



Norges miljø- og  
biovitenskapelige  
universitet

**Masteroppgave 2023 30 stp**  
Fakultet for realfag og teknologi

## **Utvikling og testing av modell-by for overvanns-undervisning**

Development and testing of a model city for  
stormwater education

**Trygve Grobstok Skjeseth**  
Vann- og miljøteknikk

---

---

## Forord

Denne artikkelen er mitt avsluttende arbeid på masterprogrammet vann- og miljøteknikk ved Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet (NMBU). Denne oppgaven representerer et betydelig arbeid og engasjement, og jeg håper den vil være verdifull for deg som leser.

Jeg ønsker å takke min veileder, Kim Haukeland Paus, for støtte, gode innspill og veiledning gjennom hele prosessen. Jeg ønsker også å rette en stor takk til Øyvind Hansen og de andre som jobber på verkstedet på NMBU. Uten dem ville dette prosjektet ikke vært mulig å gjennomføre. Jeg vil også takke mine medstudenter for fem flotte år i Ås.

Til slutt vil jeg takke mine foreldre og søsken for samtaler rundt oppgaven og motivasjon.

Ås, mai 2023

Trygve Grobstok Skjeseth

---

## Sammendrag

Dagens og fremtidens byer står ovenfor flere utfordringer knyttet til overvannshåndtering. Det forventes lengre og mer intense regnskyll, og økt grad av urbanisering som fører til flere tette flater som hindrer vannet å infiltrere gjennom bakken. Underdimensjonerte avløpssystemer klarer ikke å ta unna alt dette vannet som fører til at urensset overvann går i overløp og påvirker omgivelsene og vassdrag på en negativ måte. God overvannshåndtering krever også planlegging og samarbeid på tvers av fagfelt og flere norske kommuner ser behovet for ny kunnskap innenfor fagfeltet.

I dag består opplæring og kompetanseheving i bransjen hovedsakelig av tradisjonelle metoder som f.eks. kursing, seminarer, case-studier og regneøvelser. Et spennende og lite utprøvd alternativ til dette er å oppnå kunnskap og forståelse gjennom en fysisk modell. I denne oppgaven er det derfor designet, bygget og testet en fysisk bymodell. Bymodellen representerer et lite nedbørfelt på 2 m<sup>2</sup> og er modulbasert, noe som tillater de som bruker den å utprøve ulike byrom. Videre kan det eksperimenteres med ulike naturbaserte overvannstiltak i form av grønne tak og grøntområder/permeable dekker, samt plasseringen av disse og hvor stor grad av byen som er dekt med tiltak. Systemet kan testes med varierende nedbørintensiteter og varigheter, og det er mulig å måle avrenningen ut fra modellen.

Bymodellen er i stand til å demonstrere og visualisere flere utfordringer knyttet til overvannshåndtering i urbane områder. Resultater fra forsøk gjort med modellen viser at grønne tak kan fordrøye maksimal avrenningsintensitet ved å forsinke og holde tilbake avrenningen i starten av regnhendelsen. De permeable dekkene bidrar videre til å redusere maksimal avrenningsintensitet og det totale avrenningsvolum. Et formål med modellbyen er anvendelse som pedagogisk virkemiddel for å heve kompetanse og formidle konsepter og utfordringer knyttet til urban overvannshåndtering på en mer engasjerende og praktisk måte.

---

## Summary

Today's and future cities face several challenges related to stormwater management. Longer and more intense rainfall is expected, and increased urbanization leads to more impervious surfaces that prevent water from infiltrating the ground. Undersized drainage systems are unable to handle all this water, resulting in untreated stormwater overflowing and negatively affecting the surroundings and watercourses. Effective stormwater management also requires planning and collaboration across disciplines, and several Norwegian municipalities recognize the need for new knowledge in this field.

Currently, training and competency development in the industry primarily consist of traditional methods such as training courses, seminars, case studies, and computational exercises. An exciting and little-explored alternative to this is gaining knowledge and understanding through physical modeling. Therefore, in this project, a physical city model has been designed, built, and tested. The city model represents a small catchment area of 2 m<sup>2</sup> and is modular, allowing users to experiment with different urban spaces. Additionally, various nature-based stormwater management measures can be tested, such as green roofs and green areas/permeable surfaces, as well as their placement and the extent of the city covered by these measures. The system can be tested with varying rainfall intensities and durations, and runoff can be measured from the model.

The city model is capable of demonstrating and visualizing multiple challenges related to stormwater management in urban areas. Results from experiments conducted with the model show that green roofs can delay the peak runoff intensity by slowing down and retaining runoff at the beginning of rainfall events. Furthermore, permeable surfaces contribute to reducing the maximum runoff intensity and the total runoff volume. One purpose of the model city is to serve as an educational tool to enhance competency and convey concepts and challenges associated with urban stormwater management in a more engaging and practical manner.



---

## Innhold

<b>FORORD</b> .....	<b>I</b>
<b>SAMMENDRAG</b> .....	<b>II</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>III</b>
<b>INNHold</b> .....	<b>V</b>
<b>FIGURER</b> .....	<b>VII</b>
<b>TABELLER</b> .....	<b>VIII</b>
<b>1 INTRODUKSJON</b> .....	<b>1</b>
1.1 MOTIVASJON OG MÅL .....	1
1.2 FORUTSETNINGER OG BEGRENSENINGER.....	2
<b>2 BAKGRUNN</b> .....	<b>3</b>
2.1 UTFORDRINGER KNYTTET TIL OVERVANNSHÅNDTERING I URBANE OMRÅDER .....	3
2.2 SKALERINGSEFFEKTER.....	5
2.2.1 <i>Reynoldstallet</i> .....	5
2.2.2 <i>Overflatespenning</i> .....	6
2.2.3 <i>Tidsskala</i> .....	6
2.3 MODELLBASERT UNDERVISNING.....	7
<b>3 METODE: DESIGN AV MODELLBY</b> .....	<b>7</b>
3.1 ØNSKEDE SPESIFIKASJONER .....	8
3.2 OPPBYGNING AV MODELLBY .....	9
3.2.1 <i>Rørsystemet med tilhørende innløp</i> .....	10
3.2.2 <i>Rørsystemet med løsmasser</i> .....	10
3.2.3 <i>Gatenettverket med sluk</i> .....	11
3.2.4 <i>Terrengoverflater</i> .....	11
3.2.5 <i>Bygninger uten tiltak med avkast av regnvann til terrenget</i> .....	12
3.2.6 <i>Transformasjon til blågrønn by</i> .....	12
3.3 NEDBØR-SIMULATOR .....	13
3.3.1 <i>RPM vs. Nedbør</i> .....	14
3.4 KONSEPT FOR DESIGN AV MODELLBY.....	14
<b>4 RESULTATER OG DISKUSJON</b> .....	<b>18</b>
4.1 PRESENTASJON AV MODELLBYEN.....	18
4.1.1 <i>Moduler i PVC-materiale</i> .....	18
4.1.2 <i>Gatenettet og avløpssystemet</i> .....	20
4.1.3 <i>Grønne tak</i> .....	22
4.1.4 <i>Bygninger med traktesystem og arealer for tiltak eller impermeabel flate</i> .....	23
4.2 HYDRAULISK TESTING AV MODELLBY.....	24
4.3 ANALYSE AV HYDROGRAMMER .....	24
4.3.1 <i>Innledende forsøk</i> .....	25
4.3.2 <i>Grønne tiltaks effekt på hydrogrammer «<math>t_r = 5</math> min»</i> .....	27
4.3.3 <i>Grønne tiltaks effekt på hydrogrammer «<math>t_r = 1</math> min»</i> .....	28
4.4 DISKUSJON.....	30
4.4.1 <i>Modellens evne til å formidle utfordringer knyttet til overvannsproblemtekk</i> .....	30
4.4.2 <i>De ønskede spesifikasjonene fra delkapittel 3.1</i> .....	32
4.4.3 <i>Helhetlig vurdering</i> .....	33
<b>5 KONKLUSJON</b> .....	<b>36</b>

---

<b>6 REFERANSER .....</b>	<b>38</b>
<b>VEDLEGG A: SJABLONGVERDIER BENYTTET I OPPGAVEN.....</b>	<b>39</b>
<b>VEDLEGG B: DETALJBILDER AV BYGG OG TRAKTESYSTEM.....</b>	<b>40</b>



---

## Figurer

Figur 1: Illustrasjon av modulene med rørsystemet. ....	10
Figur 2: Illustrasjon av modulene med rørsystemet og løsmasser. ....	10
Figur 3: Illustrasjon av gatenettverket med sluk. ....	11
Figur 4: Illustrasjon av hvordan grønne tiltak som plener eller regnbed kan fremstilles i modellbyen. ....	11
Figur 5: Illustrasjon av hvordan impermeable flater kan fremstilles i modellbyen. ....	12
Figur 6: Illustrasjon av bymodellen uten tiltak. ....	12
Figur 7: Illustrasjon av bymodellen med tiltak. ....	13
Figur 8: Nedbørsimulatoren til venstre og pumpen som forsyner systemet med vann til høyre. .	13
Figur 9: Sammenhengen mellom pumpehastighet og nedbørintensitet. ....	14
Figur 10: Bilde av 3D printerene som er benyttet. ....	15
Figur 11: Bilde av de ulike modulene som byen er bygd opp av. ....	15
Figur 12: Svampene før og etter de ble malt med akrylmaling. ....	17
Figur 13: Illustrasjon av ferdig modellby i SketchUp (øverst). Fysisk modellby slik den ble seende ut med tiltak (venstre) og slik den ble seende ut uten tiltak (høyre). ....	18
Figur 14: Firkant-PVC rørene. Til venstre klare for kutting og til høyre er gatemodulene ferdigstilt og klare for montering av rør og 3D-printet gateoverflate. ....	19
Figur 15: Oppe til venstre er rørsystemet montert inni firkant-PVC røret. Modul for gatekryss. Nede til venstre er modul for rett gate. Til høyre ser en hvordan modulene er festet til hverandre. ....	19
Figur 16: Bilde av avløpssystemet (venstre) og det tilhørende gatenettverket (høyre). ....	20
Figur 17: Skjøten og PP-røret. ....	20
Figur 18: Nærbilde av rørsystemet for å tydeliggjøre hvordan vannet transporteres fra en modul til neste. ....	21
Figur 19: Omtrentlig bredde av en tilfeldig gate i Oslo. Gaten er Kirkegårdsgata og utklippet er hentet fra Scalgo Live. (Scalgo Live, 2023). ....	22
Figur 20: Byggene og flaten plassert sett i forhold til gate (venstre). Byggene og flaten med og uten tiltak (høyre). ....	23
Figur 21: Målte verdier av akkumulert avrenningsvolum for tre forsøk over tid (venstre) og modellert og observert akkumulert avrenningsvolum for et enkelt forsøk (høyre). Det er antatt at vannets densitet er 1g/ml. ....	25
Figur 22: Bilder fra byen etter "full" tetting med gaffateip. ....	25
Figur 23: Grafen viser avrenningsforløpet over tid fra de ulike forsøkene. ....	28
Figur 24: Akkumulert vannvolum over tid fra avløpssystemet i modellbyen. ....	28
Figur 25: Avrenningshydrogrammene produsert av de ulike forsøkene A-F. Prosentene til høyre er andelen av den totale byoverflaten som har tiltak. ....	29
Figur 26: Akkumulert vannvolum fra avløpssystemet produsert av de ulike forsøkene A-F. Prosentene til høyre er andelen av den totale byoverflaten som har tiltak. ....	30
Figur 27: Figuren er hentet fra artikkelen "Grønne tak for flomdemping". ....	31
Figur 28: Modellbyen modellert i SWMM. Hver lille firkant representerer en modul. Det er mulig å teste med ulike nedbørvarigheter og intensiteter og variere på egenskapene til hvert delfelt (de mindre firkantene) og hvordan de samspiller med avløpsnett. ....	35
Figur 29: Avrenningshydrogram fra manuelt kalibrert SWMM-modell sammenliknet med en situasjon i modellbyen uten tiltak. ....	36

---

## Tabeller

Tabell 1: Oppsummering av de ønskede spesifikasjonene og begrunnelse for dem.....	8
Tabell 2: Beskrivelse av moduler.....	16
Tabell 3: Oppsummering av resultater fra de innledende forsøkene. ....	26
Tabell 4: Oppsummering av resultater fra forsøket med nedbørvarighet på ett minutt. ID: A-F refererer til de ulike forsøkene. ....	29

---

# 1 Introduksjon

## 1.1 Motivasjon og mål

Håndtering av overvann i urbane områder gir stadig større utfordringer som følge av byutvikling og klimaendringer (Lindholm, 2008). Den økende urbaniseringen fører til en stadig større andel av impermeable flater, noe som gjør det vanskelig for regnvann å renne av og bli absorbert av bakken. Klimaendringene har også ført til hyppigere og mer intense regnskyll (Hanssen-Bauer et al., 2015), noe som har økt risikoen for oversvømmelser og vannforurensning i urbane områder. For å møte disse utfordringene kreves en holistisk tilnærming til urban overvannshåndtering for at involverte parter får et økt kunnskapsgrunnlag de kan basere beslutninger på.

God urban overvannshåndtering krever en helhetlig tilnærming som tar hensyn til både tekniske, økologiske og sosiale faktorer. Overvannshåndtering berøres av flere aktører, eksempelvis samferdsel, byplanlegging, vann og avløp, arealplanlegging, geoteknikk, økologi, landskapsarkitektur, forsikringsselskaper, statlige og kommunale mfl. Sett i dette lyset er det tydelig at tverrfaglighet er nødvendig ved håndtering av overvann og en forutsetning for tverrfaglig samarbeid er en felles forståelse av grunnleggende begreper innenfor overvannshåndteringsfaget, samt kunnskap om de forhold som virker inn på overvannsproblematikken.

