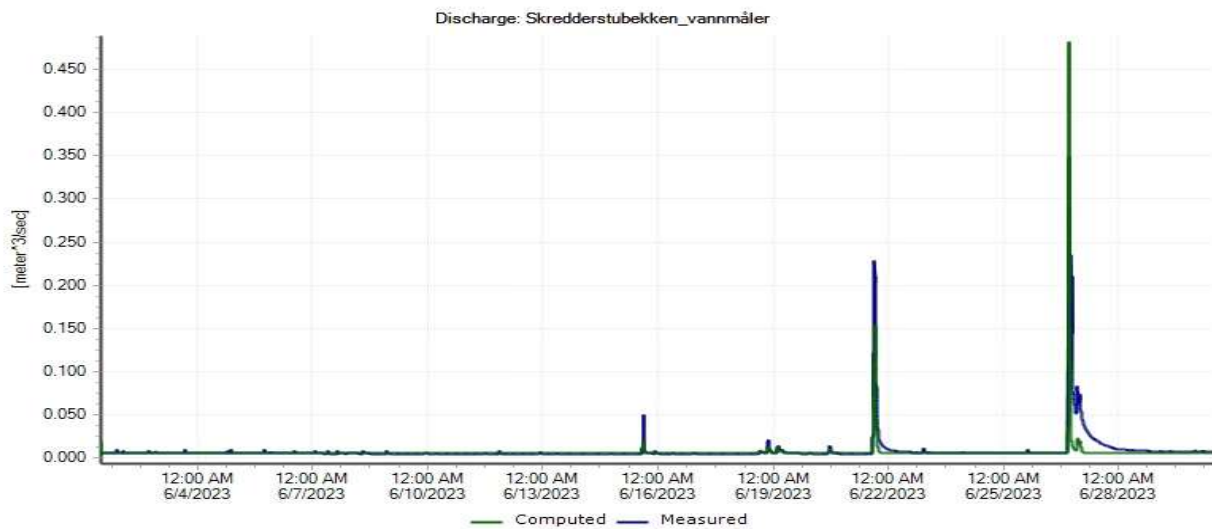
Modellen indikerer en vannføring på  $0.0049 \text{ m}^3/\text{s}$ , noe som korresponderer med den målte vannføringen. Videre er det viktig å bemerke at alle de åpne bekkene i utgangspunktet ble modellert med en rektangulær form. Dette reflekterer imidlertid ikke nøyaktig deres naturlige form, noe som kan påvirke modellens nøyaktighet. For å forbedre modellens realisme og presisjon, ble den initielle rektangulære formen på Åpen\_bekk\_2 revidert til et mer realistisk tverrsnitt. Denne justeringen er illustrert i Figur 11.



Figur 11 : Åpen bekk tversnitt

### 4.3 Andel tettestflater for nedbørshendelser

Etter å ha fullført kalibreringsprosessen av modellen for en tørr værperiode, ble modellen operasjonalisert for å estimere vannføringen gjennom hele juni måned i 2023. Resultatene av denne kjøringen, illustrert i Figur 12.



Figur 12: Målt og modellert vannføring juni 2023- etter kalibrering for tørrvær

Fra figur 12 observeres det at modellen simulerer vannføringen tilnærmet lik den målte vannføringen i tørre perioder. Imidlertid viser modellen tendenser til å produsere enten for lav eller for høy vannføring under regnhendelser.

Basert på informasjonen hentet fra regndataene i vedlegg B, blir det observert at juni måned opplevde tre betydelige nedbørshendelser. Den første, som også er den minste av de tre, inntreffer den 15. juni. Den andre hendelsen fant sted den 21. juni, og den tredje, som representerer den største nedbøren i løpet av måneden, skjedde den 27. juni. Vannføringen under disse tre hendelser ble plottet separat og er dokumentert i vedlegg C.

Den observerte forskjellen mellom den målte og den modellerte Peak-vannføringen den 15. juni er betydelig. Den målte toppvannføringen på denne datoen var 0,0465 m<sup>3</sup>/s, mens modellen produserte en toppvannføring på kun 0,0156 m<sup>3</sup>/s. Dette indikerer at modellens estimerte toppvannføring var omtrent 34% av den faktisk målte verdien.

Analysen av catchments viser at det er en betydelig lav prosentandel av impermeable flater i disse områdene, noe som resulterer i lav vannføring i overvannssystemet. På grunnlag av denne observasjonen ble alle nedbørfeltene klassifisert i fem grupper basert på deres andel av impermeable flater.

Tabell 4: Grupperte catchments etter andel impermeable flater

ID	[%] andel impermeable flater
Gruppe 1	0 - 5
Gruppe 2	5.1 - 10
Gruppe 3	10.1 - 15
Gruppe 4	15.1 - 20
Gruppe 5	> 20.1

For klassifiseringen av de gitte nedbørfeltene ble det anvendt Python kode, hvilket er detaljert beskrevet i vedlegg D. Analyseresultatene indikerer at ingen av de undersøkte nedbørfeltene ble kategorisert innenfor gruppe 4 eller 5, en observasjon som avviker fra forventede resultater. Derfor ble alle nedbørfeltene justert med en 5 prosent økning i andelen av impermeable areal, og modellen ble deretter kjørt på nytt. Resultatene fra disse tre nedbørshendelsen er dokumentert i vedlegg E.

Resultatene fra vedlegg E viser at etter en 5 prosent økning i andelen av impermeable flater, har modellen nå en høyere toppvannføring enn den faktisk målte. Dette tyder på at det finnes faktorer



som regulerer vannføringen i virkeligheten, som modellen ikke tar hensyn til. I forbindelse med dette ble overvannssystemet analysert i Gemini Portal+.

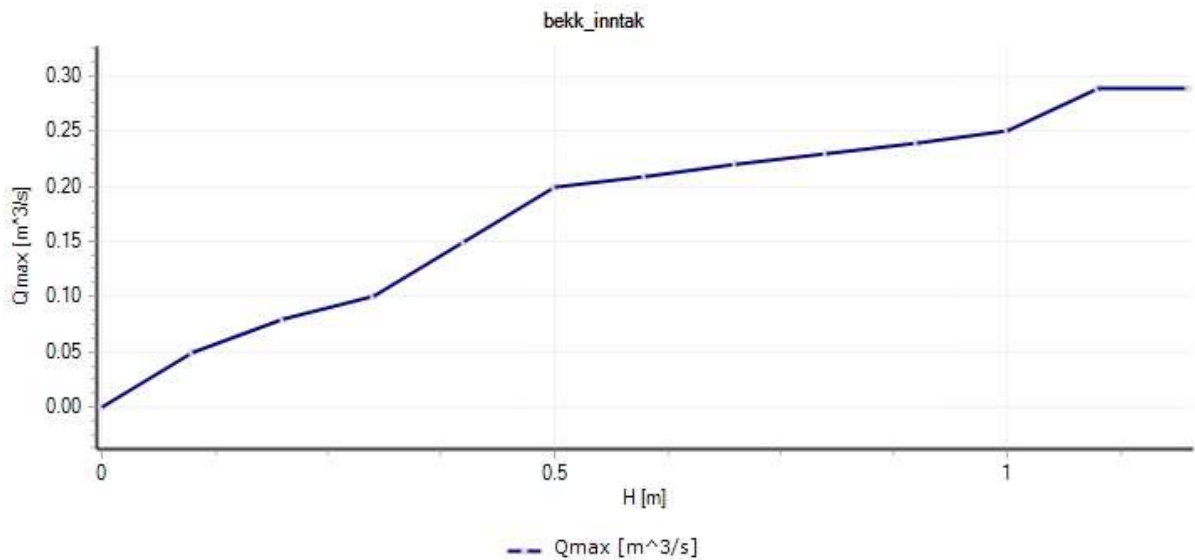
Åpen\_bekk\_2, som renner inn til kum ADes\_329, viser seg å ikke være helt i samsvar med virkeligheten. I Gemini Portal+ er ADes\_329 framstilt som en bekk inntak med rist, noe som er illustrert i figur 13.



Figur 13: Bekk inntak med rist fra Gemini portal+

Fra figur 13 kan det observeres at vannføringen i ledning 22198A, der Åpen\_bekk\_2 munner ut, er avhengig av vannhøyden i bekk-inntaket. Det er også tydelig at risten på inntaket fører til blokkeringer fra blader og andre gjenstander, noe som resulterer i en lavere vannføring i virkeligheten sammenlignet med modellen. For å ta hensyn til dette ble det etablert en vannføringsregulering basert på vannhøyden i node ADes\_329.

Den høyeste vannføringen i løpet av juni måned ble dokumentert den 26. juni 2023, klokken 16:30. Dette målepunktet viste en vannføring på 0,290 m<sup>3</sup>/s. Denne vannmengden ble brukt for å kunne lage en vannføringsregulering gjennom ledning 22198A basert på vannhøyden i node ADes\_329 som er vist i figur 14.



Figur 14: Vannførings regulator gjennom ledning 22198A

Etter implementeringen av vannføringsreguleringen i node ADes\_329, ble modellen kjørt på nytt med tanke på de tre nedbørshendelsene i juni, som tidligere er nevnt i kapittelet. Resultatene fra denne nye simuleringen er dokumentert i Vedlegg F.

Resultatene presentert i Vedlegg F indikerer at modellen tilfredsstillende representerer den observerte vannføringen i juni måned, både med hensyn til toppvannføringen og totalt vannvolum. Avslutningsvis ble modellen anvendt for en utvidet analyse av hele perioden fra juni til juli 2023, hvor observasjoner er dokumentert i Vedlegg G.

#### 4.4 Ferdig Kalibrert Modell

I dette kapittelet vil den kalibrerte modellen bli undersøkt mer inngående med fokus på den totale vannføringen for månedene juni og juli. For å oppnå dette, blir modellen kjørt separat for hver av de to månedene. Dette tillater en detaljert analyse av vannbalansen over denne spesifikt høysensitive sommerperioden, som ofte er preget av signifikante hydrologiske endringer.

En sentral del av analysen er anvendelsen av Simpsons regel for å integrere under vannføringskurvene. Denne matematiske tilnærmingen benyttes for å beregne det totale vannvolumet over gitte tidsintervaller. Simpsons regel, anerkjent for sin nøyaktighet i beregninger av arealet under kurver, er særlig egnet for å estimere det akkumulerte vannvolumet basert på vannføringsdataene fra modellen og de målte vannføringsverdiene fra Sildre.



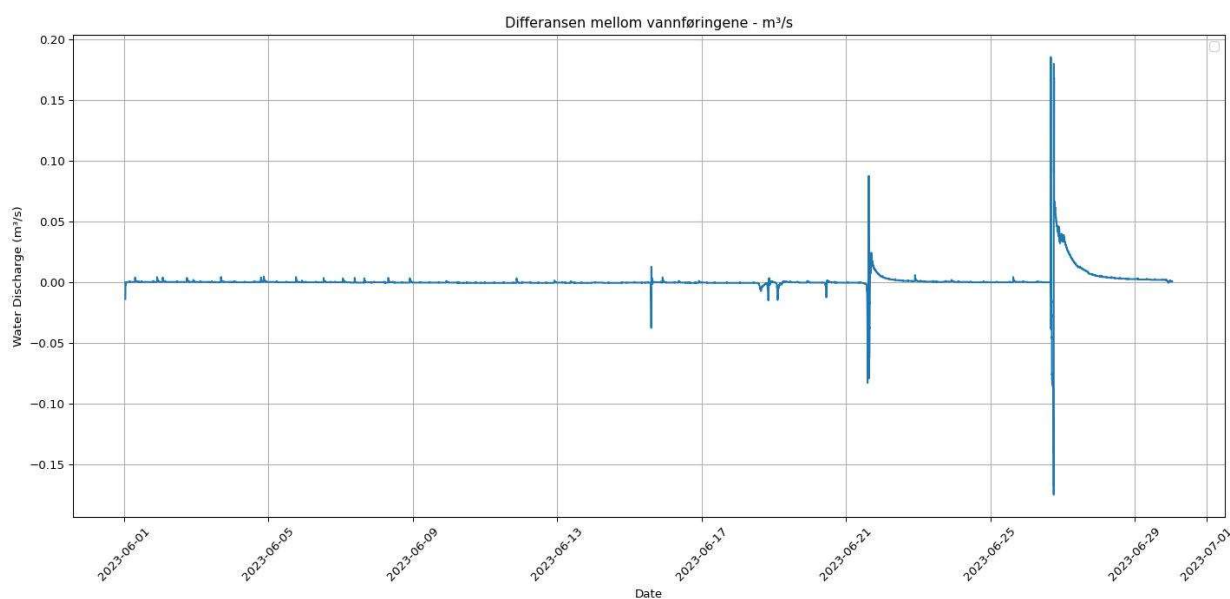
Ved å kjøre modellen separat for juni og juli er det mulig å identifisere månedsspesifikke trender og karakteristikk i vannbalansen. Dette gir en dypere forståelse av modellens respons på varierende hydrologiske og klimatiske forhold.

#### 4.4.1 Vannbalanse i juni

Etter å ha kjørt modellen fra 01.06.2023 kl 01:00 til 30.06.2023 kl 01:00, ble vannføringsdataene hentet ut fra modellen til et Excel-ark. Deretter ble Python brukt til å beregne det totale vannvolumet for denne perioden, som er dokumentert i vedlegg H.

Resultatene fra vedlegg H viser at det totale vannvolumet produsert av modellen er 16,380.007 m<sup>3</sup>, mens det totale vannvolumet beregnet fra målte vannføringsdata er 18,656.751 m<sup>3</sup>. Dette indikerer at modellen underestimerer det faktiske vannvolumet med 2,276.744 m<sup>3</sup> for hele juni-perioden. Videre hadde modellen en Peak-vannføring på 0.319 m<sup>3</sup>/s, sammenlignet med en målt Peak-vannføring på 0,289 m<sup>3</sup>/s, et avvik på 0,03 m<sup>3</sup>/s.