*Overvann berører mange sektorer og aktører, alt fra privatpersoner, kommunal og statlig virksomhet, utbyggere og næringsliv, til forsikringsselskaper. Behovet for å samordne overvanns- og vassdragstiltak innenfor de enkelte nedbørfeltene, gjør at alle involverte må samarbeide på tvers av forvaltningsnivåer, myndighets- og ansvarsområder. Planlegging og gjennomføring av tiltak må rettes mot både ny og eksisterende bebyggelse, infrastruktur og anlegg. Mangelen på samordnede mål og rammebetingelser gjør det vanskelig å bli enige om felles planlegging, etablering, drift og vedlikehold av overvannstiltak (Stenersen et al., 2015).*

De fleste fagressursene som innvirker på overvannshåndteringen har ingen eller lite formell kompetanse innen overvann. «Norsk Vann rapport B26 – Kunnskapsbehov innen overvann og klimatilpasning» konkluderer med at «Bransjen erfarer betydelig kunnskapsbehov knyttet til overvann og klimatilpasning.» og at «eksisterende kunnskap er fragmentert og i liten grad dekker de identifiserte kunnskapsbehovene» (Paus, 2020).

Det er dermed et behov for å kommunisere kunnskap om overvannsfaget til de uten f. eks teknisk kompetanse. Eksempler på forhold som kan være vanskelig å forstå uten formell kompetanse er samvirkning av ledningsnett, overflatestrømning og infiltrasjon, effekter av initialbetingelser for overflateavrenning, effekter av tiltak – enkeltvis og sammensatt mfl. Tradisjonell

---

kompetanseheving består f. eks av kursing, seminarer, case-studier og regneøvelser. Et spennende og lite utprøvd alternativ til dette er å oppnå kunnskap og forståelse gjennom en fysisk overvannsmodell.

En fysisk overvannsmodell kan gi flere pedagogiske fortrinn. Først og fremst gir det en konkret og visuell måte å presentere og demonstrere hvordan overvann håndteres i ulike situasjoner, og hvordan ulike tiltak påvirker overvannsstrømmen. Dette kan hjelpe relevante fagpersoner å forstå urbanhydrologiske prinsipper og konsepter på en mer intuitiv og engasjerende måte. I tillegg kan det bidra til bedre kommunikasjon og samarbeid mellom ulike aktører som jobber med overvannshåndtering.

I litteraturen finnes flere forsøk på syntetisk nedbør fra nedbør-simulatorer. Eksempelvis ble det bygget en nedbørsimulator i forbindelse med en masteroppgave på NMBU i 2020 (Rasen & Lilletvedt, 2020). Det ble også utviklet en nedbørsimulator hvor hensikten var å utforske prosesser knyttet til erosjon, infiltrasjon og avrenning, (N. P. Thomas & Samir A. El Swaify, 1989) og en simulator som kunne variere intensitet, dråpestørrelse og dråpehastighet (Grierson & Oades, 1977). Ingen av de nevnte studiene har imidlertid plassert en fysisk modellby i en nedbørsimulator, og det har heller ikke blitt funnet noen tilsvarende studier gjennom litteratursøk.

Det overordnede målet med masteroppgaven er **å utvikle, bygge, og teste en fysisk modell som er egnet til å heve kunnskapen om de utfordringer og muligheter vi har innen håndtering av overvann i urbane områder**. For å nå målet er følgende delmål definert:

1. Definere ønskede spesifikasjoner for modellen, samt hvilke utfordringer knyttet til urban overvannshåndtering modellen skal kunne formidle.
2. Bygge modell og utføre testing av utvalgte variabler
3. Vurdere i hvilken grad modellen tilfredsstiller ønskede spesifikasjoner og egnethet ift. å formidle relevante situasjoner.

## **1.2 Forutsetninger og begrensinger**

I begynnelsen av utviklingsprosessen var ambisjonen at alle komponentene, fra bygninger til gater og rørsystem i bymodellen skulle 3D-printes. For at prosjektet skulle bli ferdigstilt og relevante tester gjennomført innenfor den gitte tidsrammen er mer tidsbesparende løsninger valgt. En enkel gatemodul med maksimal høyde på 2 cm og grunnflate på 20 cm \* 20 cm tar opp mot 19 timer å 3D-printe. En forutsetning for prosjektet har vært å finne alternative løsninger til de komponentene i modellbyen hvor 3D-printing ikke er egnet. Modellbyens komponenter vil bli gjort rede for i

---

delkapittel 3.3. Videre presiseres det at det ikke har vært et formål å lage en modell som beskriver hydrologi og hydraulikk i virkelige systemer på en korrekt måte når det eksempelvis gjelder strømningsforhold som turbulent/laminær strømning etc.

## **2 Bakgrunn**

### **2.1 utfordringer knyttet til overvannshåndtering i urbane områder**

Klimaendringer har ført til økte utfordringer knyttet til urban overvannshåndtering over hele verden. Økende intensitet og hyppighet av nedbør har resultert i økt fare for flom i byområder. Dette skyldes delvis urbanisering og manglende tilpasning av infrastruktur til de endrede klimatiske forholdene (Stenersen et al., 2015).

En av de største utfordringene er knyttet til byenes dreneringssystemer. Tradisjonelt er disse systemene designet for å lede regnvann bort fra byområder så raskt som mulig gjennom rør og avløpssystemer. Imidlertid kan kraftige nedbørshendelser overbelaste disse systemene, noe som fører til tilbakeslag og oversvømmelser. Dette kan forårsake store skader på infrastruktur, eiendommer og menneskers liv og helse. Videre kan dette også føre til forringet vannkvalitet i vassdrag som følge av overløpsdrift og overvannsforurensing fra ulike kilder som f.eks. biltrafikk, industri og husholdninger (Miljødirektoratet, 2023).

En annen utfordring er den økende andelen av impermeable overflater i byområder. Urbanisering medfører bygging av veier, parkeringsplasser og bygninger som erstatter naturlige absorberende områder som jord og vegetasjon. Dette fører til at regnvann ikke kan infiltrere i bakken og i stedet strømmer over overflaten og overbelaster dreneringssystemene.

Klimaendringene fører også til økt usikkerhet knyttet til nedbørsmønstre. Det blir vanskeligere å forutsi når, hvor og mengden nedbør som vil falle. Dette gjør det utfordrende for byplanleggere og ingeniører å dimensjonere dreneringssystemer og infrastruktur til å håndtere klimavariasjonene. Frosne sluk og rør, endrede avrenningsegenskaper om vinteren, samt mangel på gode flomveier på overflaten vil også ha en innvirkning på overvannshåndteringen.

Videre kan iverksetting av overvannstiltak og tildeling av arealer for slike tiltak møte flere utfordringer knyttet til kostnader. Her er noen vanlige utfordringer:

1. Finansielle begrensninger: Implementering av overvannstiltak kan være kostbart, spesielt i tilfeller der store infrastrukturprosjekter er nødvendige. Kommuner og myndigheter kan

---

stå overfor begrensede budsjetter og ressurser som kan hindre dem i å gjennomføre tilstrekkelige tiltak. Finansiering kan være en utfordring, og det kan være behov for å finne alternative finansieringskilder eller utvikle innovative finansieringsmodeller (Stenersen et al., 2015).

2. Eiendomsrett og arealbegrensninger: Implementering av overvannstiltak kan kreve bruk av land og eiendommer. Dette kan støte på utfordringer knyttet til eiendomsrett og arealbruk, spesielt i allerede utviklede og tett befolkede områder (Stenersen et al., 2015). Å finne tilstrekkelig tilgjengelige områder og håndtere konflikter med eksisterende eiendomsrett kan være en utfordring.
3. Komplekse beslutningsprosesser: Tildeling av arealer for overvannstiltak og implementering av tiltak krever ofte samarbeid mellom forskjellige interessenter, inkludert lokale myndigheter, utbyggere, private grunneiere og beboere. Beslutningsprosessen kan være kompleks og involvere ulike perspektiver og interesser. Det kan være behov for koordinering, samarbeid og forhandlinger for å oppnå enighet om implementering av tiltak (Stenersen et al., 2015).
4. Teknisk kunnskap og kompetanse: Implementering av overvannstiltak krever teknisk ekspertise og kunnskap om hydrologi, dreneringssystemer, ingeniørmessige løsninger og grønn infrastruktur. Mangelen på tilstrekkelig kompetanse og kapasitet blant beslutningstakere, planleggere, ingeniører, utførende og driftspersonell kan være en utfordring for effektiv implementering av tiltak (Paus, 2020).

For å håndtere disse utfordringene er det nødvendig med en helhetlig og bærekraftig tilnærming til urban overvannshåndtering. Dette innebærer implementering av grønne løsninger som fordrøyningsområder, regnbed, grønne tak og permeable overflater for å hjelpe til med å gjenopprette den naturlige vannsyklusen i byområdene. Det krever også oppgradering av eksisterende dreneringssystemer og utvikling av mer fleksible og robuste infrastruktur-løsninger som kan tilpasses endrede klimaforhold.

Samtidig er det viktig å øke bevisstheten blant befolkningen om betydningen av riktig overvannshåndtering og hvordan enkeltpersoner kan bidra. Dette kan inkludere tiltak som å

---

redusere flomrisikoen ved å begrense nedbørintensiteten gjennom vegetasjonsdekke, innføre regnvannshøsting for gjenbruk og praktisere bevisst vannbruk og avløp.

## 2.2 Skaleringseffekter

Når en bygger en fysisk hydrologisk/hydraulisk modell av et virkelig område, vil det normalt forekomme såkalte skaleringseffekter. Slike skaleringseffekter vil normalt øke jo større skaleringen er. I litteraturen er det eksempler på å beregne dimensjonsløse størrelser som Froudes tall og Reynolds tall for virkelig situasjon, og dermed utarbeide en modell der verdiene for størrelsene opprettholdes (Elger et al., 2016). Bymodellen som er utviklet i denne oppgaven har derimot ikke som hensikt å representere hydrologi og hydraulikk på et slikt nivå, og den store skaleringen medfører derfor flere betydningsfulle skaleringseffekter. For eksempel er rent fysiske størrelser i modellen som høyde på bygninger i forhold til gateplanet, samt diameter på sluk og rørsystem i forhold til resten av byen. En annen relevant størrelse som ikke er bevart er størrelsen på regndråpene i forhold til størrelsen på byen. Etersom regndråpene er av normal størrelse i forhold til virkeligheten vil de fremstå som spesielt store i forhold til bymodellen. Det er antatt at bymodellen fremdeles vil kunne etterlikne forhold i virkeligheten på en pedagogisk måte og fortsatt vil kunne illustrere utfordringer knyttet til overvann i urbane områder.

Hvis man ser på de fluiddynamiske egenskapene til bymodellen er det verdt å trekke frem reynoldstallet og overflatespenningen mellom vannet og overflatene i modellen, samt tidsskalaer.

### 2.2.1 Reynoldstallet

Reynoldstallet er en dimensjonsløs verdi i fluiddynamikken og gir informasjon om strømmingen er turbulent eller laminær. For rørstrømning er Reynoldstallet definert slik:

$$Re = \frac{VL}{\nu}$$

Hvor

$V$  = typisk hastighet (=  $Q/A$ ), [m/s]

$L$  = typisk lengde (for rørstrømning er dette diameteren til røret), [m]

$\nu$  = kinematisk viskositet, [ $m^2/s$ ]

Dette gjelder kun når rørsystemet er fylt til randen og strømmer igjennom. I denne modellen vil mange situasjoner oppstå hvor røret er delvis fylt og da behandles rørsystemet som en åpen kanal og det tilhørende Reynoldstallet blir definert slik:

---

$$Re = \frac{VR_h}{\nu}$$

Hvor

$R_h$  = hydraulisk radius, [m]

I denne modellen kan det forventes at strømmingen i all hovedsak er laminær da modellen har relativt sett liten lengde (med rørets diameter) eller liten hydraulisk radius, og lav typisk hastighet.

### **2.2.2 Overflatespenning**

Overflatespenningen til vann kan variere avhengig av skalaen på overflaten som blir vurdert. På en liten skala, som for eksempel på overflaten av en dråpe vann, er overflatespenningen høyere enn på en større skala, som ved overflaten av en innsjø eller hav. Dette skyldes at på en mindre skala vil molekylene på overflaten oppleve større påvirkning fra de underliggende molekylene og dermed vil være tettere pakket sammen. Dette fører til en økt overflatespenning.

På en større skala vil imidlertid vekten av vannet og andre krefter som påvirker overflaten, som for eksempel vind, bølger og strømmer, bidra til å bryte ned overflatespenningen og spre ut vannet på overflaten. Dette gjør at overflatespenningen på større skala er lavere enn på mindre skala.

Det er også verdt å merke seg at overflatespenningen til vann kan variere med ulike faktorer, som for eksempel temperatur, tilsetning av stoffer og pH-verdi. Generelt sett vil imidlertid vanns overflatespenning være høyere på mindre skala og lavere på større skala.

### **2.2.3 Tidsskala**

Tidsskalaer som tiden det tar før vi oppnår en stasjonær situasjon, altså ved det tidspunktet vannet forlater systemet like fort som det entrer systemet vil med en liten modell skje tidligere enn ved f.eks. et nedbørfelt i virkeligheten.

I NVE sin veileder for flomberegninger i små uregulerte felt er konsentrasjonstiden til et nedbørfelt definert slik: *Konsentrasjonstiden til et felt er den tid det tar for vannet å bevege seg gjennom dreneringssystemet fra de fjerneste delene av feltet til utløpet* (Stenius et al., 2015).

Videre vil konsentrasjonstiden for bymodellens nedbørfelt på  $2\text{m}^2$  være lavere enn hva vi kan forvente i virkeligheten. Konsentrasjonstid i nedbørfelt kan beregnes ved hjelp av flere forskjellige formler, avhengig av hvilken tilnærming som brukes og hvilken grad av nøyaktighet som kreves. Konsentrasjonstiden for et felt øker når det lengste hovedrennet i feltet øker.