For å identifisere de spesifikke tidsperiodene hvor avvikene mellom modellerte og målte vannføringer oppstod, ble det utarbeidet en grafisk fremstilling. Denne grafen viser differansen mellom målt vannføring og vannføringen estimert av modellen. Dette er illustrert i figur 15. Gjennom denne visuelle fremstillingen kan man enkelt observere og analysere periodene med de største avvikene, noe som er avgjørende for å forstå modellens ytelse og for å identifisere eventuelle mønstre eller spesifikke forhold som bidrar til unøyaktighetene.



Figur 15 : Differansen mellom målt og modellert vannføring i juni 2023

Observasjoner fra figur 15 avslører at avvikene mellom modellen og de målte verdiene hovedsakelig konsentrerer seg rundt tre nedbørshendelser i løpet av juni. Spesielt fremtredende er avviket den 26. juni, som sammenfaller med en betydelig nedbørshendelse. Dette tyder på at modellen kanskje ikke helt nøyaktig representerer hydrologiske responser på intens nedbør, noe som resulterer i merkbare forskjeller i vannføringsdataene. Denne informasjonen er kritisk for videre forbedring og kalibrering av modellen, spesielt med tanke på dens evne til å simulere vannføring under og etter store nedbørshendelser.

I modellen observeres det en svært rask nedgang i vannføringen etter at Peak-vannføringen er nådd. I motsetning til dette viser de målte vannføringsdataene at nedgangen i vannføringen skjer langsommere. Dette fenomenet kan forklares ved at vannet har en tendens til å akkumuleres i overflategruppen og magasineringen, og deretter finne veien inn i overvannsnettet i en langsommere takt i virkeligheten enn det som blir modellert. Denne diskrepansen mellom modellerte og målte dataene indikerer et potensielt gap i modellens representasjon av hydrologiske prosesser og fenomener.

#### 4.4.2 Vannbalanse i juli

Under den detaljerte evalueringen av modellens output fra 1. juli 2023 klokken 01:00 til 31. juli 2023 klokken 01:00, med fokus på de kritiske parameterne Peak-vannføring og totalt vannvolum, ble følgende resultater observert:

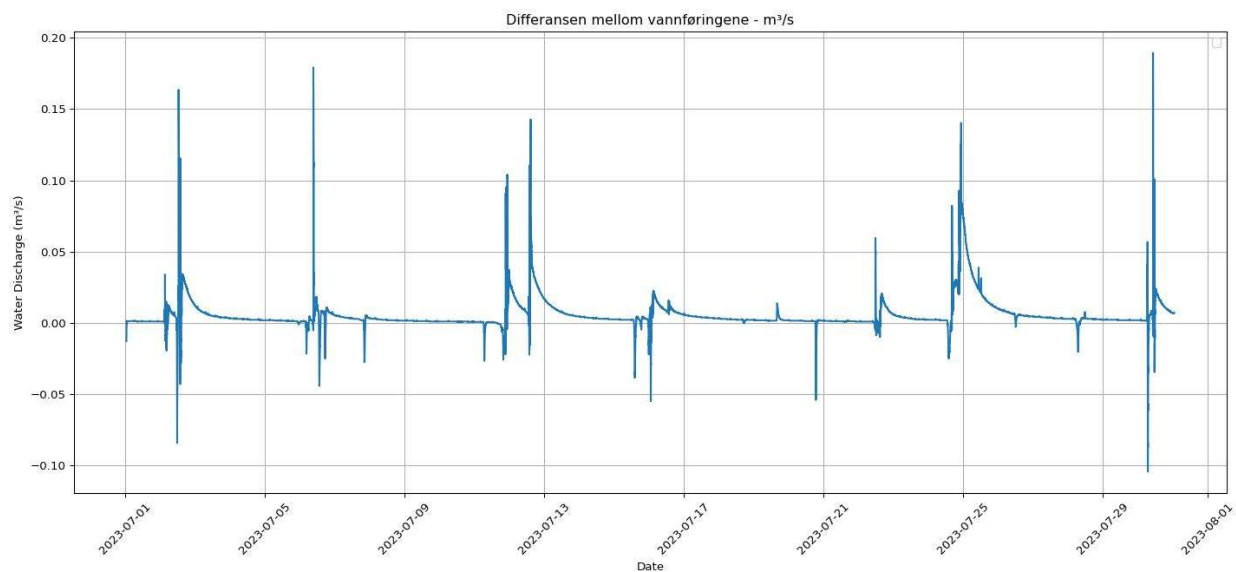
Total vannføring fra modellen: 21996.85 m<sup>3</sup>.

Total vannføring fra Sildre: 36115.473 m<sup>3</sup>.

Peak-vannføring fra modell: 0.224 m<sup>3</sup>/s.

Peak-vannføring fra Sildre: 0.252 m<sup>3</sup>/s.

Det observerte avviket i juli er betydelig større enn det som ble registrert i juni, med en markant differanse på 14,118.623 m<sup>3</sup> for hele perioden. Denne økningen i avviket kan hovedsakelig tilskrives økt nedbør i juli sammenlignet med juni. Denne sammenhengen mellom økt nedbør og avvik i vannvolum antyder potensielle begrensninger eller utfordringer i modellens evne til nøyaktig å simulere hydrologiske respons på høyere nedbørnivåer. Differansen mellom den målte vannføringen og den modellerte er illustrert i figur 16.



Figur 16: Differansen mellom målt og modellert vannføring i juli

Et avvik på 14,118.623 m<sup>3</sup> over 30 dager tilsvarer et gjennomsnittlig avvik på 0.00545 m<sup>3</sup>/s for denne måneden. Det er teknisk mulig å implementere en ekstra vannføring tilsvarende denne differansen, men det ville ikke være hensiktsmessig for en kalibreringsprosess. Årsaken er at en slik justering kun ville være korrekt under spesifikke forhold og ikke ville gi en generelt gyldig løsning.

#### 4.5 Feilkilder i den kalibrerte modellen

Det er viktig å være oppmerksom på at denne differansen i vannvolum kan skyldes flere faktorer. For det første kan grunnvannsinnelekkasje, spillvann og lekkasjer fra vannledninger infiltrere overvannsnettet, noe som resulterer i et høyere vannvolum enn det som er modellert. Videre kan det også forekomme feilkoblinger i systemet, hvor spillvann utilsiktet er koblet til overvannsnettverket, noe som fører til økt vannvolum i virkeligheten sammenlignet med modellen.

En annen relevant observasjon er at vannforbruket ofte øker i regnperioder siden folk vanligvis oppholder seg innendørs, noe som fører til økt produksjon av spillvann og innelekkasje.

Til sist er det også viktig å vurdere overløp i systemet. Når kapasiteten i spillvannsledningene er nådd, kan spillvann bli ledet over til overvannssystemet, noe som resulterer i en høyere faktisk vannføring og vannvolum enn det som er modellert.

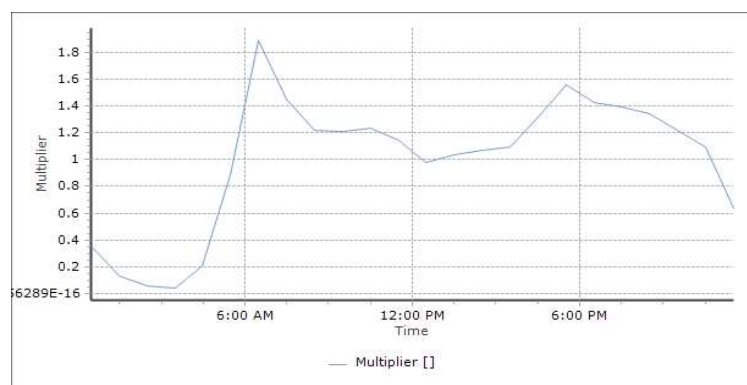
## 5 Dataanalyse og Resultater-Del 2: sammensatt modell

Dette kapitlet tar for seg den sammensatte overvannsmodellen og spillvannsmodellen som ble kalibrert av konsulentfirmaet Multiconsult. Her gis det en generell beskrivelse av modellen, samt hvilken type vannføringsdata og nedbørdata som ble brukt for kalibrering. Videre vil modellen simuleres i både tørt og vått vær. Til slutt skal vannbalansemetoden brukes til å estimere andelen fremmedvann i spillvannsnett.

Parallelt med mitt arbeid, arbeidet Multiconsult med overvannsmodellen og rekalkibrering av spillvannsmodellen. I stedet for å integrere deres rekalkibrerte SP-modell med min egen kalibrerte OV-modell, valgte jeg å bruke den kombinerte SP-OV-modellen som Multiconsult hadde utviklet. Jeg antok at denne kombinerte modellen ville være minst like god som min egen, om ikke bedre. Dette valget ble mulig fordi vi tilfeldigvis ble ferdige med våre respektive oppgaver samtidig.

### 5.1 Beskrivelse av Modellen

Den integrerte modellen omfatter totalt 374 catchments, der 238 av disse er kategorisert som en del av overvannssystemet og de resterende 136 er en del av spillvannssystemet. Modellen dekker 4640 personenheter (PE), hvorav 238 enheter er tilknyttet overvannssystemet, mens 4402 enheter er assosiert med spillvannssystemet. Avløpsproduksjonen innen regionen er beregnet basert på et drikkevannsforbruk på 200 liter per personenheter per dag. Videre er det registrert en tilleggproduksjon av spillvann på  $0.04 \frac{l}{s}$  (liter per sekund) for hvert catchment tilknyttet spillvannssystemet med unntak av to catchments, noe som resulterer i et samlet tillegg spillvannproduksjon på  $5.36 \frac{l}{s}$  for hele systemet. Modellen inkluderer også en tidsvariasjon i avløpsproduksjonen, som er illustrert i Figur 17.



Figur 17: Time variasjon for avløpsproduksjon

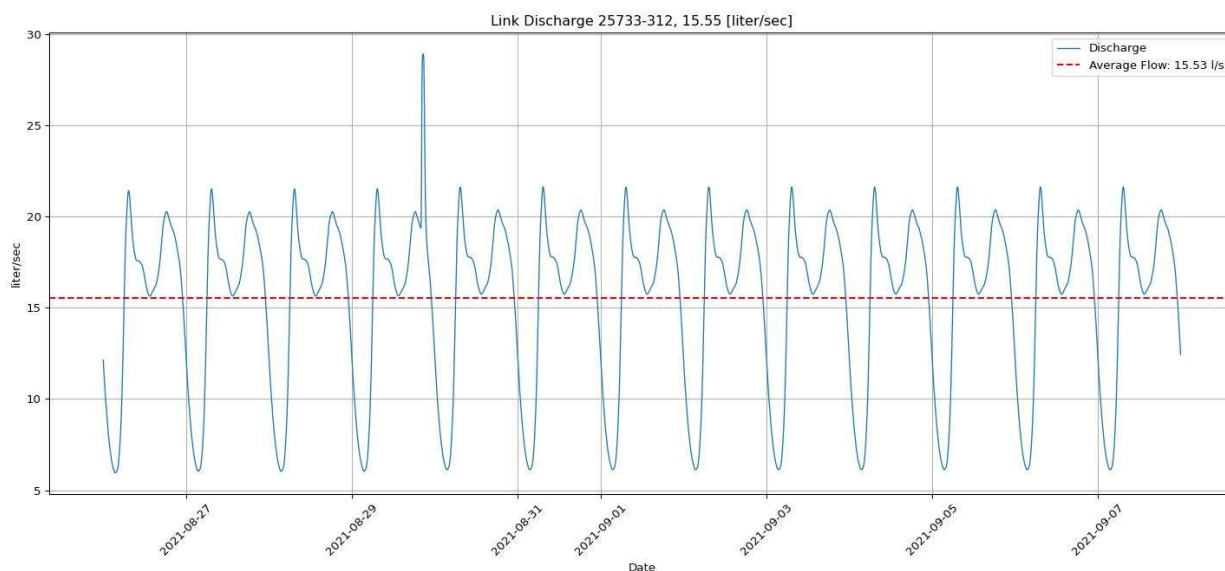
For kalibrering av den sammensatte modellen ble det benyttet målte vannføringsdata og nedbørsdata for 2021. Observasjoner av nedbør for 2021 er dokumentert i Vedlegg I, og målte data for spillvannsvannføring er dokumentert i Vedlegg J.

## 5.2 Vannføring under Tørre og våte værforhold

### 5.2.1 Tørrvær vannføring

Fra observasjonene av nedbør i 2021, dokumentert i Vedlegg I, fremgår det at det ikke forekom nedbør i perioden fra 25. august 2021 til 9. september 2021. Denne perioden er valgt for simuleringer under tørrværsforhold for å analysere systemets respons uten påvirkning fra regnhendelser.

Under simuleringen av spillvannsystemet fra 26. august 2021 kl. 00:00 til 8. september 2021 kl. 00:00, over en periode på 13 dager, ble det gjort flere viktige observasjoner. Resultatene viser en maksimal vannføring på  $28.93 \frac{l}{s}$ , en minimumsvannføring på  $5.95 \frac{l}{s}$ , og en gjennomsnittlig vannføring på  $15.53 \frac{l}{s}$ . Disse dataene er grafisk presentert i Figur 18.