---

Det er viktig å merke seg at konsentrasjonstid er en forenklet tilnærming til å forutsi avrenning fra et nedbørfelt, og at resultatene av disse formlene kan være avhengig av mange faktorer, inkludert topografi, jordtype, vegetasjon og klimaforhold. Derfor er det viktig å bruke forsiktighet når man benytter disse formlene, og ta hensyn til lokale forhold.

### **2.3 Modellbasert undervisning**

En fysisk modell for undervisning kan ha flere pedagogiske fortrinn. Modellbyen, plassert i nedbørsmodellen, vil blant annet tillate de som benytter den å bli våte på hendene, høre nedbøren, endre overflater og visuelt se effekten av tiltak.

Ved å aktivere flere sanser som berøring, hørsel og syn, kan vi også gjøre læringen mer engasjerende og interessant. Det å kunne samles rundt en fysisk modell kan gjøre det lettere å diskutere og ha samtaler rundt relevante temaene som urban overvannshåndtering og -tiltak. Dette kan øke motivasjonen for å lære og bidra til å opprettholde fokus og oppmerksomhet gjennom hele læringssesjonen.

Ved en slik tilnærming kan det å aktivere flere sanser bidra til å forbedre læringen og gjøre det lettere å huske og forstå ny kunnskap.

De pedagogiske fordelene ved en slik tilnærming er også godt dokumentert; Shams & Seitz (2008) fremmer undervisningsmetoder hvor flere sanser blir stimulert. De antyder at ensidige tilnærminger er mindre effektive og at valget av disse er basert på at slike tilnærminger ofte er praktisk lettere å gjennomføre fremfor det pedagogiske utbyttet.

Det er også individuelle forskjeller for hvordan mennesker lærer best, og modellbyen i tandem med en digital tvilling i SWMM (*Storm Water Management Model*) (EPA - United States Environmental Protection Agency, 2023) kan bidra til å spille på flere tilnærminger til læring, samt at man kan se sammenhengen mellom det som skjer fysisk i modellen og det som skjer i en virtuell simulering. Videre så kan kunnskap om VA-faget og overvannsfaget være vanskelig å kommunisere da VA-transportsystemet ligger under bakken og store regnskyll med høyt gjentakintervall skjer sjeldent. Modellbyen kan gjøre slik kunnskap mer tilgjengelig ettersom man kan styre nedbørintensiteten og samtidig se hvordan avrenning på overflaten samspiller med transportsystemet.

## **3 Metode: Design av modellby**

Som nevnt i introduksjonen er hovedmålet med denne masteroppgaven å utvikle, bygge, og teste en fysisk modell som er egnet for formidling av urban overvannshåndtering. I denne delen av

oppgaven vil det bli gitt en beskrivelse av metodene som er brukt i utviklingen av modellbyen, inkludert ønskede spesifikasjoner for modellbyen, og valg av tekniske løsninger og materialer.

### 3.1 Ønskede spesifikasjoner

I tabell 1 er det listet flere spesifikasjoner det er ønskelig at modellen oppfyller og en begrunnelse for disse.

Tabell 1: Oppsummering av de ønskede spesifikasjonene og begrunnelse for dem.

Ønskede spesifikasjoner	Begrunnelse
Modellen skal fremstå realistisk og gi brukeren en umiddelbar opplevelse av at det er en by.	Det er viktig at modellen fremstår realistisk og gir brukeren en umiddelbar opplevelse av at det er en by, fordi det gir en bedre visuell opplevelse og øker interessen og forståelsen for modellen. En realistisk modell kan også bidra til å formidle konsepter og ideer om urban overvannshåndtering på en mer tilgjengelig måte.
Modellen skal ha høy brukervennlighet.	Modellen bør ha høy brukervennlighet fordi det gjør det enklere for brukeren å utforske og forstå modellen. Det kan øke brukerens opplevelse og interesse for modellen, og bidra til å formidle konsepter og ideer på en mer forståelig måte. Høy brukervennlighet kan også bidra til å gjøre modellen mer tilgjengelig for et bredere publikum, inkludert personer som ikke har teknisk ekspertise eller kunnskap om urban overvannshåndtering
For- og etterarbeid ved simulering skal ikke ta betydelig tid.	Det er viktig at for- og etterarbeid ved simulering ikke tar betydelig tid fordi det vil bidra til å øke effektiviteten og produktiviteten til brukeren. Dersom det blir for tidkrevende å utføre simuleringer kan dette redusere antallet simuleringer som kan utføres i løpet av en undervisningsøkt.
Modellen skal være robust og tåle både vann og en viss mekanisk påkjenning.	En robust modell vil ikke bli ødelagt eller skadet av jevnt bruk eller uforutsette

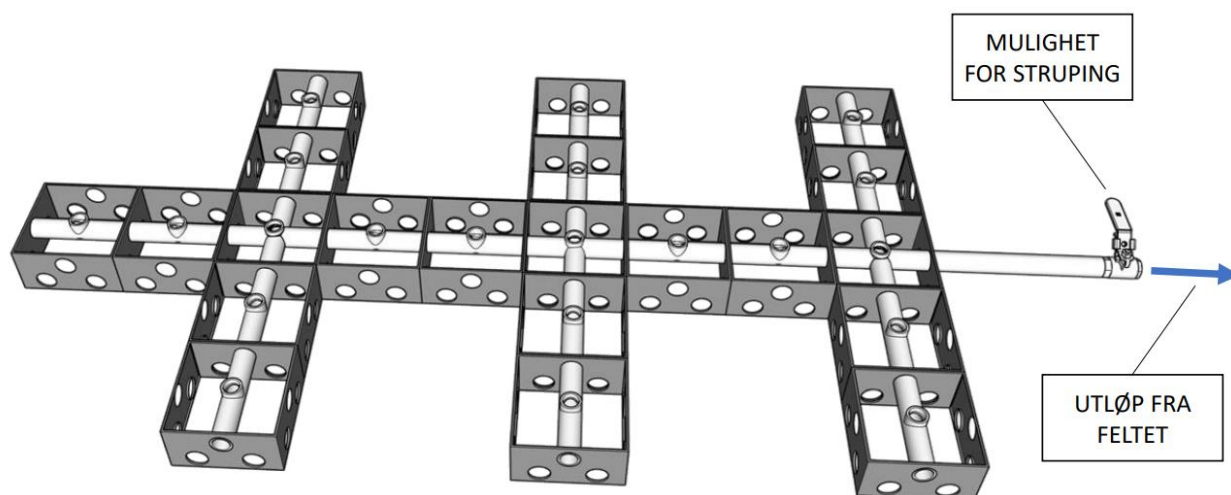
	hendelser, noe som kan øke levetiden til modellen og redusere kostnader for vedlikehold og reparasjoner. Det er viktig at modellen tåler vann ettersom den skal jevnlig bli utsatt for nedbør.
Lav driftskostnad.	Når bymodellen er ferdig produsert er det viktig at den er billig i drift.
Stor fleksibilitet.	Det er viktig at modellen har stor fleksibilitet fordi det gir brukerne muligheten til å tilpasse modellen til deres egne behov og ønsker. Fleksibilitet gir brukerne muligheten til å eksperimentere med ulike scenarier og simuleringer, noe som kan bidra til å øke kunnskapen om urban overvannshåndtering
Overføringsverdi til virkeligheten (forventer at grønne anlegg påvirker avrenningshydrografen).	Hensikten med bymodellen er å gi brukerne en økt forståelse for urban overvannshåndtering og hvordan grønne tiltak virker. Det er derfor viktig at modellen med de tiltakene som blir utprøvd er i stand til å reflektere hvordan de samme tiltakene i den virkelige verden fungerer.
Skaleringseffekter ikke påvirker de mest vesentlige funksjonene.	Dette er igjen viktig med tanke på overføringsverdi til virkeligheten og at i det store og det hele vil være intuitivt hvordan modellen fungerer og man kan trekke paralleller til virkeligheten uten å måtte legge for mye godvilje til.
Pedagogisk komponent	Hensikten med bymodellen er at den skal være i stand til å formidle konsepter knyttet til håndtering av overvann i urbane områder på en måte som stimulerer bruk av flere sanser.

### 3.2 Oppbygning av modellby

Alle illustrasjonene i dette delkapittelet er produsert i SketchUp (Trimble Inc., 2023).

### 3.2.1 Rørsystemet med tilhørende innløp

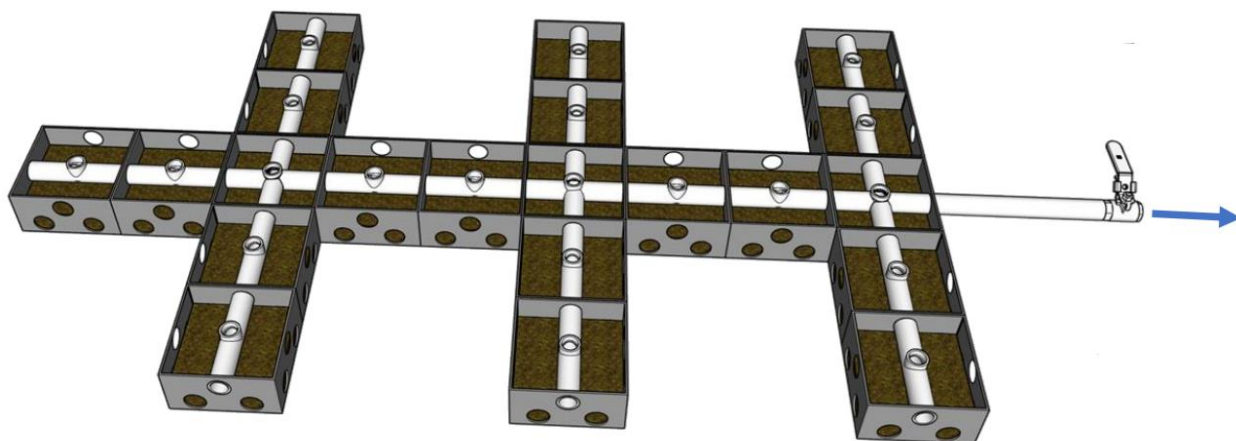
Rørsystemet består av PP-rør med indre diameter på 36 mm og ytre diameter 40 mm. De er koblet sammen med en 3D-printet komponent (sluk) som skal lede vannet ned til rørsystemet fra gatene og byggene. Hver modul er koblet sammen til neste med en overgang slik at rørsystemet i seg selv blir bortimot lekkasjefritt. Hver modul/boks som blir benyttet i gatenettet hvor rørsystemet befinner seg under, er kappet til en høyde på 10 cm og det er drilllet hull slik at rørsystemet får plass og er i stand til å lede vannet til neste modul.



Figur 1: Illustrasjon av modulene med rørsystemet.

### 3.2.2 Rørsystemet med løsmasser

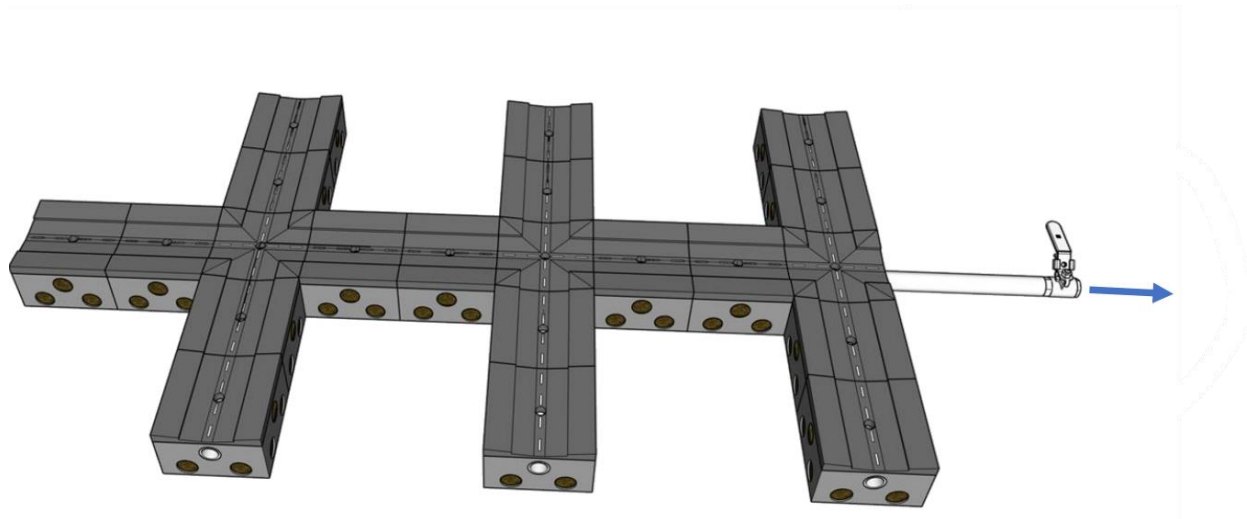
Under rørsystemet finner vi løsmassene (svampene). Hver modul er kuttet til nederst slik at vannet som blir fanget opp av løsmassene har muligheten til å renne videre til neste. Hvor mye vann som eventuelt blir videreført til neste er avhengig av initialbetingelsene til hver svamp.



Figur 2: Illustrasjon av modulene med rørsystemet og løsmasser.