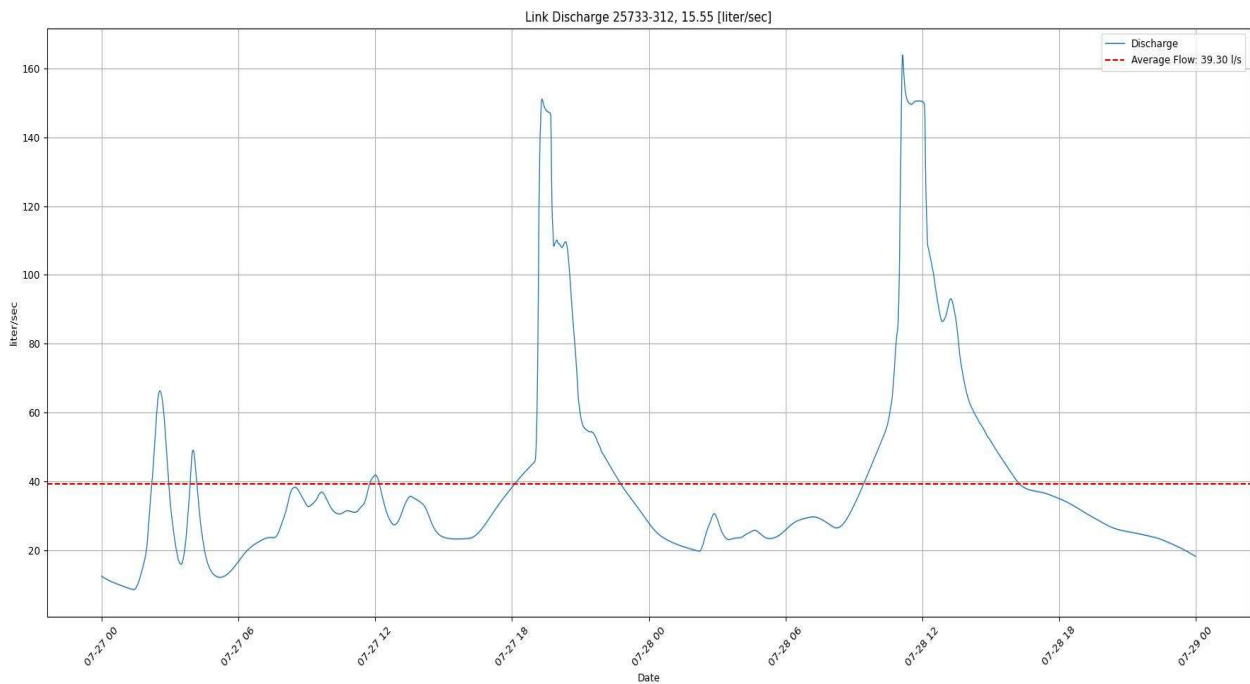
Figur 18: Modellert vannføring under tørr vær

### 5.2.2 Vannføring under regnhendelser

Fra analysen av den observerte nedbøren i 2021, presentert i Vedlegg I, identifiserte vi flere nedbørshendelser. I denne studien er to spesifikke nedbørshendelser valgt for videre simuleringer

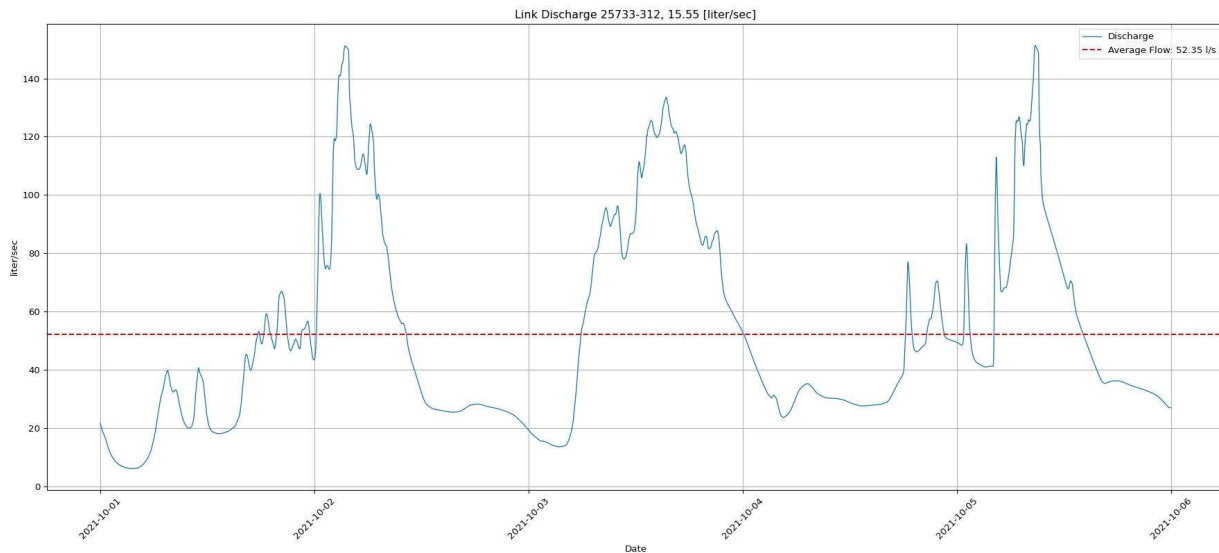
for å vurdere responsen fra avløpsnettets under slike forhold. Den første hendelsen fant sted fra 27. juli 2021 til 29. juli 2021, og den andre fra 1. oktober 2021 til 6. oktober 2021.

Under simuleringen av nedbørshendelsen i juli ble det registrert flere nøkkelobservasjoner om vannføringen i avløpsnettets. Den maksimale vannføringen ble beregnet til å være  $163.19 \frac{l}{s}$ , mens den minste vannføringen ble observert til  $8.54 \frac{l}{s}$ . Gjennomsnittlig vannføring gjennom hendelsen var på  $39.30 \frac{l}{s}$ . Disse resultatene er presentert i Figur 19.



Figur 19: Vannføring under Regn i juli 2021

I løpet av en femdagers nedbørsperiode fra 1. oktober 2021 til 6. oktober 2021, ble det gjennomført simuleringer som viste variasjoner i vannføringen i avløpsnettets. Modelleringen indikerte en maksimal vannføring på  $151.35 \frac{l}{s}$  og en minimumsvannføring på  $6.18 \frac{l}{s}$ . Gjennomsnittlig vannføring for perioden ble beregnet til  $52.35 \frac{l}{s}$ . Disse dataene er detaljert fremstilt i Figur 20, som viser avløpsnettets respons på betydelig nedbør.



Figur 20: Vannføring i sp under nedbør i oktober 2021

Simuleringene av spillvannssystemet viser en tydelig respons på nedbørshendelser, noe som indikerer at modellen adekvat tar hensyn til regnavhengig infiltrasjon i spillvannssystemet. Analyse av modellen viser at alle catchments knyttet til spillvannssystemet har en regnavhengig infiltrasjonsindeks (RDI) på omtrent 27%. Dette innebærer at 27% av regnvannet som faller ned på hvert catchment infiltreres inn i spillvannssystemet under nedbørshendelser.

### 5.3 Bruk av vannbalansemetoden for estimering av fremmedvann

I dette delkapittelet anvendes vannbalansemetoden sammen med data fra Kapittel 5.2 for å estimere andelen fremmedvann i spillvannssystemet. Først beregnes den teoretiske spillvannsmengden basert på antall personenheter (PE). Deretter sammenlignes denne beregnede mengden med den modellerte og faktisk målte vannføringen. Forskjellen mellom den målte vannføringen og den teoretiske vannføringen defineres som fremmedvann i systemet.

#### 5.3.1 Teoretisk vannføring basert på antall PE

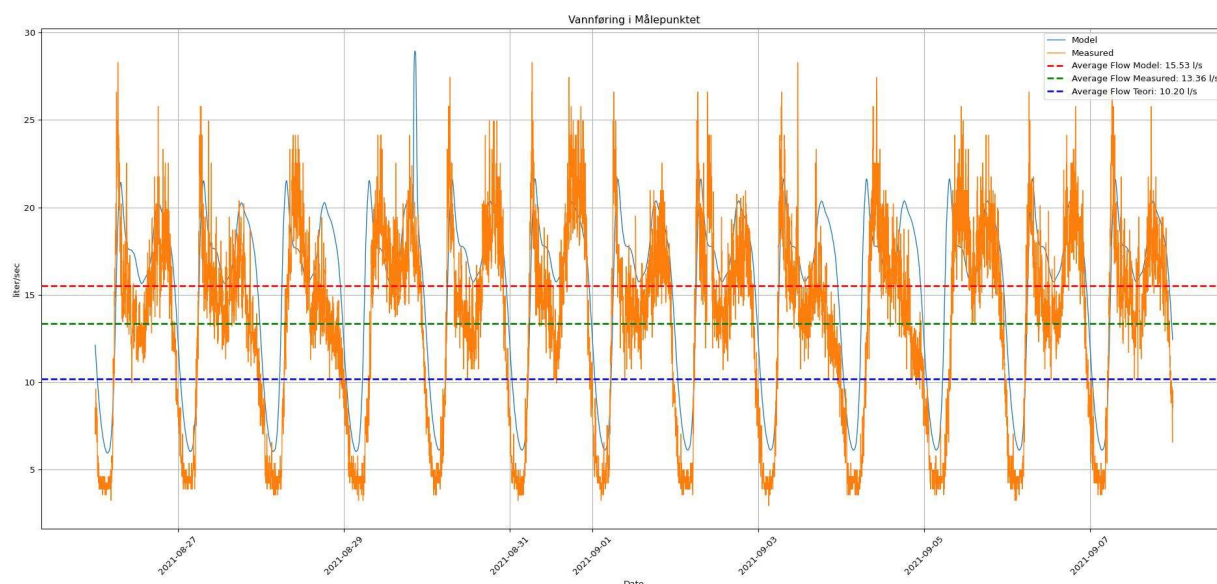
I Kapittel 5.1 ble det påvist at antall personenheter (PE) knyttet til spillvannssystemet er 4402, med en fastsatt avløpsproduksjon på 200 liter per PE per døgn. Videre forutsettes det at systemet er fullstendig tett, uten noen form for lekkasjer. Beregningene av den teoretiske avløpsmengden er presentert i Tabell 5.

Tabell 5: Teoretisk avløpsproduksjon

Antall PE:	4402
Avløpsproduksjon $\frac{l}{pe \cdot d\ddot{o}gn}$	200
$Q_{d\ddot{o}gn} [\frac{l}{d\ddot{o}gn}]$	880400
$Q_{sekunder} [\frac{l}{s}]$	10.2

### 5.3.2 Andel fremmedvann i tørrvær

Den gjennomsnittlige teoretiske avløpsvannføringen ble beregnet til  $10.2 \frac{l}{s}$ . Imidlertid viser analysen i Kapittel 5.2.1 at modellen estimerer en gjennomsnittlig vannføring på  $15.53 \frac{l}{s}$  under tørrvårsperioder, med en tilleggs vannføring på  $5.36 \frac{l}{s}$  for hele systemet. Den gjennomsnittlige målte vannføringen i samme periode er beregnet til  $13.36 \frac{l}{s}$ . Disse funnene er grafisk presentert i Figur 21, og de understreker forskjellene mellom teoretisk, modellert, og målt vannføring, noe som indikerer mulig tilstedeværelse av fremmedvann i systemet under tørre vær forhold.



Figur 21: Fremmedvann tørrvær



I henhold til den foreliggende modellen, observeres det en tilleggsvannføring på  $5,36 \frac{l}{s}$ , som utgjør en betydelig andel av den totale gjennomsnittlige vannføringen på  $15,53 \frac{l}{s}$  i avløpssystemet. Denne tilleggsvannføringen representerer en konstant innlekking, som modellen identifiserer som et vedvarende fenomen i systemet. Det er estimert av modellen at omtrent 34,5 % av vannet i avløpssystemet består av fremmedvann under tørre værforhold.

I overensstemmelse med den teoretiske forventningen, er det antatt at avløpssystemet skal opprettholde en gjennomsnittlig vannføring på  $10,2 \frac{l}{s}$ . Observasjoner under tørre værforhold har imidlertid vist en faktisk gjennomsnittlig vannføring på  $13,36 \frac{l}{s}$ , noe som indikerer et avvik på  $3,16 \frac{l}{s}$  fra den forventede verdien.

For å kvantifisere andelen fremmedvann i avløpssystemet, benyttes Formel 1. Denne formelen estimerer prosentandelen fremmedvann basert på differansen mellom den teoretiske og den faktisk målte vannføringen, og er definert som følger:

$$\text{Andel fremmedvann [\%]} = \frac{Q_{tot} - PE * Q_{ap}}{Q_{tot}} * 100$$

$$\text{Andel fremmedvann [\%]} = \frac{13,36 [\frac{l}{s}] - 10,2 [\frac{l}{s}]}{13,36 [\frac{l}{s}]} * 100 = 23,65 \%$$

Vannbalansemetoden har avdekket at andelen fremmedvann i spillvannsystemet er 23,65 % under tørre værforhold. Dette tilsvarer en konstant innlekking på  $3,16 \frac{l}{s}$ . Under forutsetningen om at det ikke forekommer nedbør i nedbørsfeltet gjennom et helt år, er den totale mengden fremmedvann beregnet og presentert for ulike perioder i Tabell 6.

Tabell 6: Fremmedvann mengde i ulike tidsintervaller

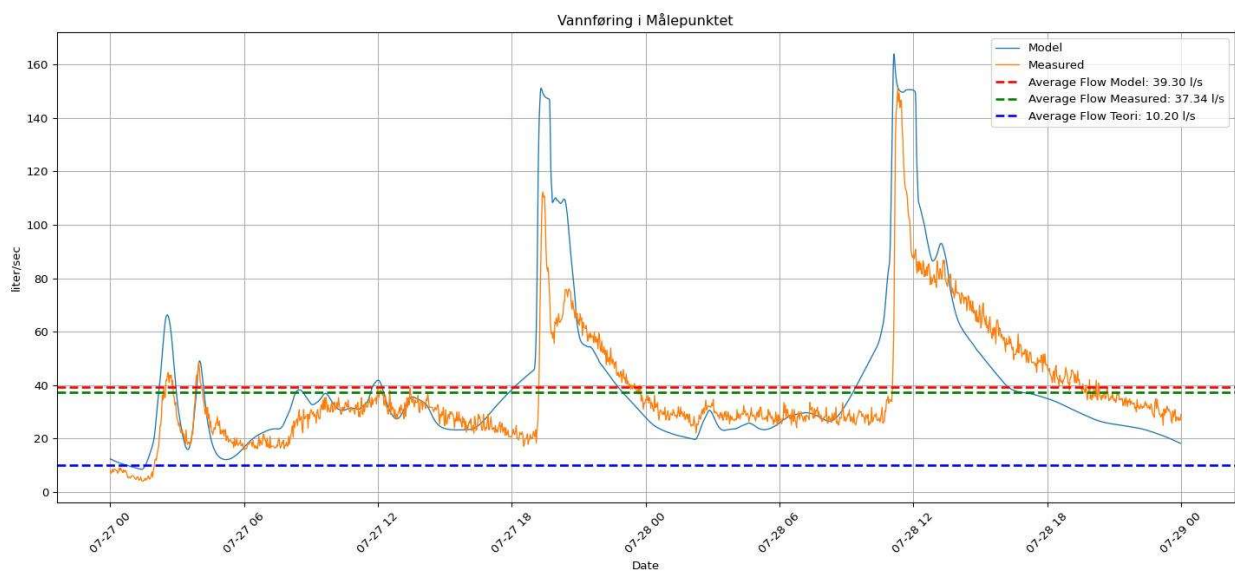
Fremmedvann mengde forutsatt ingen nedbør i feltet		
Periode	Fremmedvann [l]	Fremmedvann [m3]
1 Sekund	3.16	0.00316
1 Time	11376	11.376
1 Døgn	273024	273.024
1 Uke	1911168	1911.168
1 Måned	8190720	8190.72
1 År	99653760	99653.76

### 5.3.3 Andel fremmedvann under regnhendelser

For å estimere andelen fremmedvann i spillvannsystemet under nedbørshendelser, anvendes observasjoner fra to spesifikke nedbørshendelser som er detaljert beskrevet i kapittel 5.2.2.

Nedbørshendelse 1: fra 27. juli 2021 til 29. juli 2021

Simuleringen av denne hendelsen indikerer at modellen estimerer en gjennomsnittlig vannføring på  $39,30 \frac{l}{s}$ , mens den faktisk målte gjennomsnittsvannføringen er  $37,37 \frac{l}{s}$ . Disse resultatene er illustrert i Figur 23.



Figur 22: Fremmedvann under regn i juli 2023

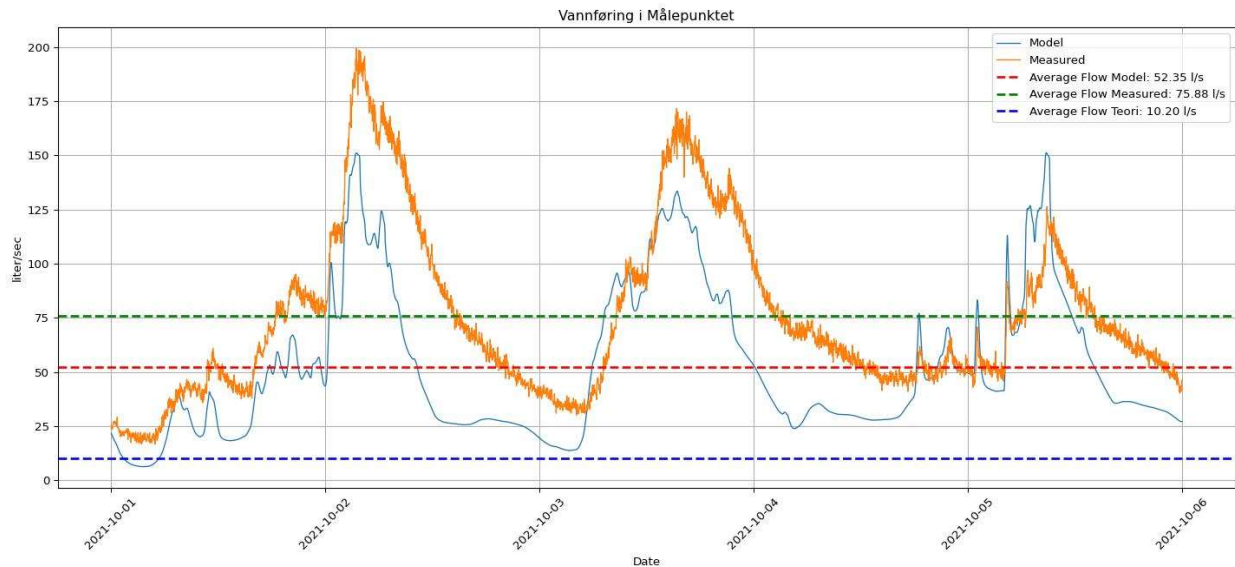
Likning 1 gir:

$$\text{Andel fremmedvann [\%]} = \frac{Q_{tot} - PE * Q_{ap}}{Q_{tot}} * 100$$

$$\text{Andel fremmedvann [\%]} = \frac{37,34 \left[\frac{l}{s}\right] - 10,2 \left[\frac{l}{s}\right]}{37,34 \left[\frac{l}{s}\right]} * 100 = 72,68 \%$$

Nedbørshendelse 2: fra 1. oktober 2021 til 6. oktober 2021

Simuleringen for denne hendelsen er detaljert presentert i Figur 23. Basert på denne simuleringen og dataene innhentet, gir vannbalansemetoden følgende resultat.



Figur 23: Fremmedvann under regn i oktober

$$\text{Andel fremmedvann [\%]} = \frac{Q_{tot} - PE * Q_{ap}}{Q_{tot}} * 100$$

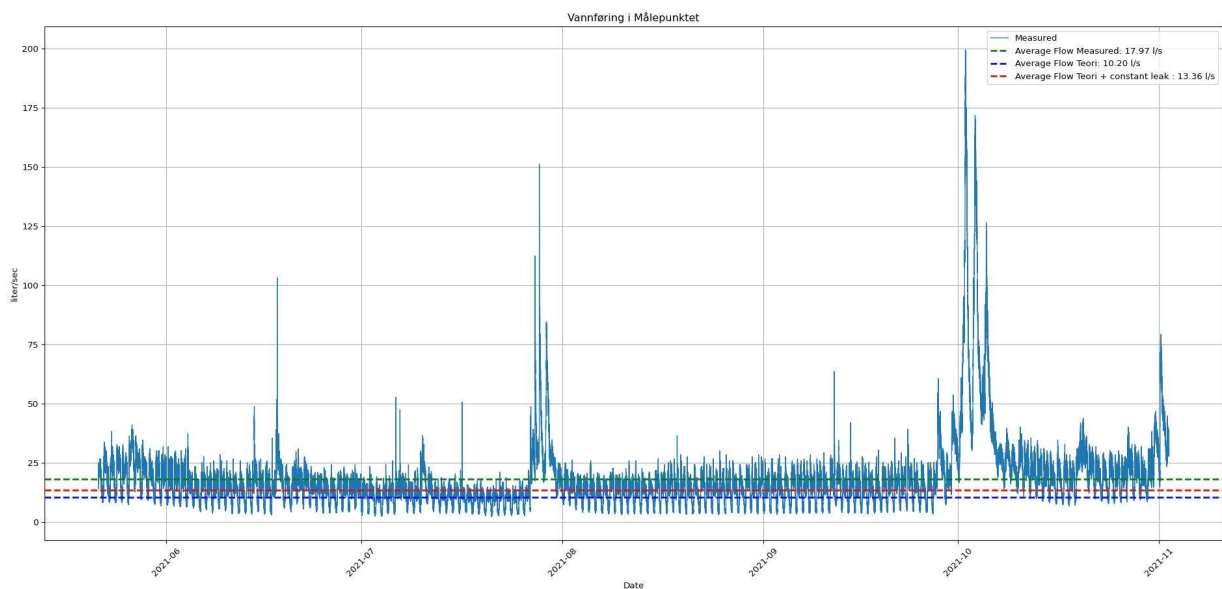
$$\text{Andel fremmedvann [\%]} = \frac{75,88 \left[\frac{l}{s}\right] - 10,2 \left[\frac{l}{s}\right]}{75,88 \left[\frac{l}{s}\right]} * 100 = 86,56\%$$

Vannbalansemetoden for nedbørshendelse 1 viser at andelen fremmedvann er 72,68 %, mens for nedbørshendelse 2 øker denne andelen til 86,56 %. Disse resultatene indikerer at andelen fremmedvann i avløpssystemet er avhengig av nedbørsforholdene, og spesielt påvirkes av parametere som intensitet og varighet av nedbøren. Dette demonstrerer at det ikke er mulig å anta en konstant andel fremmedvann som gjelder for ulike nedbørshendelser.

### 5.3.4 Andel fremmedvann i hele måle periode i 2021

Som diskutert i kapittel 5.3.3, er det ikke mulig å estimere en konstant andel fremmedvann som er gyldig for alle nedbørshendelser, gitt at andelen varierer betydelig avhengig av nedbørintensitet og -varighet. Derimot er det mulig å estimere andelen fremmedvann over lengre perioder, som for eksempel over et helt år. For denne oppgaven skal det derfor estimeres andelen fremmedvann for hele måleperioden i 2021.

Målte vannføringsdata ble samlet i perioden fra 21. mai 2021 kl. 11:32 til 2. november 2021 kl. 12:38. I henhold til analysene foretatt i kapittel 5.3.2, antas en konstant innlekking på  $3,16 \frac{l}{s}$  i systemet. Disse dataene er behandlet ved hjelp av Python, og detaljer om koden er tilgjengelig i Vedlegg K. Resultatene fra denne behandlingen er grafisk illustrert i Figur 24.



Figur 24: Gjennomsnittlig vannføring for hele perioden

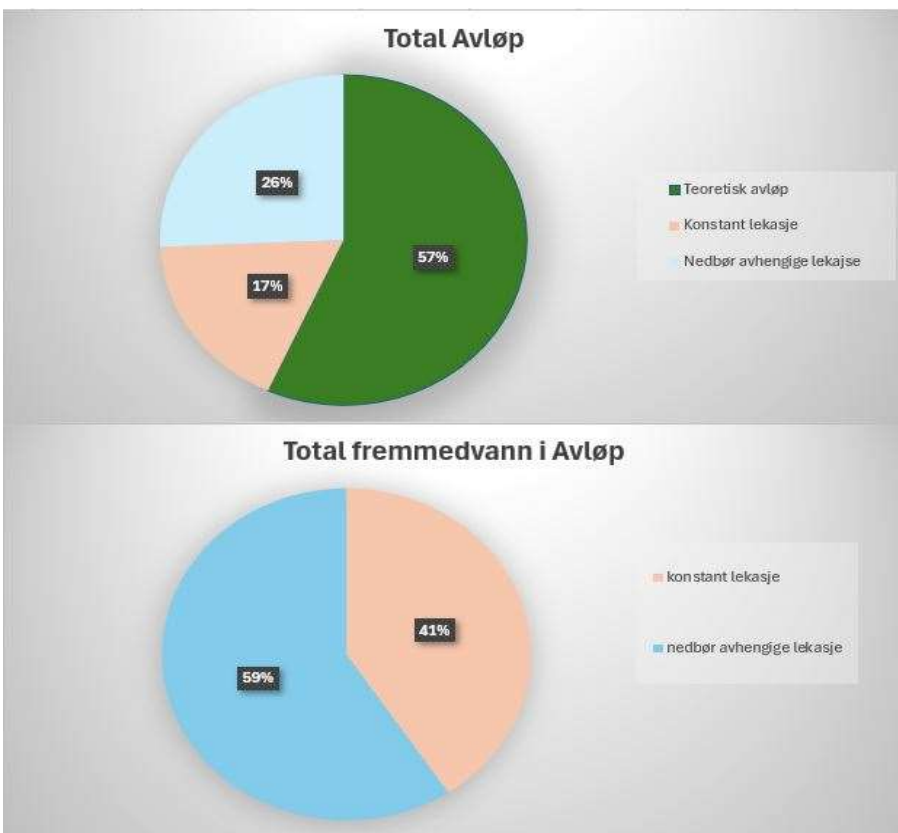
Fra den grafiske representasjonen i Figur 24 kan det observeres at den gjennomsnittlige vannføringen for hele måleperioden ble beregnet til  $17,97 \frac{l}{s}$ . Basert på denne målingen har vannbalansemetoden blitt anvendt for å estimere andel fremmedvann for den gitte perioden.

$$\text{Andel fremmedvann [\%]} = \frac{Q_{tot} - PE * Q_{ap}}{Q_{tot}} * 100$$

$$\text{Andel fremmedvann [\%]} = \frac{17,97 \left[\frac{l}{s}\right] - 10,2 \left[\frac{l}{s}\right]}{17,97 \left[\frac{l}{s}\right]} * 100 = 43.24\%$$

Vannbalansemetoden har resultert i at den totale andelen fremmedvann i avløpssystemet for hele måleperioden er beregnet til 43,24 %. Dette tilsvarer en gjennomsnittlig fremmedvannføring på  $7,77 \frac{l}{s}$ . Av dette er  $3,16 \frac{l}{s}$  en konstant innlekking som forekommer uavhengig av værforhold, mens de resterende  $4,61 \frac{l}{s}$  av fremmedvannføringen er avhengige av nedbør.

Disse funnene er grafisk presentert i Figur 25, hvor de ulike bidragene til fremmedvann – både de væruavhengige og nedbøravhengige komponentene – er tydelig vist.



Figur 25: Andel fremmedvann for hele måleperiode

## 6 Diskusjon

### 6.1 Diskusjon om resultater

I henhold til vannbalansemetoden ble det identifisert at 43% av den totale vannføringen i måleperioden bestod av fremmedvann. Av dette var 17% konstant innlekking, mens de gjenværende 26% skyldtes nedbørsrelatert innlekking. Videre analyser indikerer signifikante variasjoner i fremmedvanninnlekking under nedbørshendelser, med en andel på 73% under den første nedbørshendelsen og 86% under den andre, som diskutert i avsnitt 5.3.3. Disse funnene illustrerer at nedbørsavhengig innlekking i avløpssystemet varierer betydelig, noe som gjør det utfordrende å etablere en fast prosentandel for innlekking under slike forhold. Variabiliteten i fremmedvann under nedbørshendelser kan primært tilskrives faktorer som nedbørsmengde, grunnvannsnivå, og lufttemperatur, som kan påvirke smelting av snø. Dette understreker kompleksiteten ved å håndtere og modellere dynamikken i urbane vannsystemer. Det er imidlertid konstatert at andelen fremmedvann under tørrværsforhold i Skredderstubbekken avløpssystem utgjør 24%.