### 3.2.3 Gatenettverket med sluk

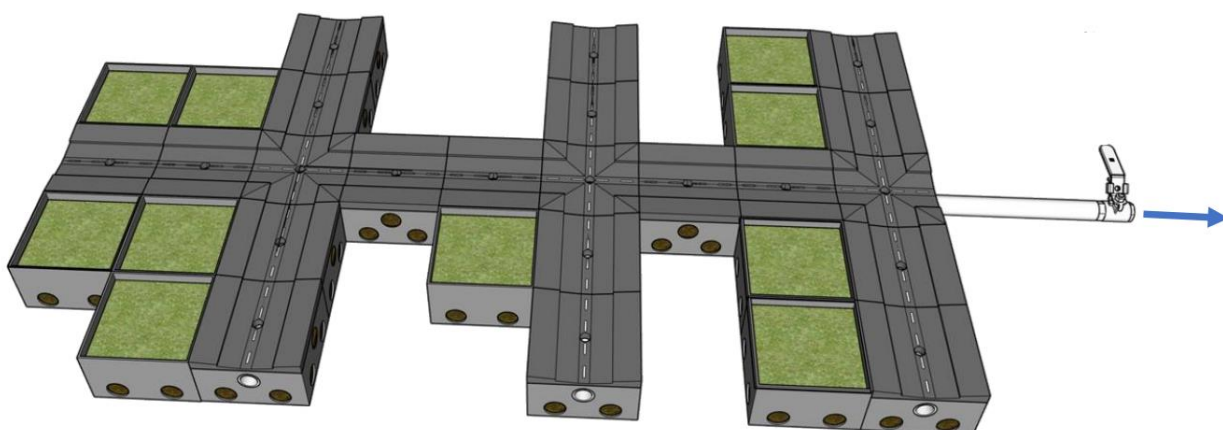
Gatemodulene er bestående av rette gater og gatekryss, og hver gatemodul har ett tilhørende sluk i midten. Gatemodulene er plassert på modulene beskrevet i delkapittelet ovenfor, slik figur 3 nedenfor viser.



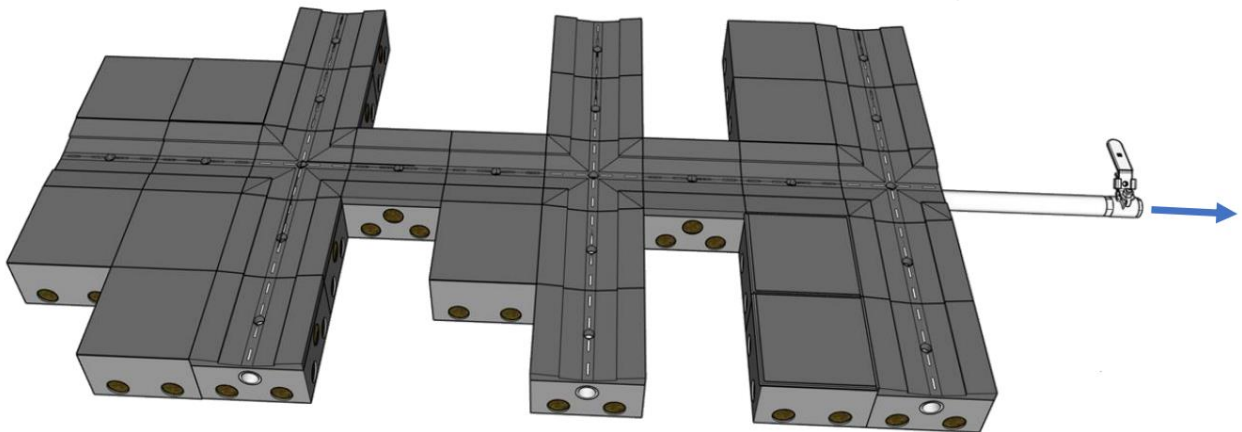
Figur 3: Illustrasjon av gatenettverket med sluk.

### 3.2.4 Terrengoverflater

Flere av modulene kan tilpasses som enten grønne tiltak eller impermeable flater som figur 4 og 5 viser. I virkeligheten kunne dette for eksempel vært grøntområder som gressplener og regnbed eller parkeringsplasser. De grønne tiltakene består av svamper mens de impermeable flatene er laget av PVC (Polyvinylklorid).



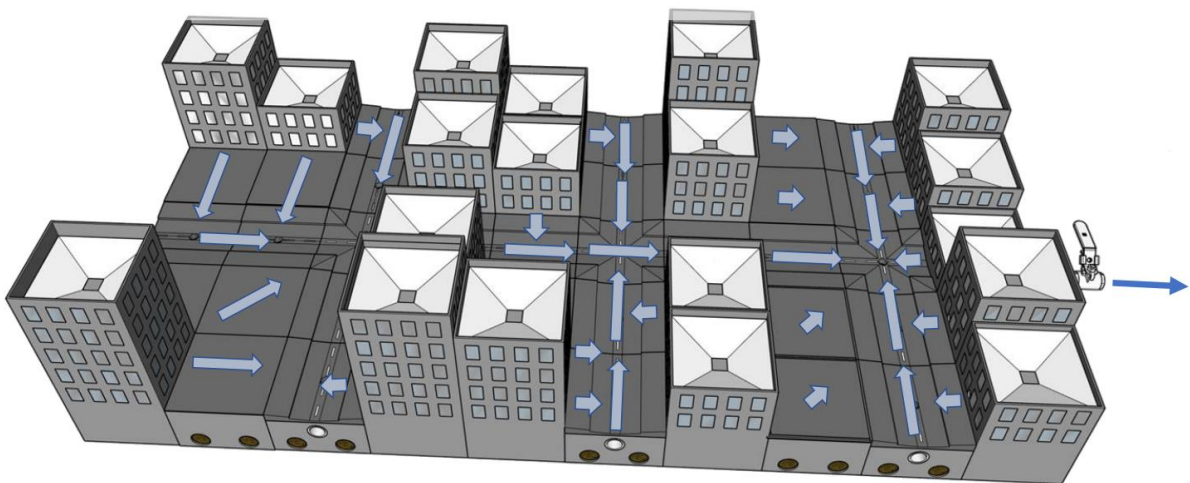
Figur 4: Illustrasjon av hvordan grønne tiltak som plener eller regnbed kan fremstilles i modellbyen.



Figur 5: Illustrasjon av hvordan impermeable flater kan fremstilles i modellbyen.

### 3.2.5 Bygninger uten tiltak med avkast av regnvann til terrenget

Figuren nedenfor er en illustrasjon av hvordan bymodellen kan se ut uten tiltak. I et slikt scenario er det ingen grønne tiltak som kan infiltrere og fordrøye nedbøren. Alt vannet vil bli ledet ut på terrenget og enten forsvinne ned i løsmasser der glipene blir for store eller bli ført ned i slukene og gjennom rørsystemet. Dersom nedbørhendelsen blir for stor og utløpet strupes, kan kapasiteten til transportsystemet sprenges og vannet vil renne av langs gatene før det møter de nederste byggene i modellen. Pilene i figur 6 illustrerer vannets vei gjennom modellen.



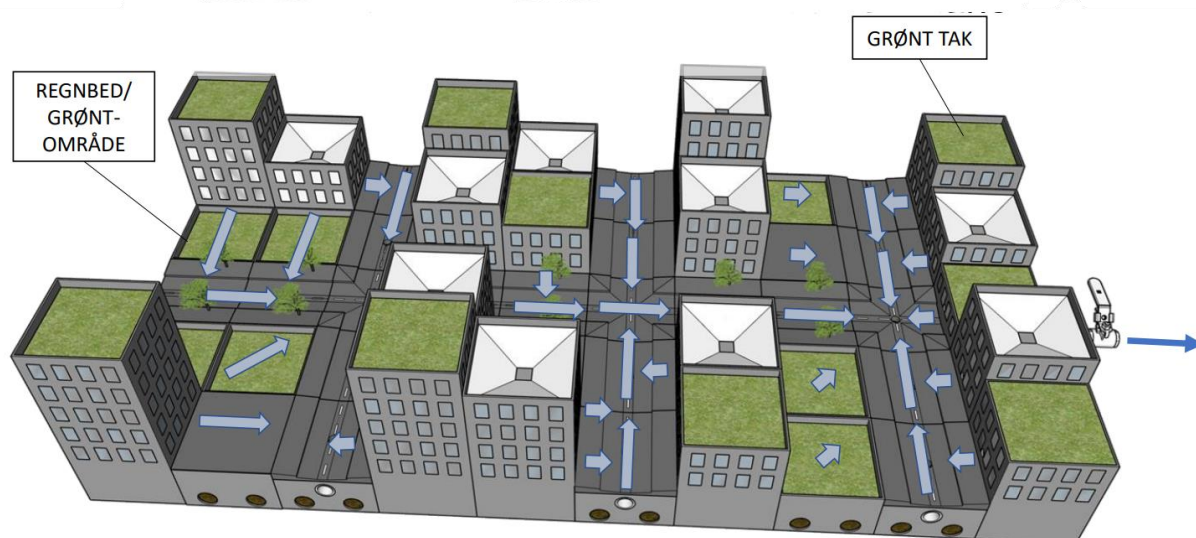
Figur 6: Illustrasjon av bymodellen uten tiltak.

### 3.2.6 Transformasjon til blågrønn by

Figuren nedenfor er en illustrasjon av hvordan byen kan se ut hvor regnbed/grøntområder og grønne tak er etablert rundt omkring i modellbyen. En by med blågrønne tiltak har en mer bærekraftig infrastruktur sammenlignet med en by uten slike tiltak. Blågrønne tiltak bidrar til å redusere belastningen på byens avløpssystemer, da de gir en naturlig måte å håndtere regnvannet



på. Dette kan redusere risikoen for oversvømmelser og flom, som er problemer som kan oppstå i tettbygde områder. Vedlegg B har detaljbilder av bygninger med traktesystemet.



Figur 7: Illustrasjon av bymodellen med tiltak.

### 3.3 Nedbør-simulator

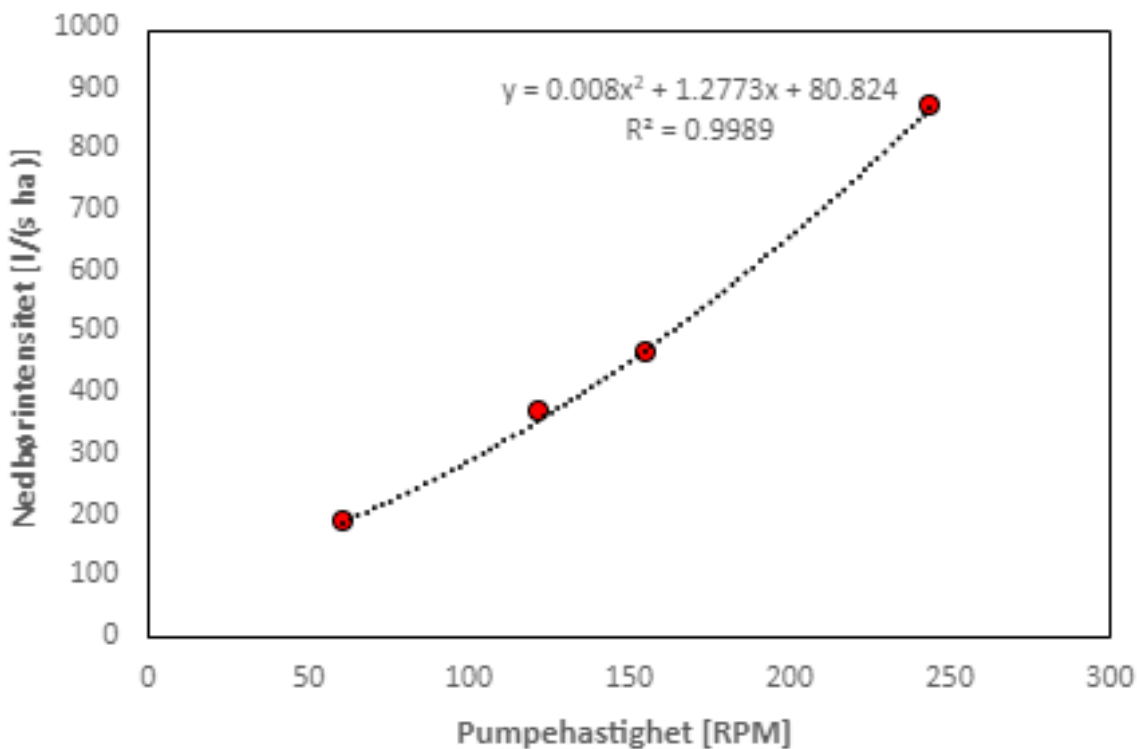
For å teste modellbyen benyttes nedbørsimulatoren utviklet av Mariann Hellne Rasen og Marianne Lilletvedt i forbindelse med deres masterarbeid på NMBU (Rasen & Lilletvedt, 2020). Simulatoren har en grunnflate som er i overkant av  $2 \text{ m}^2$  ( $2 \text{ m} * 1 \text{ m}$ ). Grunnflaten er justerbar slik at helningen på systemet kan endres etter ønske. Nedbøren blir uniformt fordelt på flaten gjennom et fordelingsystem og intensiteten på nedbøren reguleres av en pumpe som er koblet til systemet.



Figur 8: Nedbørsimulatoren til venstre og pumpen som forsyner systemet med vann til høyre.

### 3.3.1 RPM vs. Nedbør

For å kartlegge hva slags nedbørintensitet pumpehastigheten (RPM – revolutions per minute) til pumpen svarer til, ble det gjennomført et forsøk. For å etablere denne sammenhengen ble det tatt utgangspunkt i fire ulike RPMer: 244, 156, 122, 61. For hver valgte RPM ble simulatoren kjørt i 5 minutter og det samlede volumet til nedbøren registrert. Ettersom nedbørsfeltets areal er kjent,  $A = 2\text{m}^2$  kan vi få nedbøren oppgitt i millimeter (mm), ettersom dette tilsvarer liter pr.  $\text{m}^2$ . Videre blir dette omgjort til en intensitet ( $\text{l/s/ha}$ ). Figuren nedenfor viser sammenhengen mellom pumpehastighet (RPM) og nedbørintensitet ( $\text{l/s ha}$ ).



Figur 9: Sammenhengen mellom pumpehastighet og nedbørintensitet.