### 6.2 Betydning av funnen

Resultatene fra denne studien har flere betydningsfulle implikasjoner for feltet innen vann- og avløpssystemer, spesielt når det gjelder forståelse og håndtering av fremmedvann i urbane områder. Ved å identifisere at en betydelig andel av vannføringen i Skredderstubbekken avløpssystem består av fremmedvann, bidrar studien med verdifull innsikt i utfordringene som gamle og potensielt kompromitterte avløpssystemer står overfor.

1. Forståelse av innlekkingens omfang: Kunnskapen om at 43% av vannføringen er fremmedvann, med variabel innlekking knyttet til værforhold, understreker behovet for presise og dynamiske modeller for å forutsi og håndtere vannføring i urbane avløpssystemer. Dette er spesielt relevant i lys av klimaendringene, som forventes å øke frekvensen og intensiteten av nedbørshendelser.
2. Planlegging og infrastrukturforbedring: Funnene indikerer en tydelig nødvendighet for oppgradering og vedlikehold av eksisterende avløpssystemer. Informasjonen om hvor mye av vannføringen som er fremmedvann kan hjelpe ingeniører og planleggere med å utforme mer robuste og effektive systemer. Dette er avgjørende for å forhindre overbelastning av vannbehandlingsanlegg og unngå miljømessige skader forårsaket av overfløding.

3. Risikovurdering og krisestyring: Innsikten om at fremmedvanninnholdet varierer med værforhold, gir grunnlag for bedre risikovurdering og krisestyring i avløpssystemer. Byer kan bruke denne informasjonen til å forberede seg på og svare mer effektivt på regnhendelser, noe som kan redusere risikoen for oversvømmelser og tilhørende økonomiske og helsemessige konsekvenser.
4. Politikk og forskriftsmessige implikasjoner: Studien understreker behovet for strengere politikk og forskrifter knyttet til urban vannforvaltning. Det kan omfatte krav om regelmessige inspeksjoner, oppdateringer til byggesoner, og investeringer i grønn infrastruktur som kan absorbere eller midlertidig lagre overflatevann, for å redusere belastningen på avløpssystemet.
5. Fremtidig forskning og teknologiutvikling: Resultatene oppfordrer til videre forskning for å utforske nye teknologiske løsninger, som avanserte overvåkningssystemer og adaptiv infrastruktur, som kan tilpasse seg skiftende miljøforhold og redusere innvirkningen av fremmedvann. Dette kan inkludere utvikling av smarte avløpssystemer som bruker sanntidsdata for å optimalisere vannflyt og behandlingkapasiteter.

### 6.3 Begrensninger i studien og forslag til fremtidig forskning

I denne studien ble andelen fremmedvann i avløpssystemet beregnet ved bruk av vannbalansemetoden, basert på data innhentet i perioden fra 21. mai 2021 kl. 11:32 til 2. november 2021 kl. 12:38. Selv om dette ga verdifull innsikt, er det klart at en lengre måleperiode som strekker seg over flere år er nødvendig for å oppnå en mer omfattende forståelse av fremmedvanns innlekking i spillvannsystemet. En utvidet tidsramme vil tillate analyse av en bredere variasjon av nedbørshendelser og klimaforhold, noe som kan gi mer robuste data og forbedre nøyaktigheten av modellen.

Videre ble det observert at den nåværende modellen ikke tar hensyn til faktorer som overløp, noe som kan føre til betydelige avvik fra virkeligheten. For å forbedre modellens evne til å representere det faktiske avløpssystemet, er det essensielt å kalibrere modellen mer nøyaktig. Dette inkluderer en grundig revisjon av kum parametere og ledningsparametere, som bør verifiseres og justeres i henhold til faktiske observasjoner og målinger tilgjengelig i Geminiportal+. En slik tilnærming vil ikke bare forbedre modellens presisjon, men også dens anvendelighet i planlegging og styring av avløpssystemet under variable og utfordrende miljøforhold.

Implementering av disse forbedringene vil bidra til en mer nøyaktig modellering og dermed styrke grunnlaget for beslutningstaking knyttet til vedlikehold og oppgradering av avløpssystemer, noe som er avgjørende for å håndtere fremtidige utfordringer effektivt.



## 7 Referanser

1. asplanviak. (2024). *asplanviak.no*. Hentet fra VA-modellering:  
<https://www.asplanviak.no/tjenester/va-modellering/>
2. <https://nevina.nve.no/>. (2024). *nevina*. Hentet fra nevina.nve.no: <https://nevina.nve.no/>
3. norskvann. (2024). *Norsk Vann* . Hentet fra Fremmedvann:  
<https://norskvann.no/ledningsnett-og-teknologi/fremmedvann/>
4. sildre. (2024). *Sildre.nve.no*. Hentet fra Sildre.nve.no
5. Sola, K. J. (2021). *NMBU*. Hentet fra [https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/bitstream/handle/11250/2988049/Thesis\\_Kristin%20Jensen\\_Sola.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/bitstream/handle/11250/2988049/Thesis_Kristin%20Jensen_Sola.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
6. T.Bjerkhold, O. G. (2011). *vannforeningen.no*. Hentet fra Store fremmedvannmengder i norske avløpsrensaneanlegg: [https://vannforeningen.no/wp-content/uploads/2015/06/2011\\_820086.pdf](https://vannforeningen.no/wp-content/uploads/2015/06/2011_820086.pdf)
7. Va.blad. (2017). *va-blad.no* . Hentet fra fremmedvann i avløpsledninger : [https://www.va-blad.no/wp-content/uploads/2017/10/Blad-123\\_29.11.17.pdf](https://www.va-blad.no/wp-content/uploads/2017/10/Blad-123_29.11.17.pdf)

## 8 Vedlegg

### Vedlegg A: Artikkel

# Beregning av fremmedvann i avløpssystemet i Skredderstubekken

Av: Mohammad Ebrahim Hosseini

Institusjon: Norges Teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU), Trondheim

## Introduksjon

Fremmedvann i avløpssystemer er en utbredt utfordring i urban infrastruktur, med betydelige økonomiske og miljømessige konsekvenser. Fremmedvann omfatter inntrenging av uønsket vann, som regnvann, grunnvann og lekkasjer fra vannledninger, inn i avløpsnett. Dette fører til overbelastning av renseanlegg, økt risiko for oversvømmelser, og økte driftskostnader. Denne studien undersøker omfanget av fremmedvann i Skredderstubbekken avløpssystem i Nordre Follo kommune ved hjelp av avansert modellering, og diskuterer mulige løsninger for å minimere fremmedvanninntrengning.

## Fremmedvannets Innvirkning på Avløpssystemer

Fremmedvann fører til en rekke uønskede konsekvenser. Overbelastning av renseanlegg, som er dimensjonert for å behandle avløpsvann, reduserer anleggets effektivitet og kan føre til utilstrekkelig rensing av avløpsvann. Utslipp av forurenset vann i naturen utgjør en trussel mot vannlevende organismer og drikkevannskilder. Økt risiko for oversvømmelser i kjellere og på gater, spesielt under kraftig regn, forårsaker materielle skader og ubehag for beboerne. Økte driftskostnader for kommunen, knyttet til pumping, rensing og reparasjon av avløpsnett, belaster kommuneøkonomien.

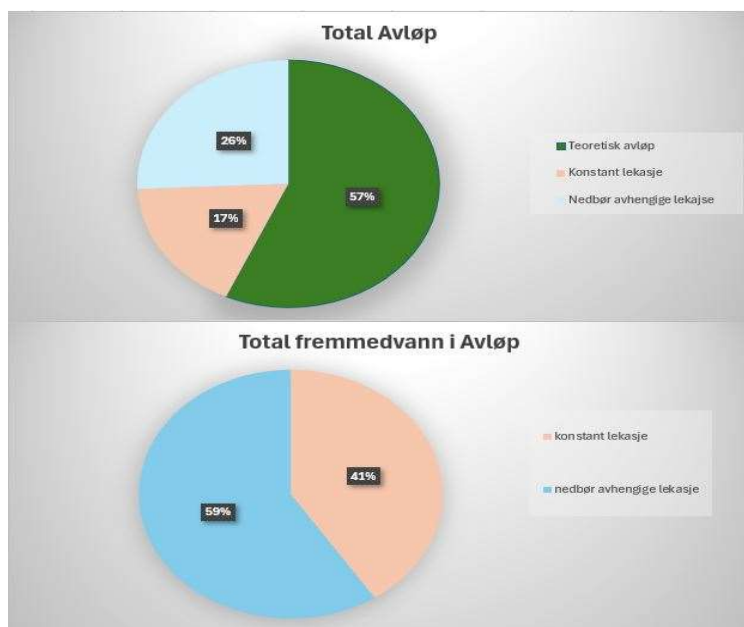
## Metode

For å kvantifisere fremmedvann i Skredderstubbekken avløpssystem ble det utviklet en datamodell som simulerer vannføringen under varierende meteorologiske forhold. Modellen tar hensyn til faktorer som nedbørmengde, grunnvannsnivå og avløpsproduksjon fra husstander. Den er kalibrert mot observerte hydrologiske data fra juni og juli 2023, og en sammensatt modell bestående av overvanns- og spillvannskomponenter, kalibrert av Multiconsult, ble brukt til å

simulere spillvannsføring under ulike værforhold i 2021. Vannbalansemetoden ble anvendt for å estimere andelen fremmedvann i avløpssystemet.

## Resultater

Modelleringen avdekker at fremmedvann utgjør en betydelig del av vannføringen i Skredderstubbekken avløpssystem. Resultatene indikerer at 43 % av den totale vannføringen i måleperioden i 2021 bestod av fremmedvann, hvorav 17 % var konstant innlekking og 26 % var nedbørsavhengig innlekking.



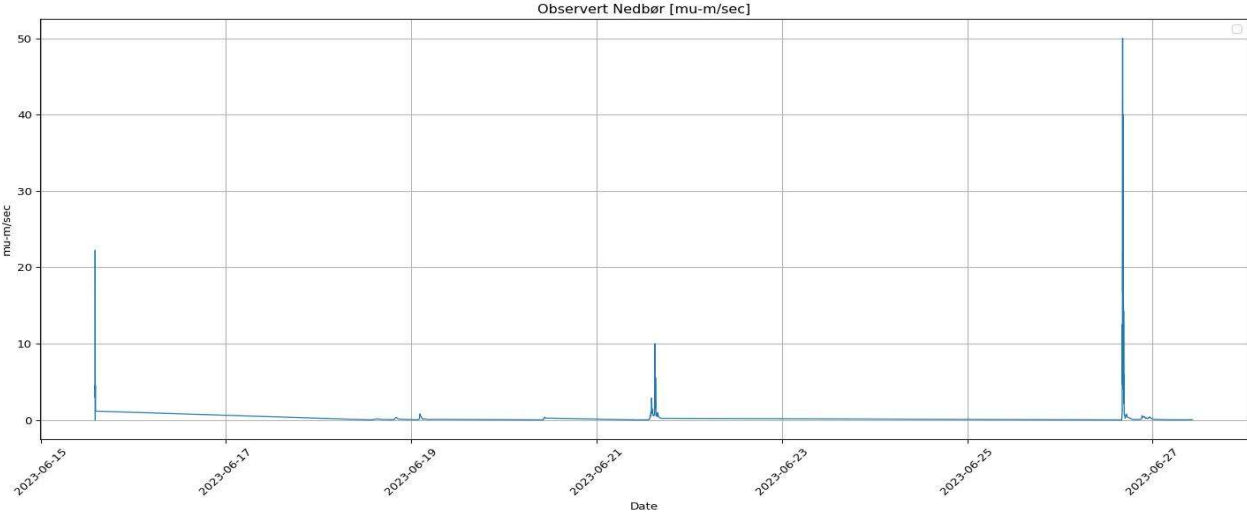
Figur 1: Andel fremmedvann i Skredderstubbekken avløpssystem.

Studien viser at andelen fremmedvann varierer betydelig avhengig av værforhold, med en markant økning under kraftig regn. Dette understreker viktigheten av å implementere robuste tiltak for å håndtere fremmedvanninntrengning, spesielt i perioder med intens nedbør.

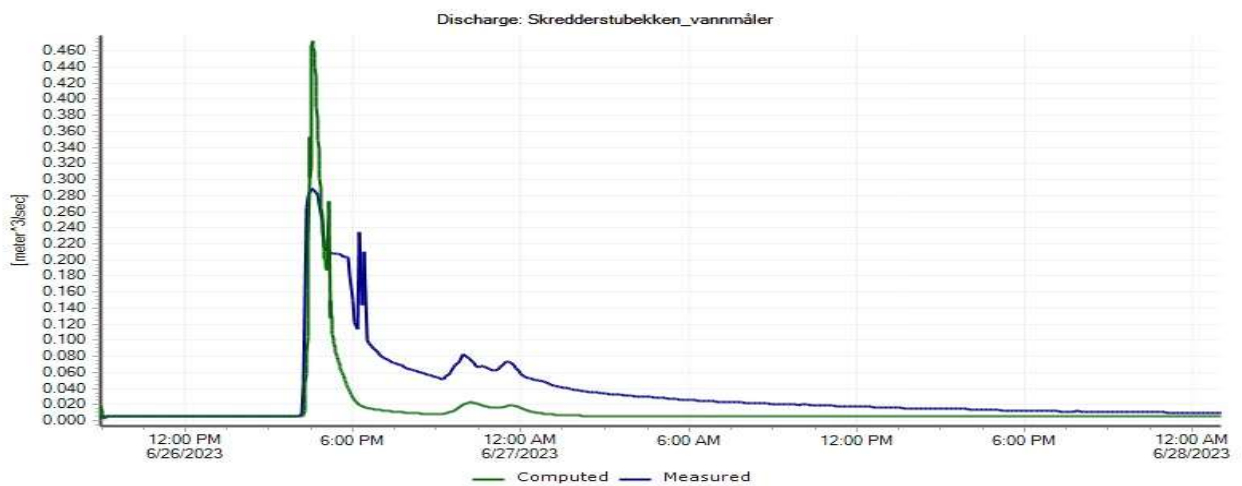
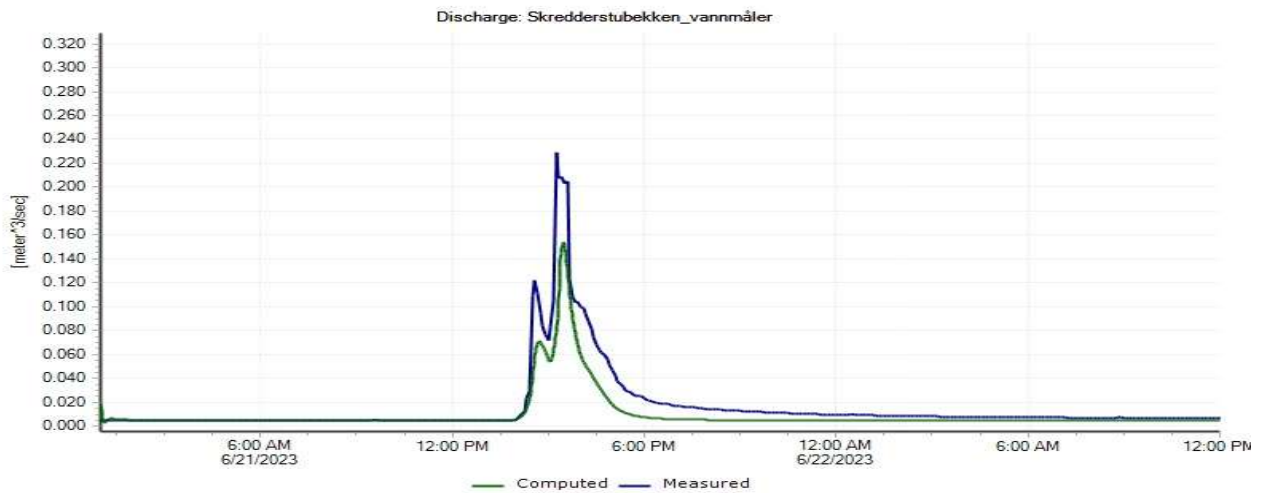
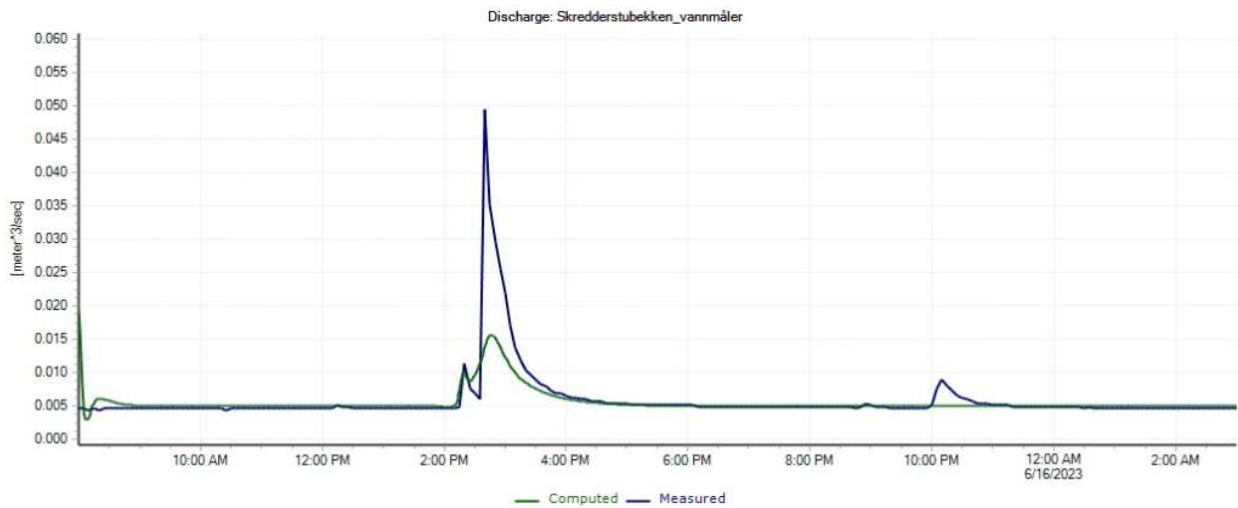
## Konklusjon

Denne studien belyser omfanget av fremmedvann i Skredderstubbekken avløpssystem og understreker behovet for effektive tiltak for å håndtere utfordringen. Investering i oppgradering, vedlikehold og implementering av innovative løsninger som separatsystem for regnvann og grønn infrastruktur vil bidra til å sikre et mer miljøvennlig, robust og kostnadseffektivt avløpssystem for fremtiden.

# Vedlegg B: Observert nedbør i juni 2023



## Vedlegg C: Vannføring under nedbørshendelser i juni



## Vedlegg D: Filtrering av catchments etter andel av permeable flater

```
import pandas as pd

# Leser inn Excel-fil
file = "Multiconsult_første modell.xlsx"
sheet = 'Catchments'
df = pd.read_excel(file, sheet_name=sheet)

# Oppretter lister for hver gruppe
Gruppe_1 = []
Gruppe_2 = []
Gruppe_3 = []
Gruppe_4 = []
Gruppe_5 = []

def gruppe():
    for i in range(len(df)):
        impervious = df['ModelA impervious area [%]'][i]
        if 0 <= impervious <= 5:
            Gruppe_1.append(df['ID'][i])
        elif 5.1 <= impervious <= 10:
            Gruppe_2.append(df['ID'][i])
        elif 10.1 <= impervious <= 15:
            Gruppe_3.append(df['ID'][i])
        elif 15.1 <= impervious <= 20:
            Gruppe_4.append(df['ID'][i])
        elif impervious >= 20.1:
            Gruppe_5.append(df['ID'][i])

# Kjører funksjonen for å gruppere data
gruppe()

# Printer ut innholdet i Gruppe 2 for verifisering
print(f'Gruppe_1 : {Gruppe_1}')
print(f'Gruppe_2 : {Gruppe_2}')
print(f'Gruppe_3 : {Gruppe_3}')
print(f'Gruppe_4 : {Gruppe_4}')
print(f'Gruppe_5 : {Gruppe_5}')

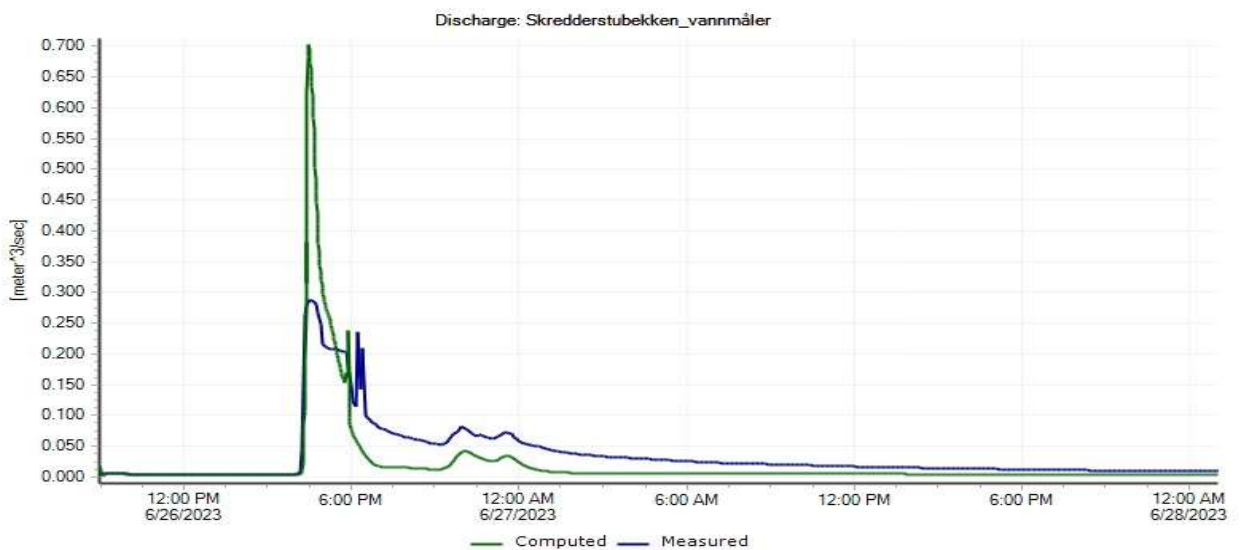
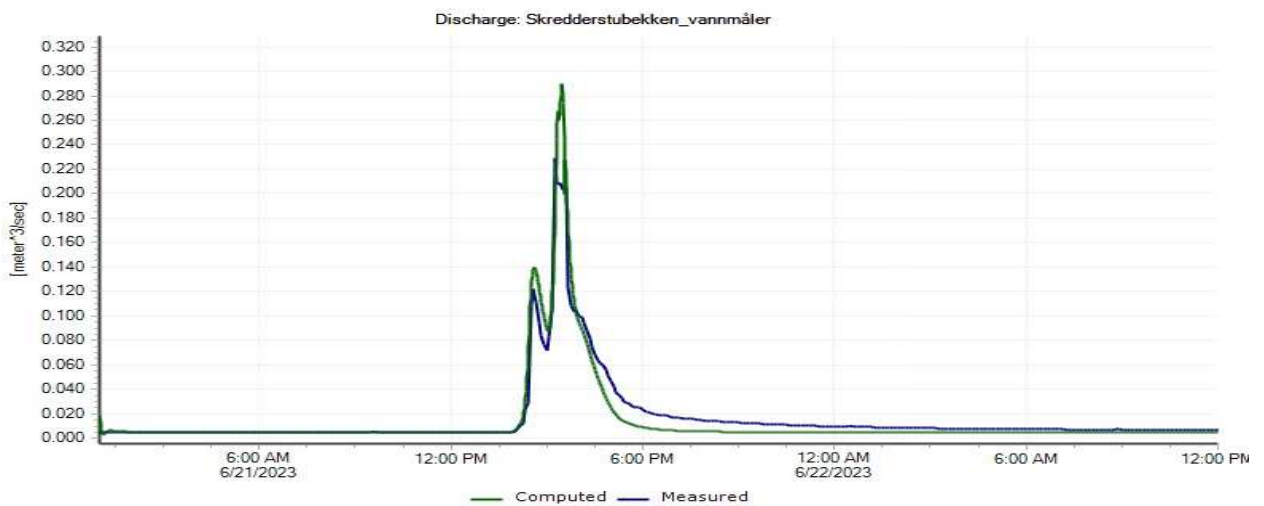
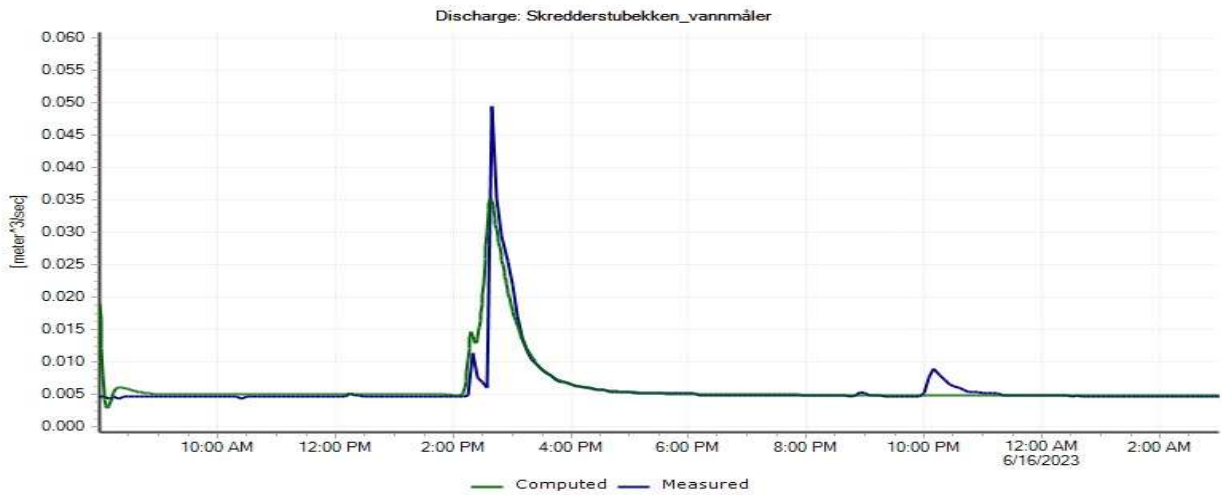
output:
```

```
Gruppe_1 : ['Skredderstu_5', 'Skredderstu_222', 'Skredderstu_168',  
'Skredderstu_174', 'Skredderstu_90', 'Skredderstu_88', 'Skredderstu_92',  
'Skredderstu_93', 'Skredderstu_128', 'Skredderstu_113', 'Skredderstu_210',  
'Skredderstu_17', 'Skredderstu_235', 'Skredderstu_201', 'Skredderstu_248',  
'Skredderstu_237', 'Skredderstu_48', 'Skredderstu_49', 'Skredderstu_14',  
'Skredderstu_187', 'Skredderstu_80', 'Skredderstu_99', 'Skredderstu_11',  
'Skredderstu_148', 'Skredderstu_151', 'Skredderstu_110', 'Skredderstu_50',  
'Skredderstu_106', 'Skredderstu_105', 'Skredderstu_118', 'Skredderstu_250',  
'Skredderstu_255']  
Gruppe_2 : ['Skredderstu_21', 'Skredderstu_22', 'Skredderstu_55',  
'Skredderstu_60', 'Skredderstu_65', 'Skredderstu_66', 'Skredderstu_78',  
'Skredderstu_81', 'Skredderstu_82', 'Skredderstu_98', 'Skredderstu_111',  
'Skredderstu_120', 'Skredderstu_121', 'Skredderstu_126', 'Skredderstu_130',  
'Skredderstu_139', 'Skredderstu_155', 'Skredderstu_158', 'Skredderstu_175',  
'Skredderstu_184', 'Skredderstu_195', 'Skredderstu_199', 'Skredderstu_208',  
'Skredderstu_209', 'Skredderstu_213', 'Skredderstu_216', 'Skredderstu_221',  
'Skredderstu_223', 'Skredderstu_226', 'Skredderstu_227', 'Skredderstu_64',  
'Skredderstu_29', 'Skredderstu_30', 'Skredderstu_63', 'Skredderstu_61',  
'Skredderstu_62', 'Skredderstu_1', 'Skredderstu_67', 'Skredderstu_2',  
'Skredderstu_68', 'Skredderstu_69', 'Skredderstu_71', 'Skredderstu_165',  
'Skredderstu_166', 'Skredderstu_167', 'Skredderstu_25', 'Skredderstu_26',  
'Skredderstu_27', 'Skredderstu_28', 'Skredderstu_159', 'Skredderstu_160',  
'Skredderstu_23', 'Skredderstu_161', 'Skredderstu_24', 'Skredderstu_162',  
'Skredderstu_163', 'Skredderstu_156', 'Skredderstu_157', 'Skredderstu_164',  
'Skredderstu_72', 'Skredderstu_73', 'Skredderstu_173', 'Skredderstu_32',  
'Skredderstu_33', 'Skredderstu_171', 'Skredderstu_172', 'Skredderstu_34',  
'Skredderstu_35', 'Skredderstu_36', 'Skredderstu_176', 'Skredderstu_3',  
'Skredderstu_169', 'Skredderstu_170', 'Skredderstu_153', 'Skredderstu_154',  
'Skredderstu_87', 'Skredderstu_89', 'Skredderstu_83', 'Skredderstu_96',  
'Skredderstu_97', 'Skredderstu_85', 'Skredderstu_86', 'Skredderstu_94',  
'Skredderstu_37', 'Skredderstu_38', 'Skredderstu_74', 'Skredderstu_75',  
'Skredderstu_181', 'Skredderstu_182', 'Skredderstu_183', 'Skredderstu_191',  
'Skredderstu_188', 'Skredderstu_102', 'Skredderstu_103', 'Skredderstu_104',  
'Skredderstu_197', 'Skredderstu_198', 'Skredderstu_39', 'Skredderstu_40',  
'Skredderstu_45', 'Skredderstu_200', 'Skredderstu_204', 'Skredderstu_205',  
'Skredderstu_6', 'Skredderstu_7', 'Skredderstu_56', 'Skredderstu_57',  
'Skredderstu_127', 'Skredderstu_129', 'Skredderstu_131', 'Skredderstu_132',  
'Skredderstu_133', 'Skredderstu_135', 'Skredderstu_136', 'Skredderstu_230',  
'Skredderstu_228', 'Skredderstu_224', 'Skredderstu_225', 'Skredderstu_220',  
'Skredderstu_219', 'Skredderstu_122', 'Skredderstu_119', 'Skredderstu_117',  
'Skredderstu_112', 'Skredderstu_214', 'Skredderstu_116', 'Skredderstu_114',  
'Skredderstu_211', 'Skredderstu_212', 'Skredderstu_149', 'Skredderstu_152',  
'Skredderstu_233', 'Skredderstu_234', 'Skredderstu_236', 'Skredderstu_125',  
'Skredderstu_123', 'Skredderstu_124', 'Skredderstu_229', 'Skredderstu_53',  
'Skredderstu_58', 'Skredderstu_142', 'Skredderstu_144', 'Skredderstu_145',  
'Skredderstu_203', 'Skredderstu_41', 'Skredderstu_42', 'Skredderstu_44',  
'Skredderstu_231', 'Skredderstu_137', 'Skredderstu_138', 'Skredderstu_190',
```