Disse verdiene ble så sammenlignet med IVF-verdier for Blindern PLU hentet fra norsk klimaservicesenter (Klimaservicesenter, 2023) for å sammenlikne hva slags «Oslo-regn» de ulike RPMene svarer til.

### 3.4 Konsept for design av modellby

Modellbyens grunnflate er til sammen  $2\text{m}^2$ , slik at den får plass i nedbør-simulatoren. En meter i bredden, og to meter i lengden. Byen er bygd opp av mindre kvadratiske moduler med lengde og bredde på 20 cm, som igjen vil si at modellbyens «grunnflate» vil være bygd opp av 5 slike moduler i bredden og 10 i lengden. Byen vil altså bestå av 50 moduler. 21 av disse modulene vil



---

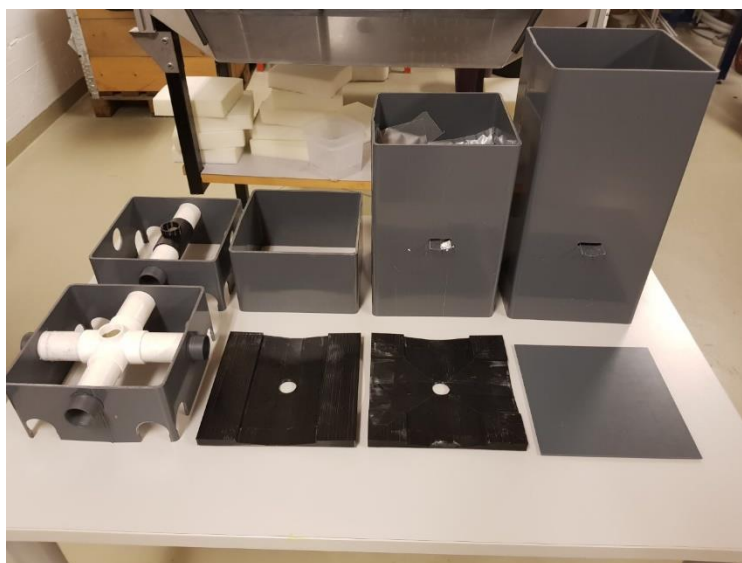
være gater og gatekryss med rørsystem og løsmasser. De 29 andre modulene vil være bygninger eller flater med eller uten tiltak.

Hovedmodulene består av gater, gatekryss, tette flater, og bygninger av ulike høyder for å reflektere virkeligheten i størst mulig grad. Videre vil gatemodulene ha tilhørende kobling til rørsystemet som befinner seg under bakkeplanet. Bygningene vil ha traktesystemer som leder vannet ut til gatene og de vil også bli laget på en slik måte som tillater hvert enkelt bygg å bli utformet med eller uten grønne tak som overvannstiltak.

Gateoverflatene og deres koblinger til rørsystemet er laget med 3D-printer. Modulene som har blitt 3D-printet har i første omgang blitt designet i SketchUp (Trimble Inc., 2023), som er et dataprogram man kan benytte for å produsere 3-dimensjonale modeller. Verkstedet på NMBU har to 3D-printere av typen *r* som har byggevolum på 220 x 220 x 250 mm. Det er disse printerne som er benyttet for å lage modulene. Videre er det benyttet svart 1.75 mm PLA-filament som materiale.

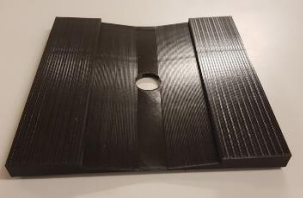
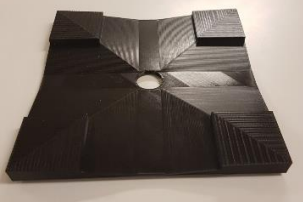








*Figur 10: Bilde av 3D printerene som er benyttet.*



*Figur 11: Bilde av de ulike modulene som byen er bygd opp av.*

Tabell 2: Beskrivelse av moduler.

Bilde av modul	Beskrivelse av modul	Antall moduler
	Rett gate med sluk i midten.	18
	Gatekryssmodul med sluk i midten.	3
	Kobling som forbinder den rette gatemodulen med resten av rørsystemet under gaten.	18
	Kobling som forbinder gatekryssmodulen med resten av rørsystemet under gaten.	3
	Impermeable flate av PVC.	9
	Firkant PVC-rør til impermeable flater eller grønne tiltak. Høyde 12 cm.	9

	Firkant PVC-rør til bygg. Høyde 30 cm.	17
	Firkant PVC-rør til bygg. Høyde 40 cm	3

Til løsmasser, grønne tak og regnbed i byen er det benyttet polyetermadrasser fra IKEA. Disse madrassene har i utgangspunktet et volum på 60 x 120 x 5 cm, men er kuttet til enheter på 20 x 20 x 5 cm for å passe i modulene. De madrassdelene som skal representere grønne tak og regnbed er malt med grønn akrylmaling

Når madrassene i utgangspunktet er hvite er ønsket at dette fargevalget skal bidra til å tydeliggjøre at madrassdelene representerer grønne tiltak.



Figur 12: Svampene før og etter de ble malt med akrylmaling

## 4 Resultater og diskusjon

### 4.1 Presentasjon av modellbyen



Figur 13: Illustrasjon av ferdig modellby i SketchUp (øverst). Fysisk modellby slik den ble seende ut med tiltak (venstre) og slik den ble seende ut uten tiltak (høyre).

#### 4.1.1 Moduler i PVC-materiale

Utgangspunktet for alle modulene er firkantete PVC-rør. Det ble til sammen bestilt 10 meter med slike rør. Rørstykkene kom på lengder på 2 meter og ble kappet til etter behov. De laveste modulene som blir brukt til gatenettverket ble kappet til 10 cm, modulene brukt til impermeable



flater eller tiltak ble kappet til 12 cm slik at de er på omtrentlig høyde med gatene, ettersom gatens høyde på 2 cm kommer i tillegg. Videre ble byggene kappet til høyder på enten 30 eller 40 cm som gir de en høyde over gateplan på henholdsvis 18 eller 28 cm.

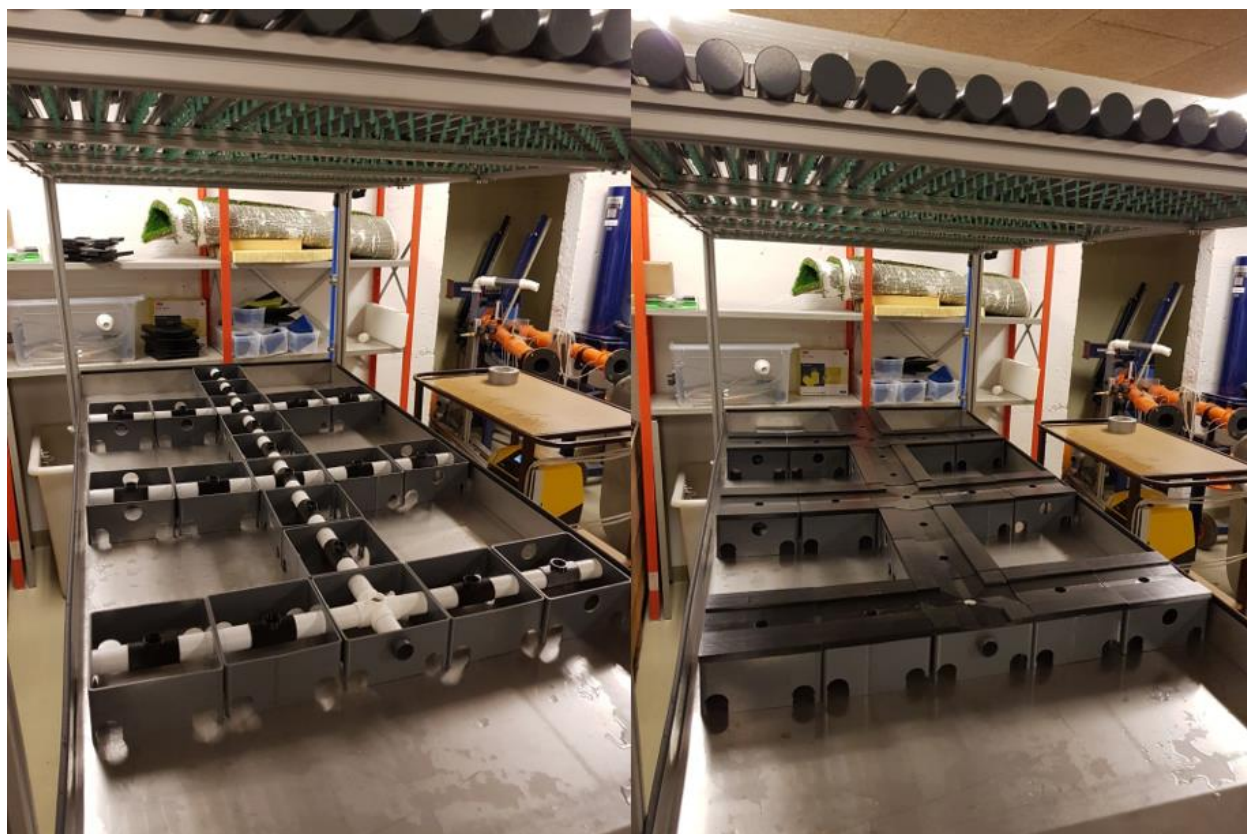


Figur 14: Firkant-PVC rørene. Til venstre klare for kutting og til høyre er gatemodulene ferdigstilt og klare for montering av rør og 3D-printet gateoverflate.



Figur 15: Oppe til venstre er rørsystemet montert inni firkant-PVC røret. Modul for gatekryss. Nede til venstre er modul for rett gate. Til høyre ser en hvordan modulene er festet til hverandre.

#### 4.1.2 Gatenettet og avløpssystemet



Figur 16: Bilde av avløpssystemet (venstre) og det tilhørende gatenettverket (høyre).

Gatenettet består som nevnt av 3D-printete moduler på 20 x 20 cm og høyde på 2 cm. Alle gatemodulene har fall mot sluket i midten som fører vannet til avløpssystemet. Hver modul er koblet til neste med en skjøt for å minimere lekkasjetap.



Figur 17: Skjøten og PP-røret.



*Figur 18: Nærbilde av rørsystemet for å tydeliggjøre hvordan vannet transporteres fra en modul til neste.*

PP-rørene har en indre diameter på 36 mm og slukene i gatemodulene har en diameter på 25 mm. Gatebredden med fortau er 20 cm i modellen. Hvis vi tar utgangspunkt i Kirkegårdsgaten i Oslo og antar at den har en gjennomsnittlig bredde på rundt 14 meter får vi forholdet at 20 cm i modellen svarer til 14 meter i virkeligheten, eller at hver centimeter i modellen utgjør 70 cm i virkeligheten. Med denne skaleringen vil sluket i modellen svare til et sluk med diameter på 1.75 meter i virkeligheten hvor hoveddelen av vannet blir ledet til. Hvis vi sammenlikner *VA-blad Nr. 32. Montering av kumramme og kumlukk*, har de største kummene en lysåpning med diameter på 800 mm. (Miljø Blad Nr. 32, 2023)

Hvis en antar at en gjennomsnittlig gate har en bredde på 14 meter vil rørsystemet i modellbyen med indre diameter på 36 mm svare til ett rørsystem med indre diameter på 2.52 m (2 520 mm) i den virkelige verden. På Pipelife sine hjemmesider finnes en oversikt over typiske dimensjoner på overvannsledninger. Disse overvannsledningene har et dimensjonsspekter på indre diameter fra 97mm til 554 mm (Pipelife, 2020). Ut fra disse antagelsene er det tydelig at dimensjonene på slukene og rørsystemet i modellbyen er kraftig overdrevent i forhold til deres motpart i virkeligheten, men det skal fortsatt være mulig å måle avrenning og effekt av tiltak til tross for denne skaleringsfeilen.



Figur 19: Omtrentlig bredde av en tilfeldig gate i Oslo. Gaten er Kirkegårds-gata og utklippet er hentet fra Scalgo Live. (Scalgo Live, 2023)

### 4.1.3 Grønne tak

Grønne tak er beskrevet som 20 x 20 cm svamper med dybde på 5 cm. Svampene er plassert på topp av bygning og vil dermed avskjære innkommende nedbør. Svampene er ikke fastmontert og kan dermed lett tas av og på. Dette bidrar til å gi modellen en fleksibilitet ift. å beskrive hydrauliske situasjoner med og uten tiltak. At de grønne takene er representert ved bruk av svamper gjør videre at hydrologiske egenskaper er avhengig av initialbetingelsene (det vil si hvor vått/tørt taket er ved start nedbør). At initialbetingelsene er av stor betydning for grønne taks effekt er godt dokumentert i litteraturen (Braskerud, 2014). Videre vil nedbør som infiltrerer gjennom svampen ha samme skjebne som nedbør som treffer tradisjonelle tak.