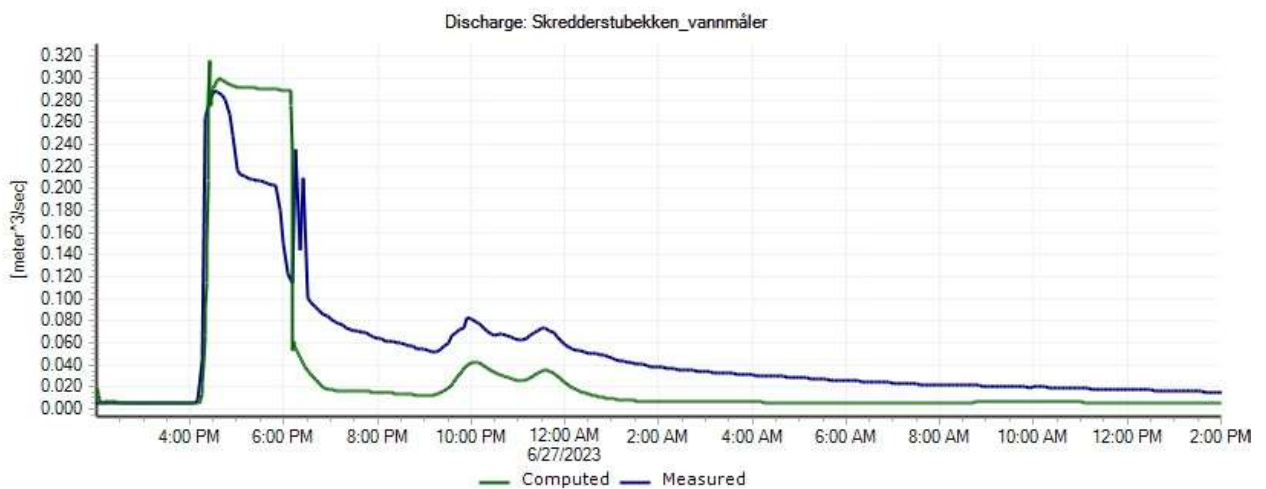
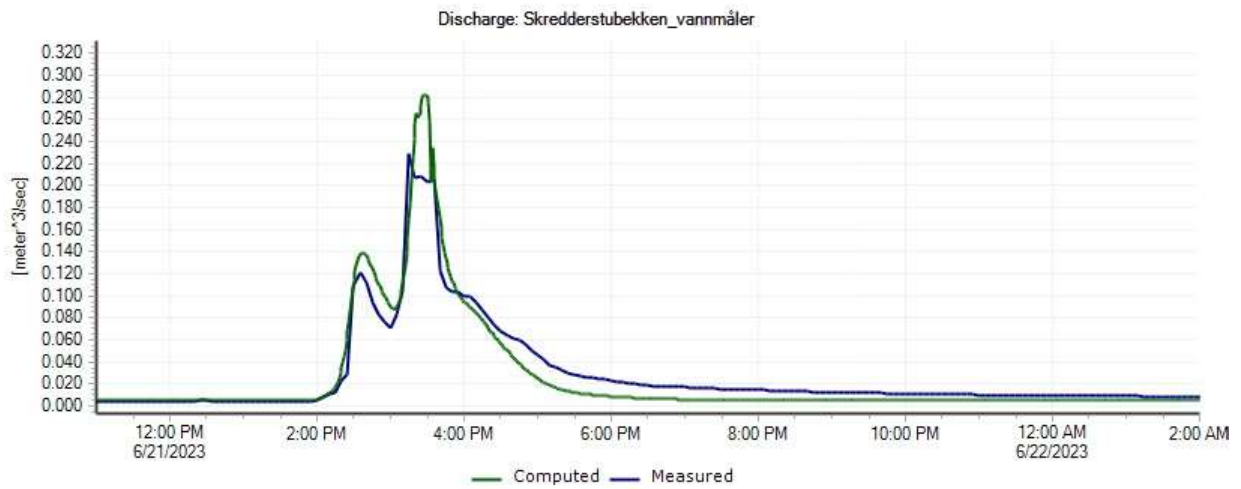
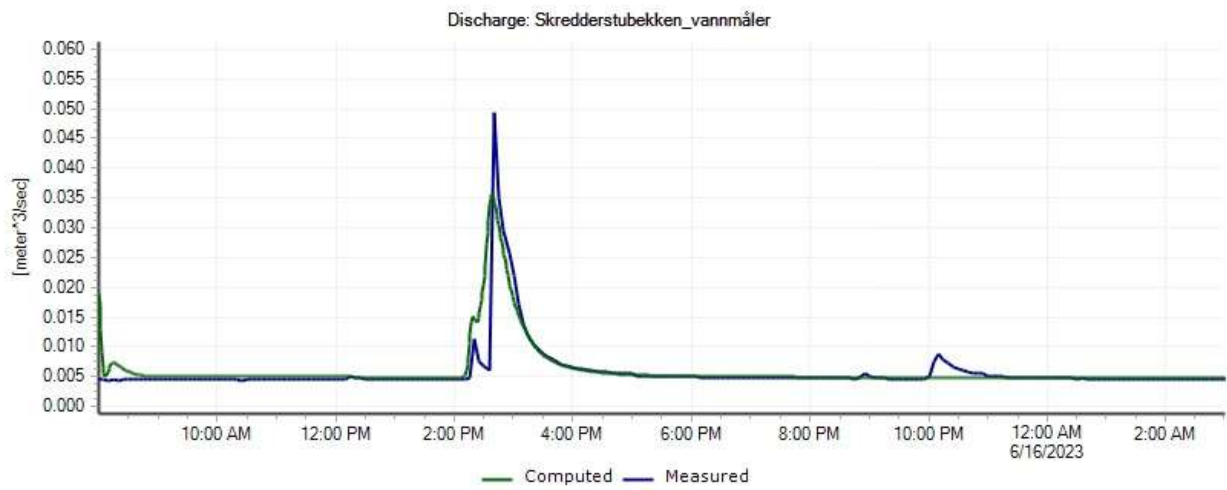
```
'Skredderstu_249', 'Skredderstu_59', 'Skredderstu_140', 'Skredderstu_240',  
'Skredderstu_242', 'Skredderstu_192', 'Skredderstu_193', 'Skredderstu_194',  
'Skredderstu_245', 'Skredderstu_46', 'Skredderstu_47', 'Skredderstu_146',  
'Skredderstu_185', 'Skredderstu_186', 'Skredderstu_79', 'Skredderstu_251',  
'Skredderstu_179', 'Skredderstu_180', 'Skredderstu_100', 'Skredderstu_238',  
'Skredderstu_239', 'Skredderstu_252', 'Skredderstu_253', 'Skredderstu_9',  
'Skredderstu_10', 'Skredderstu_147', 'Skredderstu_12', 'Skredderstu_13',  
'Skredderstu_150', 'Skredderstu_109', 'Skredderstu_51', 'Skredderstu_107',  
'Skredderstu_108', 'Skredderstu_217', 'Skredderstu_218', 'Skredderstu_20',  
'Skredderstu_15']  
Gruppe_3 : ['Skredderstu_70', 'Skredderstu_31', 'Skredderstu_178',  
'Skredderstu_76', 'Skredderstu_77', 'Skredderstu_4', 'Skredderstu_206',  
'Skredderstu_207', 'Skredderstu_232', 'Skredderstu_189', 'Skredderstu_241',  
'Skredderstu_244', 'Skredderstu_246', 'Skredderstu_101', 'Skredderstu_8',  
'Skredderstu_52']  
Gruppe_4 : []  
Gruppe_5 : []
```