Det er spesielt to forhold i modellen som kan bidra til å gjøre de grønne takene urealistiske. I virkeligheten vil vann som har infiltrert gjennom et grønt tak måtte transporteres på overflaten av takmembranen og bort til sluk. I modellen kan imidlertid vann som har infiltrert gjennom svampen forlate svampen over et areal (20 x 20 cm). Modellen kan altså ikke beskrive en situasjon der slukets kapasitet bidrar til å stuve opp vann på det grønne taket. Konsekvensen er at vannet vil generelt ha en raskere vei gjennom modellen enn i virkeligheten. Det andre forholdet gjelder målestokk i vertikal retning. Som nevnt i kap. 4.1.2 så er målestokken i vertikal retning anslått å være rundt 1:70 (1 cm i modellen tilsvarer 70 cm i virkeligheten). Med denne målestokken så har modellens grønne tak en mektighet på ca. 350 cm. Til sammenlikningen er mektigheten på grønne tak i virkeligheten typisk 5 til 20 cm (Braskerud, 2016). Den store mektigheten medfører at takene i modellen både har en større kapasitet til å holde på vann, og vil gi tregere respons (lenger



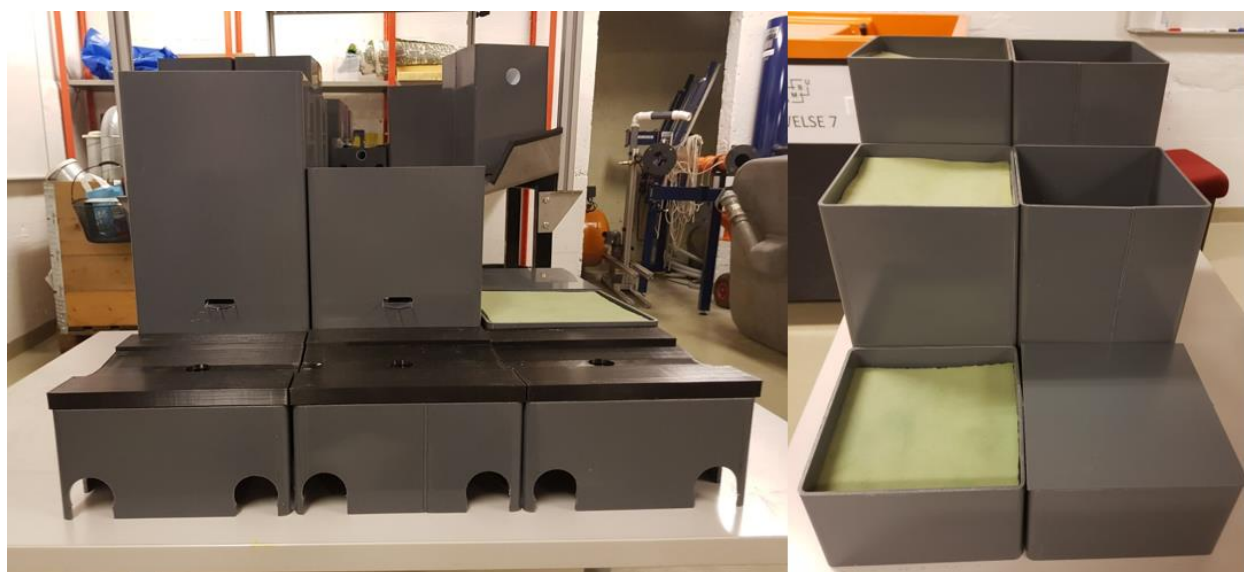
konsentrasjonstid), enn det vi vil forvente av grønne tak i virkeligheten. Grunnen til den overdrevne tykkelsen i modellen er at det vil øke sannsynligheten for at effekten av tiltak blir utslagsgivende på avrenningshydrogrammer.

#### **4.1.4 Bygninger med traktesystem og arealer for tiltak eller impermeabel flate**

Byens bygninger er firkantede PVC-rør kappet til 30 og 40 cm. De er kappet av ulik størrelse for å skape variasjon i bybilde i modellen. Over gateplanet blir de stående 18 og 28 cm over bakken. Hvis en benytter samme målestokk som i delkapittel 4.1.3 hvor vi tar utgangspunkt i en tilfeldig valgt gate i Oslo som hadde en bredde på rundt 14 meter blir byggene i modellen på henholdsvis rundt 13 og 20 meter. Høyden på bygninger kan variere avhengig av flere faktorer, inkludert takhøyde og byggestandarder. Generelt sett kan man anslå at en etasje i en bygning har en gjennomsnittlig høyde på omtrent 3 meter. Basert på dette estimatet vil bygninger med 3 til 6 etasjer ha en gjennomsnittlig høyde på omtrent 9 til 18 meter.

Det er viktig å merke seg at dette bare er et omtrentlig estimat og at bygninger kan ha ulike takhøyder og arkitektoniske utforming som kan påvirke den totale høyden. I tillegg kan det være variasjoner i byggehøyder på grunn av lokale reguleringer og planer.

Flatene for impermeabelt dekke eller tiltak er kappet til 12 cm slik at de er like høye som gatene, og i tilfeller med impermeable dekker har vannet muligheten til å renne videre til gatene og ned i slukene.



*Figur 20: Byggene og flaten plassert sett i forhold til gate (venstre). Byggene og flaten med og uten tiltak (høyre).*

## 4.2 Hydraulisk testing av modellby

Det ble gjennomført hydraulisk testing for å bestemme hvordan utvalgte variabler påvirket avrenningsmengde. Alle testene ble gjennomført uten løsmassesvampene ettersom de ikke ville hatt noe innvirkning på avrenningen fra rørsystemet. Det ble også benyttet gaffateip som tette flater istedenfor PVC-disker ettersom disse ikke var ferdig produsert da forsøkene ble gjennomført.

## 4.3 Analyse av hydrogrammer

Vannføring fra modellbyens utløpsrør ble estimert basert på målinger av akkumulert avrenningsvolum (jfr. bølge-tid-metoden). For hvert forsøkt ble det plassert et oppsamlingskar ved utløpsrøret der vekt ble registrert hvert sekund. Det ble antatt at vannets densitet var 1 g/ml. Resultatet for tre forsøk er vist i **Feil! Fant ikke referanseilden.** (venstre). For hver tidsserie ble følgende likninger tilpasset observerte verdier for akkumulert avrenningsvolum over tid:

$$V(t) = 0 \quad \text{når } 0 \leq t < t_s \quad (1)$$

$$V(t) = a \left( b e^{\frac{t_s-t}{b}} + t - t_s - b \right) \quad \text{når } t_s \leq t \leq t_p \quad (2)$$

$$V(t) = c(1 - e^{d(t_p-t)}) + V(t_p) \quad \text{når } t_p < t \leq t_f \quad (3)$$

$$c = V(t_f) - V(t_p) \quad (4)$$

$$d = \frac{a}{c} \left( 1 - e^{\frac{t_s-t_p}{b}} \right) \quad (5)$$

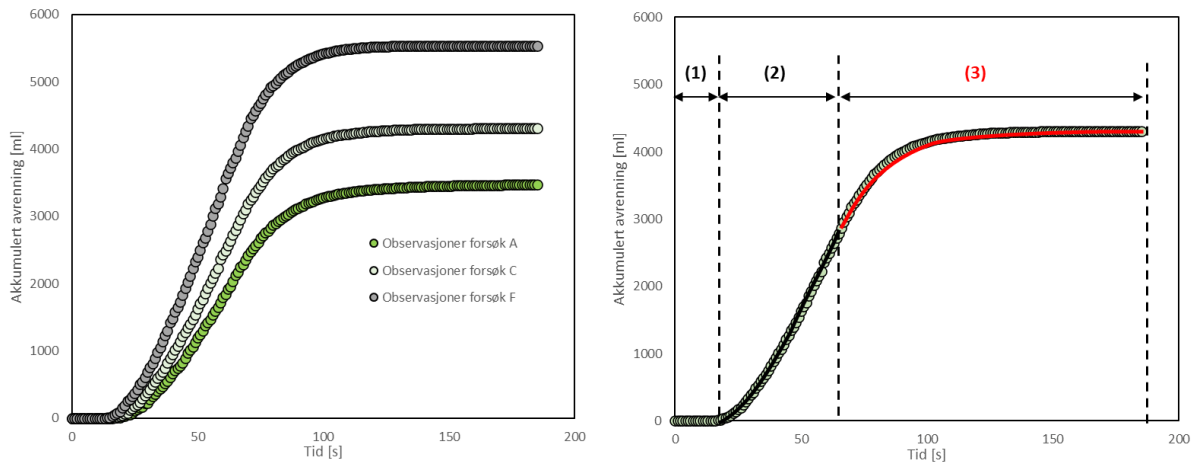
Der  $V$  er akkumulert avrenningsvolum [ml] som funksjon av tid  $t$  [s], og  $t_0$ ,  $t_p$  og  $t_f$  er tidspunkter for henholdsvis start avrenning, spissavrenning og slutt avrenning [s]. Koeffisientene  $a$  og  $b$  ble bestemt via ikke-lineær regresjon i Excel (*GRG*).

Likning (1) til (5) er empiriske likninger som viste seg være godt tilpasset observasjonene. Etter bestemmelse av  $a$  og  $b$  ble likning (1) til (3) derivert med hensyn til tid for å finne uttrykk for vannføring som funksjon av tid:

$$Q(t) = 0 \quad \text{når } 0 \leq t < t_s \quad (6)$$

$$Q(t) = a \left( 1 - e^{\frac{t_s-t}{b}} \right) \quad \text{når } t_s \leq t \leq t_p \quad (7)$$

$$Q(t) = c d e^{d(t_p-t)} \quad \text{når } t_p < t \leq t_f \quad (8)$$



Figur 21: Målte verdier av akkumulert avrenningsvolum for tre forsøk over tid (venstre) og modellert og observert akkumulert avrenningsvolum for et enkelt forsøk (høyre). Det er antatt at vannets densitet er 1g/ml.

### 4.3.1 Innledende forsøk

I de første forsøkene som ble gjennomført var fokuset å undersøke volumavrenningen via avløpssystemet. Her ble både helning og nedbørintensitet variert uten hell. Det viste seg at bortimot all nedbøren forsvinner gjennom ulike gliper mellom moduler og andre ikke-tette steder i modellen. Størst effekt ble funnet ved «full» tetting av modellen med gaffateip.



Figur 22: Bilder fra byen etter "full" tetting med gaffateip.

Tabell 3: Oppsummering av resultater fra de innledende forsøkene.

	<b>Modell uten justeringer</b>	<b>Modell uten justeringer</b>	<b>Modell uten justeringer</b>	<b>Tetting med gaffateip på gateplan</b>	<b>I tillegg tetting med gaffateip i taktrakter og ytterligere tetting</b>	
<b>S<sub>0</sub> =</b>	30	50	10	10	10	Promille (Modellhelning)
<b>v<sub>p</sub> =</b>	156	156	240	240	240	RPM (Pumpehastighet)
<b>I =</b>	475	475	848	848	848	L/(s ha) (Nedbørintensitet)
<b>t<sub>r</sub> =</b>	5	5	5	5	5	Minutter (Nedbørvarighet)
<b>V<sub>nedbør</sub></b>	28.5	28.5	50.9	50.9	50.9	Liter (Nedbørvolum)
<b>V<sub>rør</sub></b>	0.38	0.20	1.47	18.43	27.86	Totalt volum til avløpssystemet
<b>Andel i rør:</b>	1 %	1 %	3 %	36 %	55 %	

I tabell 3 ser vi tydelig effekten av den «tette» bymodellen med gaffateip. De tre første forsøkene uten teip får vi kun 1-3 % av nedbørandelen til rørsystemet. Vi ser også en tydelig effekt av å videre teipe takrennene og mer nøye teiping rundt omkring på bakkeplanet. Det er rimelig å anta at dersom man hadde fortsatt med teiping og gjort det enda mer nøyaktig kunne man tvunget en enda større andel av nedbøren til ledningsnett.

De videre testene som blir beskrevet i de neste delkapitlene ble gjennomført med «full» teiping hvor vi oppnådde 55 % andel til ledningsnett.

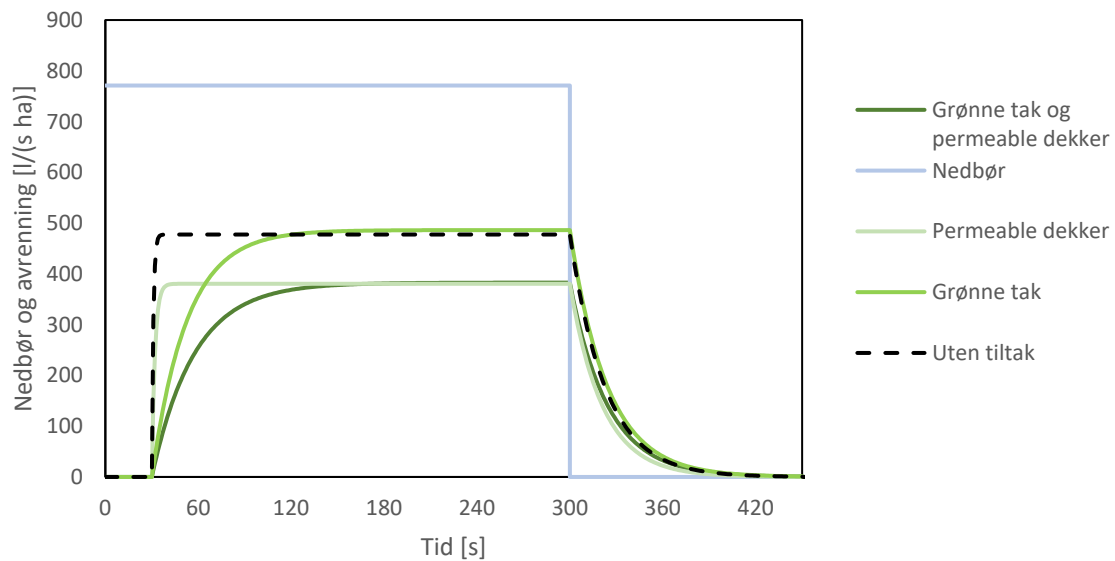
---

### 4.3.2 Grønne tiltaks effekt på hydrogrammer « $t_r = 5 \text{ min}$ »

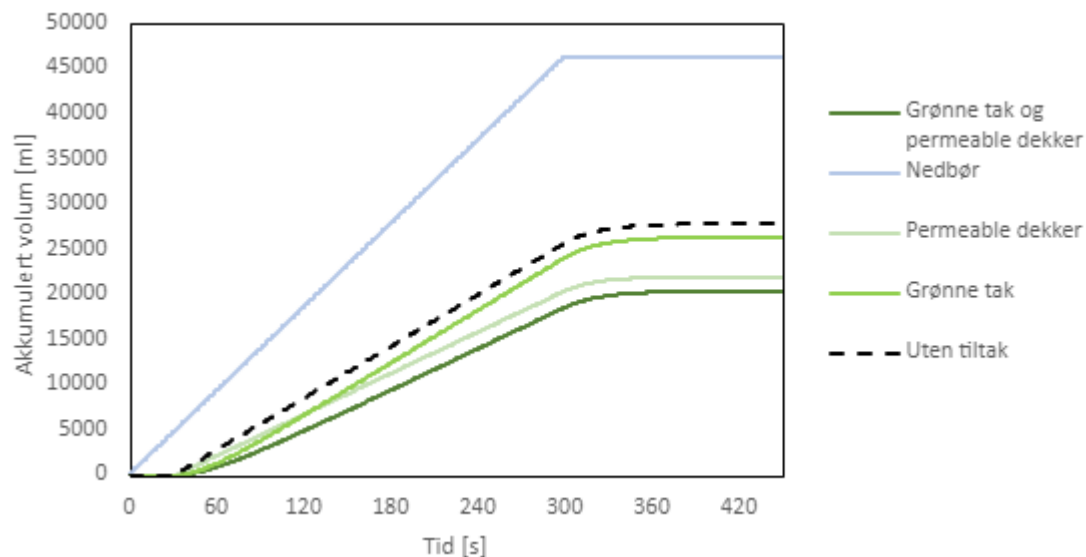
Neste runde med forsøk ble gjennomført med en nedbørvarighet på 5 minutter (samme som de innledende forsøkene) og med en RPM på 240. Hvis vi sammenlikner med IVF-verdier fra Blindern PLU så svarer denne RPMen omtrent til en 200 års hendelse med klimafaktor 1.7. På grunn av skalerings effekter blir ikke nedbørsmengde og tid overførbart til en virkelig situasjon. Dette er en veldig ekstrem nedbørhendelse og et høyere klimapåslag enn hva for eksempel Norsk Klimaservicesenter anbefaler for nedbørhendelser med gjentaksintervall  $\geq 50$  år. (For varigheter  $\leq 1$  time anbefaler de et klimapåslag på 50 %, altså en klimafaktor = 1.5) (Klimaservicesenter, 2023a).

Når nedbørvarigheten var 5 minutter så var dette nok til å oppnå en stasjonær situasjon i alle forsøkene. Med denne varigheten ble det gjennomført fire forsøk. Situasjonene som ble undersøkt var som følger: ingen tiltak i modellbyen, bare grønne tak som tiltak, bare permeable dekker som tiltak, og til slutt både grønne tak og permeable dekker. Resultatene viser at:

- Maksimal avrenningsintensitet fra grønne tak og modell uten tiltak er lik. Selv om grønne tak bidrar til å forsinke og holde tilbake avrenningen til å begynne med, har de grønne takene ikke effekt etter ca. 2 minutter. At effekten til å forsinke og holde tilbake styrtregn reduseres ved økende regnvarighet trekkes frem som en av konklusjonene i artikkelen «*Styrtregn og avrenning fra grønne tak med sedumvegetasjon*» (Braskerud, 2014).
- Permeable dekker bidrar til å redusere maksimal avrenningsintensitet når en sammenlikner med en situasjon uten tiltak. Vann som føres til permeable dekker når ikke avløpssystemet, og de permeable dekkene har derfor ingen påvirkning på forsinkelsen/konsentrasjonstid i systemet.
- Kombinasjonen av grønne tak og permeable dekker viser at egenskapene kan superposisjoneres (både forsinkelse og reduksjon av maksimal avrenning).
- Det er ingen vesentlige forskjeller i respons mellom situasjonene.



Figur 23: Grafen viser avrenningsforløpet over tid fra de ulike forsøkene.



Figur 24: Akkumulert vannvolum over tid fra avløpssystemet i modellbyen

Figur 23 viser også at svampene som grønne tak vil holde igjen noe av vannet som i en situasjon uten tiltak ville nådd avløpssystemet. Det er fortsatt en mindre effekt å merke der sammenliknet med de permeable dekkene som hindrer vannet helt å nå avløpssystemet.

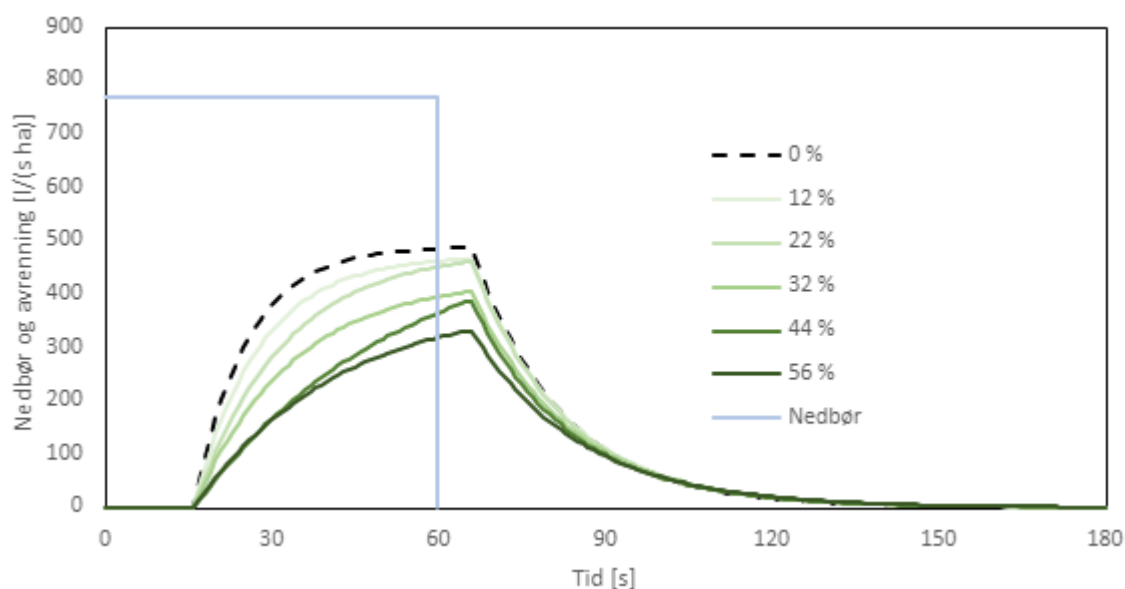
#### 4.3.3 Grønne tiltaks effekt på hydrogrammer « $t_r = 1 \text{ min}$ »

Etter å ha undersøkt stasjonære situasjoner ble det gjennomført forsøk for å bestemme sammenhengen mellom andel tiltak, maksimal videreført avrenning og volum-avrenning for kortere styrtregn. I disse forsøkene var nedbørvarigheten 1 minutt og intensiteten var som med forsøkene beskrevet i delkapittel 4.3.2 lik 848 L/(s ha).

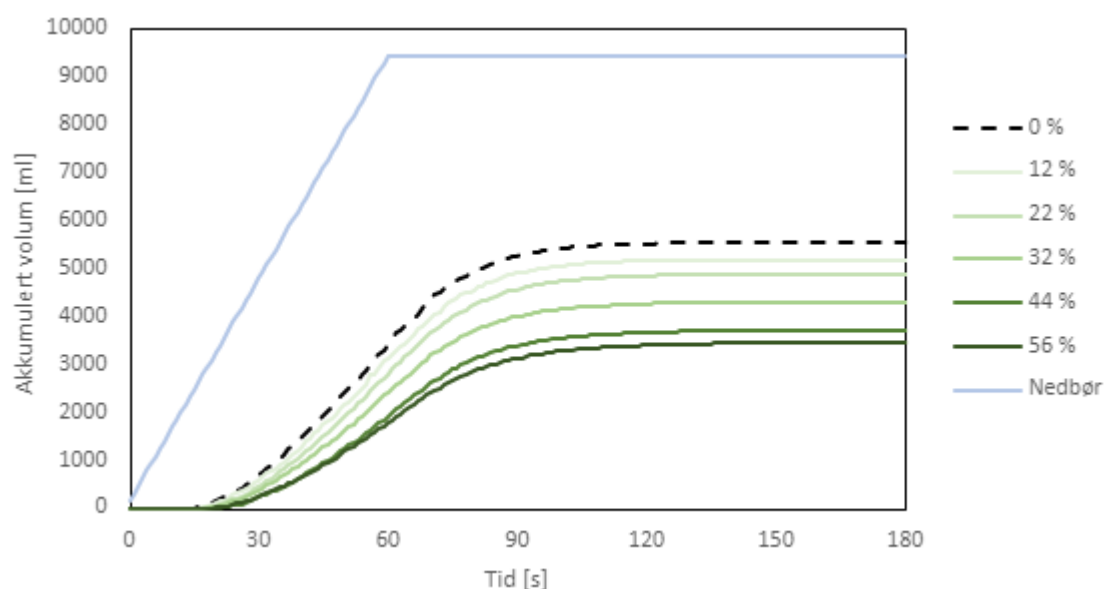
Tabell 4: Oppsummering av resultater fra forsøket med nedbørvarighet på ett minutt. ID: A-F refererer til de ulike forsøkene.

ID:	A	B	C	D	E	F
Grønt tak	19	15	11	7	4	0
Permeabelt dekke	9	7	5	4	2	0
Totalt	28	22	16	11	6	0
Andel	56 %	44 %	32 %	22 %	12 %	0 %
Avrenningsvolum [L]	3.5	3.7	4.3	4.9	5.2	5.5
Maksimal vannføring [L/(s ha)]	331	385	404	460	465	487
Nedbør [L/(s ha)]	848	848	848	848	848	848
Regnvarighet [min]	1	1	1	1	1	1
Nedbørvolum [L]	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2
Volumavrenningskoeffisient [ - ]	0.34	0.37	0.42	0.48	0.51	0.54
Spissavrenningskoeffisient [ - ]	0.39	0.45	0.48	0.54	0.55	0.57

Det ble gjennomført seks forsøk hvor det første forsøket (A) startet med maks antall tiltak med unntak av ett grønt tak. Deretter ble det for hvert forsøk gradvis fjernet tiltak frem til det siste forsøket (F) som gikk uten noen tiltak. Grafene nedenfor oppsummerer funnene:



Figur 25: Avrenningshydrogrammene produsert av de ulike forsøkene A-F. Prosentene til høyre er andelen av den totale byoverflaten som har tiltak.



Figur 26: Akkumulert vannvolum fra avløpssystemet produsert av de ulike forsøkene A-F. Prosentene til høyre er andelen av den totale byoverflaten som har tiltak.

Som når nedbørvarigheten var fem minutter kan det også ved disse forsøkene med korte regnskyll på ett minutt, observeres at kombinasjonen av grønne tak og permeable dekker fører til både forsinkelse og reduksjon av maksimal avrenning. Dette kan ses når man sammenlikner den mørkegrønne grafen (Grønne tak og permeable dekker) i figur 23 med figur 25. Det kan også observeres at når nedbørvarigheten er på ett minutt rekker ikke systemet å nå en stasjonær situasjon før avrenningen begynner å avta igjen.

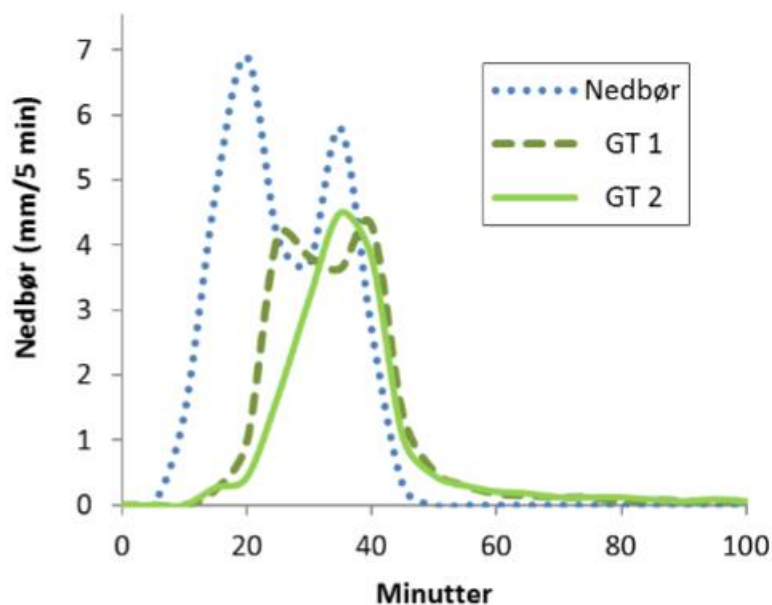
Fra tabell 4 kan det observeres en relativ stor forskjell i maksimal vannføring mellom forsøk C (404 L/(s ha)) og forsøk D (460 L/(s ha)). Dette kan skyldes at et viktig permeabelt dekke ble fjernet mellom forsøkene. Ett felt som bestod av et permeabelt dekke hadde utkast fra to bygninger, som betyr at man fjerner bidraget til avrenningen fra tre felt istedenfor ett.

## 4.4 Diskusjon

### 4.4.1 Modellens evne til å formidle utfordringer knyttet til overvannsproblemtikk

Som nevnt tidligere er effekten av de grønne takene at de forsinket maksimal avrenning fra systemet. Selv med den overdrevne mektigheten (Kap. 4.1.3) klarer ikke svampene som blir benyttet i modellbyen å trekke til seg nok av nedbøren at man får en betydelig reduksjon i avrenningen. Hvis en sammenlikner med forsøk med grønne tak i virkeligheten ser en at grønne tak både kan redusere og forsinke avrenningen:





Figur 1. Ekstremnedbør på tak med vegetasjon viser at flomdemping er mulig.

Figur 27: Figuren er hentet fra artikkelen "Grønne tak for flomdemping".