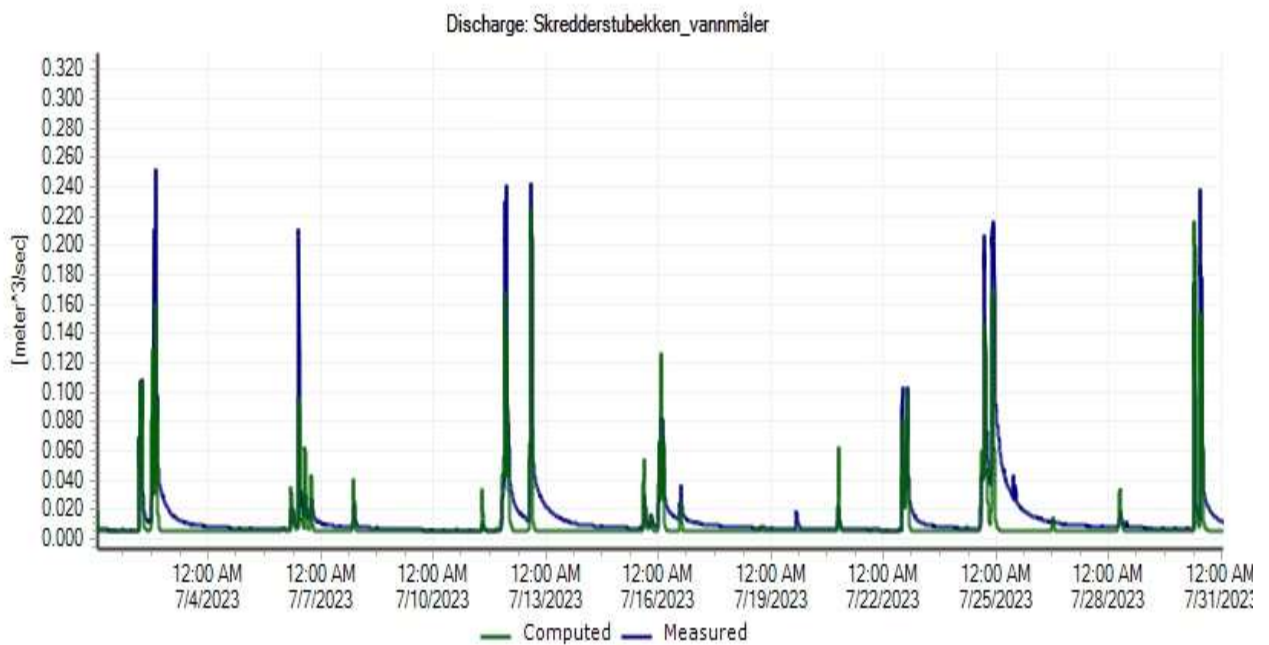
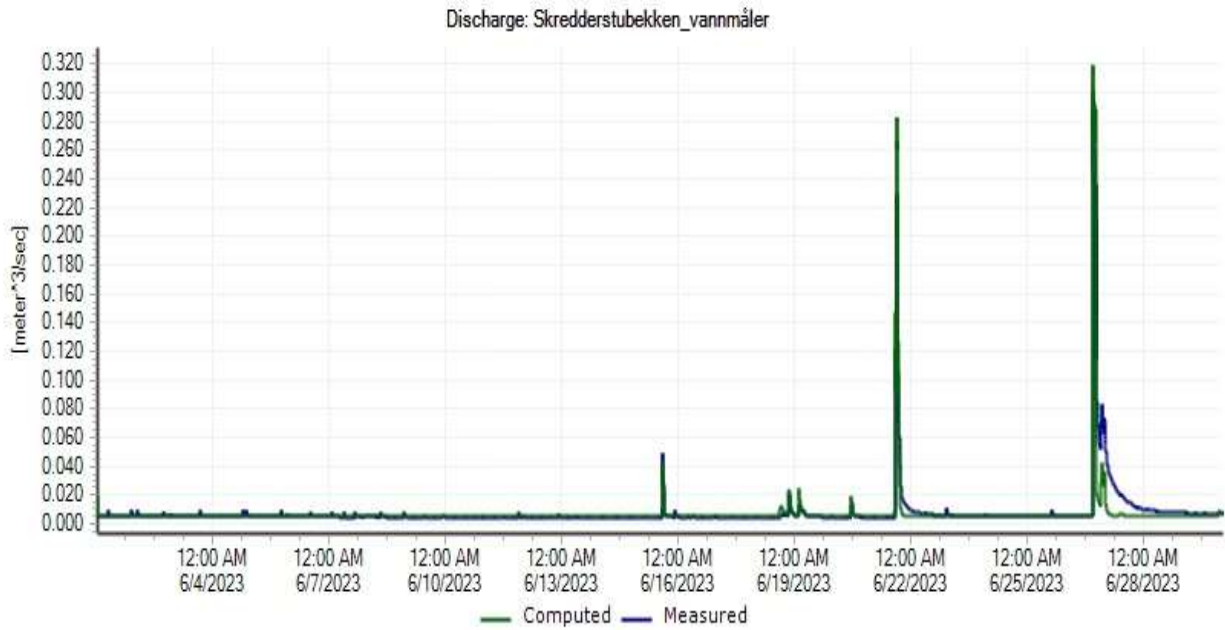
## Vedlegg E: Vannføring etter 5 % øking i andel tettestlater



## Vedlegg F: Vannføring etter integrering av vannføringsregulator



## Vedlegg G: Vannføring i juni og juli etter kalibrering



## Vedlegg H: Beregning av vannvolum

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.integrate import simps
import time
import numpy as np

# Leser inn Excel-filene
excel_file1 = 'ferdigkalibrert.xlsx' #legge inn excell fra Modellen
excel_file2 = 'filtered_vannforing_data_Sildre.xlsx' #legge inn excell
fra Sildre
df1 = pd.read_excel(excel_file1, sheet_name='juni') #
df2 = pd.read_excel(excel_file2, sheet_name='Sheet1')

# Konverterer tidssøyler til datetime og justerer tidspunkt
df1['Time'] = pd.to_datetime(df1['Time'])
df2['Tidspunkt'] = pd.to_datetime(df2['Tidspunkt'])
df2['Tidspunkt'] += pd.Timedelta(hours=1) # Legger til en time til 'tidspunkt' #
Sildre har vinter tid og sommertid.

# Definerer start- og sluttdato for ønsket tidsintervall
start_date = '2023-06-01 01:00:00'
end_date = '2023-06-30 01:00:00'

# Filtrer DataFrames basert på det tilpassede tidsintervallet
df1_custom = df1[(df1['Time'] >= start_date) & (df1['Time'] <= end_date)]
df2_custom = df2[(df2['Tidspunkt'] >= start_date) & (df2['Tidspunkt'] <=
end_date)]

# Synkroniserer df1_custom og df2_custom basert på tidsstemppler
df1_custom = df1_custom.rename(columns={'Time': 'Tidspunkt'})
merged_df = pd.merge_asof(df1_custom.sort_values('Tidspunkt'),
df2_custom.sort_values('Tidspunkt'), on='Tidspunkt', direction='nearest')

# Beregner punktvis differanse
diff1 = merged_df['Vannforing (kubemeter/s)'] - merged_df['Link Discharge 22183-
86, 16.14[meter^3/sec]']
time1 = df1_custom['Tidspunkt']

def total_vannføring():
    # Konverterer tidspunkt til sekunder siden starten av perioden for nøyaktig
tidsdifferanse
```

```

    tid_df1 = (df1_custom['Tidspunkt'] -
pd.Timestamp(start_date)).dt.total_seconds()
    tid_df2 = (df2_custom['Tidspunkt'] -
pd.Timestamp(start_date)).dt.total_seconds()

    # Beregner total vannføring for modellen og Sildre
    # Bruker Simpson's regel for integrasjon
    total_vannforing_modell = simps(df1_custom['Link Discharge 22183-86,
16.14[meter^3/sec]'], tid_df1)
    total_vannforing_sildre = simps(df2_custom['Vannforing (kubemeter/s)'],
tid_df2)

    return total_vannforing_modell, total_vannforing_sildre
def maks_vannføring():
    # Finner maksverdi og tilhørende tidspunkt for modellens data
    peak_modell_verdi = max(df1_custom['Link Discharge 22183-86,
16.14[meter^3/sec]'])
    peak_modell_tid = df1_custom.loc[df1_custom['Link Discharge 22183-86,
16.14[meter^3/sec]'] == peak_modell_verdi, 'Tidspunkt'].iloc[0]

    # Finner maksverdi og tilhørende tidspunkt for Sildre's data
    peak_sildre_verdi = max(df2_custom['Vannforing (kubemeter/s)'])
    peak_sildre_tid = df2_custom.loc[df2_custom['Vannforing (kubemeter/s)'] ==
peak_sildre_verdi, 'Tidspunkt'].iloc[0]

    return round(peak_modell_verdi,3), round(peak_sildre_verdi,3),

# Kall funksjonen og vis resultatene
modell_vannforing, sildre_vannforing = total_vannføring()
print(f"Total vannføring fra modellen: {round(modell_vannforing,3)} m^3")
print(f"Total vannføring fra Sildre: {round(sildre_vannforing,3)} m^3")
print(f"Peak vannføring fra modell: {maks_vannføring()[0]} m^3/s")
print(f"Peak vannføring fra Sildre: {maks_vannføring()[1]} m^3/s")

```

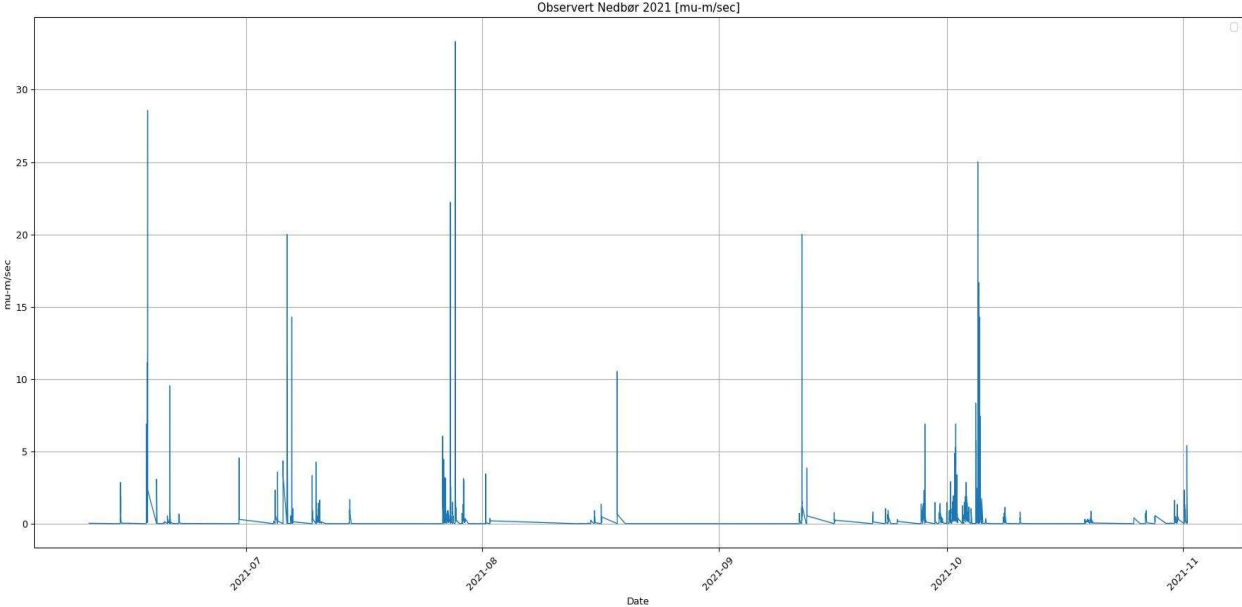
output:

```

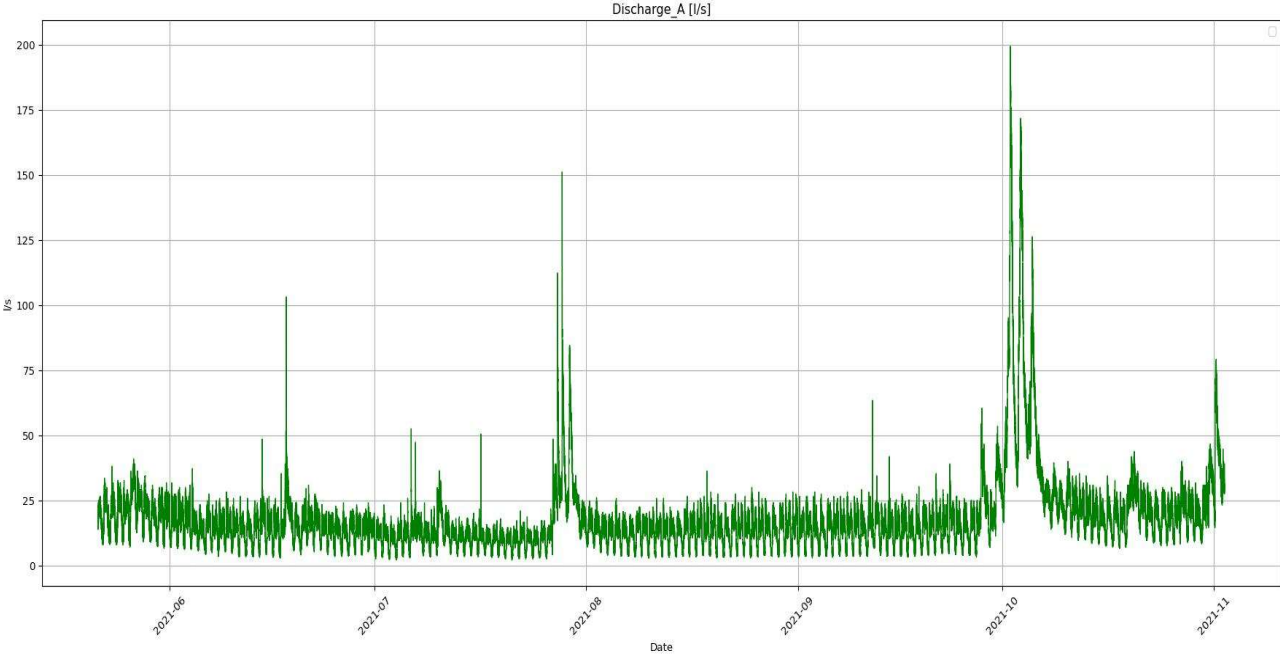
Total vannføring fra modellen: 16380.007 m^3
Total vannføring fra Sildre: 18656.751 m^3
Peak vannføring fra modell: 0.319 m^3/s
Peak vannføring fra Sildre: 0.289 m^3/s

```

# Vedlegg I: Observertnedbør 2021



# Vedlegg J: Målt vannføring spillvann



## Vedlegg K: Beregning og plotting av vannførings data

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

# Leser inn Excel-filene

excel_file1 = 'Data2021.xlsx'
Measured = pd.read_excel(excel_file1, sheet_name='Vannføring')

# Konverterer tidssøyler til datetime

Measured['Time'] = pd.to_datetime(Measured['Time'])

# Beregner gjennomsnittlig flow

average_flow_measured = Measured['Discharge_A [l/s]'].mean()
average_flow_teori = 10.20
konstant_leak = 3.16

# Plotting
plt.figure(figsize=(15, 7), dpi=96)
plt.plot(Measured['Time'], Measured['Discharge_A [l/s]'], linestyle='-',
linewidth=1, label='Measured')
plt.axhline(y=average_flow_measured, color='g', linestyle='--', label=f'Average
Flow Measured: {average_flow_measured:.2f} l/s',linewidth=2)
plt.axhline(y=average_flow_teori, color='b', linestyle='--', label=f'Average Flow
Teori: {average_flow_teori:.2f} l/s',linewidth=2)
plt.axhline(y=average_flow_teori + konstant_leak, color='r', linestyle='--',
label=f'Average Flow Teori + constant leak : {average_flow_teori +
konstant_leak:.2f} l/s',linewidth=2)
plt.title("Vannføring i Målepunktet")
plt.xlabel("Date")
plt.ylabel("liter/sec")
plt.xticks(rotation=45)
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.show()
```