Artikkelen «Grønne tak for flomdemping» handler om forsøk gjort med grønne tak i Oslo og de har testet effekten av to forskjellige grønne tak (Braskerud, 2016). Resultatene fra modellbyen viser at svampene som er benyttet ikke har gode nok egenskaper til å redusere avrenningen. For å få de grønne takene i modellbyen enda mer realistiske kunne det blitt eksperimentert med ulike svampematerialer og undersøkt om noen har bedre egenskaper til å holde på vannet enn andre.

Hvis en ser på effekten svampene som skal imitere grøntarealer har, så ser en at disse reduserer avrenningen fra avløpssystemet ettersom vannet som havner i disse svampene aldri får muligheten til å renne videre ut på gatene og ned i slukene.

Dersom en sammenlikner dette med for eksempel regnbed i virkeligheten så ser en at de har samme egenskap når det kommer til å redusere avrenningen. I motsetning til modellbyen er det i virkeligheten mulig å utforme regnbed på en slik måte at vannet infiltreres til overvannsnett. (Braskerud & Paus, 2016). Dette er et forhold modellbyen, slik den ser ut i dag, ikke har mulighet til. Da ville en i tillegg til reduksjon av avrenning også kunne observert fordrøyning ved tiltakene som imiterer grøntarealer.

---

#### 4.4.2 De ønskede spesifikasjonene fra delkapittel 3.1

I delkapittel 3.1 ble ønskede spesifikasjoner for modellen oppsummert i en liste og det ble gitt en begrunnelse for hvorfor disse egenskapene ble valgt. I denne delen av diskusjonen vil det bli gått nærmere inn på hvor godt modellen tilfredsstiller disse spesifikasjonene.

##### 1. Modellen skal fremstå realistisk og gi brukeren en umiddelbar opplevelse av at det er en by.

- Modellen fremstår relativt realistisk. For å gi modellen en sterkere opplevelse av at det skal være en by kan gatemoduler bli malt i en mer «gatete» farge og man kan enten male på eller bruke klistremerke som en deelinje i veien. Videre kan det males på vinduer og dører på byggene for å gjøre de mer realistisk. Det er fremdeles ønskelig at byggene har en «kjedelig» gråtonet farge for å fremheve de grønne tiltakene.

##### 2. Modellen skal ha høy brukervennlighet.

- Erfaringer fra forsøkene som ble gjennomført er modellbyen har en relativ høy grad av brukervennlighet, men at det er gunstig om man minst er to stk. Pumpen må startes og stoppes, samtidig som at vekten av avrenningen må logges i tidsintervaller med stoppeklokke og vekt. Hvis svampene også skal vris opp og man skal legge til eller fjerne tiltak og gaffateip tar dette også litt tid.
- I oppgaven «*Utvikling og produksjon av en nedbør-avløpssimulator*» hvor nedbørssimulatoren ble bygd ble det benyttet et digitalt loggesystem for vekten. Dette kan også bli tatt i bruk for modellbyen.

##### 3. For- og etterarbeid ved simulering skal ikke ta betydelig tid.

- Når ønsket topologi for byen først er valgt er det ikke mye for- og etterarbeid. Dersom byen fortsetter å lekke etter at forbedringer er gjennomført kan det gunstigste være å jobbe med en bestemt topologi under en undervisnings-økt.

##### 4. Modellen skal være robust og tåle både vann og en viss mekanisk påkjenning.

- Alle komponentene som byen er bygd av skal være vannbestandig, både PVC, PP-rørene, polykarbonat (traktesystemet) og PLA som de 3D-printede modulene er laget av. (Orozco, 2022). Videre så ser det ut til at modulene fint tåler å bli presset sammen der skjøten mellom de er i trangeste laget. Det er verdt å nevne at bymodellen ikke har vært tatt i bruk lenge nok til å gjøre en endelig vurdering av dette.

##### 5. Lav driftskostnad.

- Når modellen er i drift og modulene er på plass er det kun en pumpe som tilfører vann til nedbørssimulatoren som trengs, noe som betyr at driftskostnadene til modellen er lave.

---

## **6. Stor fleksibilitet.**

- Ettersom bymodellen er modulær er det mulig å tilpasse et stort antall forskjellige byrom. I tillegg kan alle bygningene og modulene som ikke er gater tilpasses med eller uten tiltak som gjør at det blir upraktisk å beregne det matematiske antallet «byrom» som kan produseres. Det kan også testes med ulike helninger i nedbørsmodellen, samt nedbørintensitet og varighet.

## **7. Overføringsverdi til virkeligheten.**

- Resultatene presentert i delkapittel 4.3.2 og 4.3.3 viser at de grønne tiltakene i modellen oppfører seg relativt likt sammenliknet med hvordan tiltakene fungerer i virkeligheten (grønne tak og grøntarealer) med tanke på fordrøying og reduksjon av avrenningen til avløpssystem.

## **8. Pedagogisk komponent**

- Modellen har enda ikke blitt testet i en pedagogisk sammenheng så det er også her vanskelig å gjøre en helhetlig vurdering av dette. Det er flere pedagogiske fortrinn modellen har som mer tradisjonelle tilnærminger ikke har, visuelt ved at man ser nedbøren treffe byen, renne ut av trakter og ned i gatesluk og langs gater, auditivt ved at man kan høre nedbøren, og kinestetisk ved at man blant annet kan berøre modellen, bli våt på fingrene og selv endre på «byrom».

### **4.4.3 Helhetlig vurdering**

Det er rom for forbedring av modellen, samt gode muligheter for videreutvikling av konseptet. Ettersom kun 1-3% av nedbøren som treffer modellen finner veien til avløpssystemet uten at modellen blir tettet med gaffateip er det mye forbedringspotensialet på dette området alene. For eksempel kunne man testet med silikonpakninger rundt gater og bygninger. En annen mulighet kunne vært å slå sammen to og to gatemoduler til en tett modul på 20 x 40 cm. Dette ville redusert antall gliper og behovet for en del gaffateip og det ville fortsatt bevart fleksibiliteten til modellen i stor grad. Man kunne også sett nærmere på glipene mellom byggene og gatene og undersøkt om det eksisterer grep man kan ta der for å redusere vanntapet som renner av på utsiden av bygningene. På innsiden av byggene kunne man tettet glipene mellom trakten og veggene enda mer nøyaktig, f. eks med tec7 fugemasse. Alle grep som reduserer behovet for gaffateip vil bidra til å gjøre modellen mer anvendbar. Det vil ta kortere tid å teste ut ulike scenarioer med tanke på om byggene kaster ut vannet på gater eller flater som kan være permeable eller tette, samtidig som man også lettere kan flytte rundt på modulene med mindre jobb.

---

## **Visuelle forbedringspotensialer**

Rent visuelt er det også forbedringspotensialer. Det generelle ønsket om bymodellen var at den skal gi brukerne en umiddelbar opplevelse av at det er en by. For å gi byen et økt «by-inntrykk» kunne man utviklet takløsninger til bygningene som fortsatt leder alt vannet til trakten i de situasjonene man ikke benytter svampene som grønne tak. Man kunne også pyntet gatene med trær og benker og lagd ordentlige fasader på bygningene.

Videre kunne det vært interessant å produsere flere gatemoduler og bygninger som ville tillatt å eksperimentere med enda flere scenarier. Man kunne for eksempel satt opp en by med to lange gater istedenfor én slik den ser ut nå.

## **Videre utvikling med tanke på annen overvannsproblematikk**

Man kunne også gjort forsøk med løsmasser og ulike initialbetingelser (hvor mye vann er i svampene fra før av) på disse og de grønne tiltakene. Når det ble gjort forsøk med svamper som grønne tak og grøntarealer var det tydelig at svampene ikke tok til seg så mye vann. Det ville vært interessant å eksperimentere med ulike materialer med ulik cellestruktur og undersøkt om man fant noe som holdt enda bedre på vannet slik at de grønne takene ikke bare fordrøyde, men også reduserte avrenningen.

Det kan også være mulig å lage rørsystem med lekkasjer for å se hva slags innvirkning det har på videreført vannføring i ledningsnettet. Det ville også vært nyttig å forbedre utløpssystemet til modellen ved å lage en løsning med en slange og ventil som tillater ulik grad av struping. Med struping kunne man også utforsket utfordringen knyttet til flomveier og oversvømmelser.

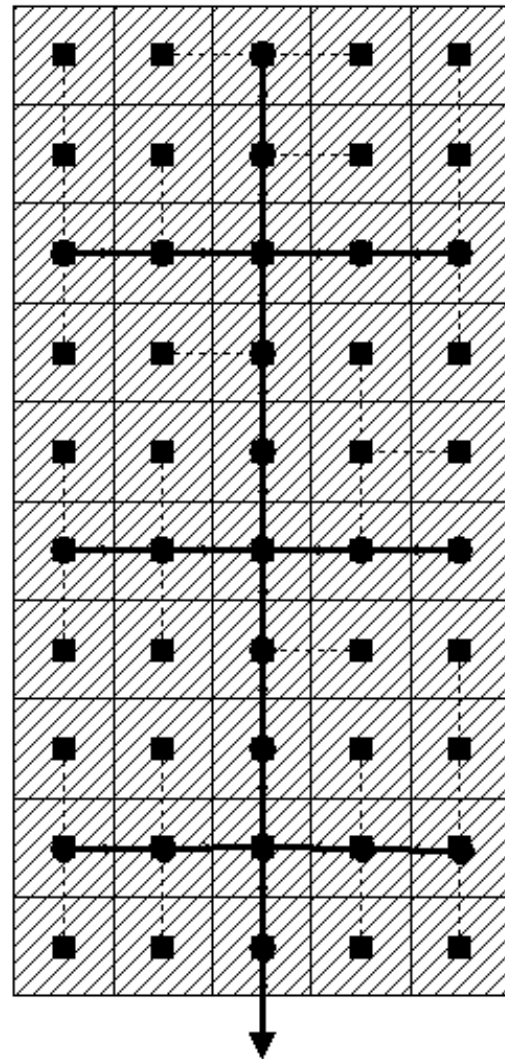
Ettersom hensikten med modellen er at den skal kunne bli benyttet i en pedagogisk sammenheng for å tydeliggjøre konsepter knyttet til håndtering av overvann i urbane områder ville det vært hensiktsmessig å ta i bruk modellen i fag ved NMBU og gjennomført spørreundersøkelse for å kartlegge hva slags opplevelse studentene hadde med modellen.

## **Digital tvilling av modellbyen i SWMM**

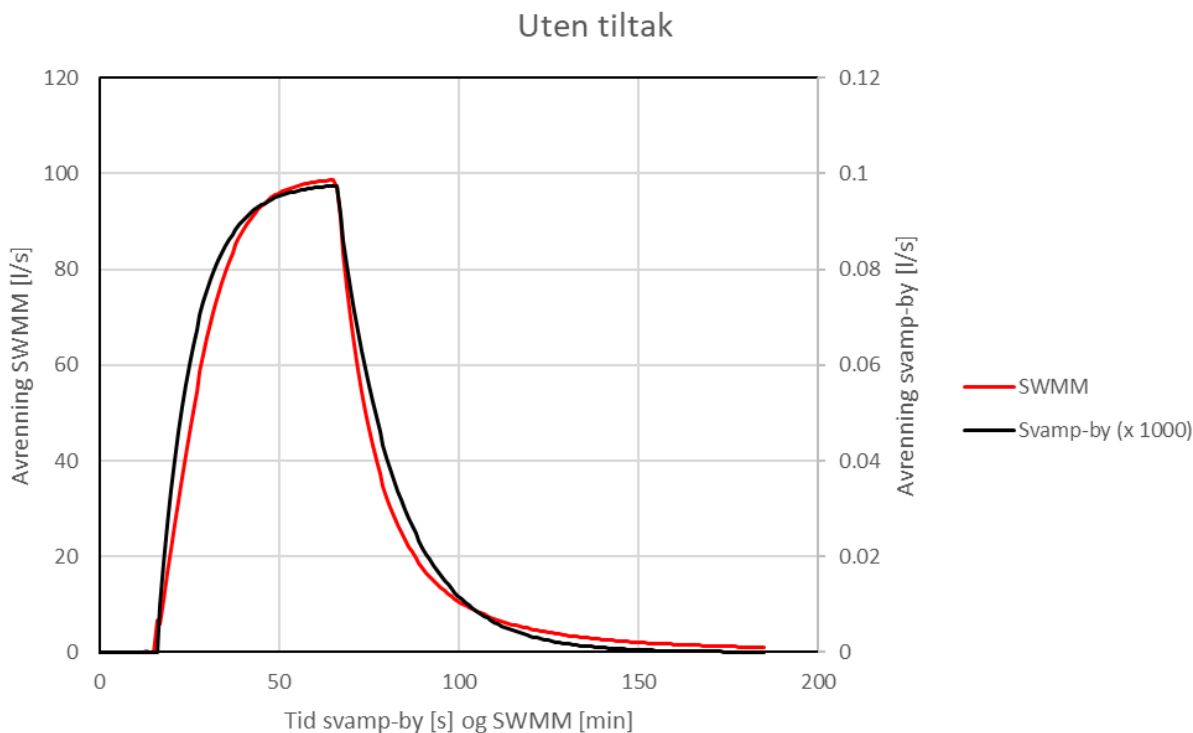
Det kunne også bli lagd en digital tvilling av modellbyen i SWMM som er en hydrodynamisk modell som brukes til å simulere og analysere overvannsavløp i urbane områder.

Programmet er designet for å hjelpe ingeniører og planleggere med å evaluere effektene av nedbør, avløpsnettverk og flomkontrolltiltak i byområder. SWMM tar hensyn til ulike faktorer som nedbørsmengder, overflateavrenning, avløpsnettverk, infiltrasjon, flomstyringstiltak og vannkvalitet. Ved å modellere disse faktorene kan SWMM bidra til å evaluere ytelsen til eksisterende eller planlagte dreneringssystemer og hjelpe med å utvikle effektive flomkontrollstrategier. SWMM har vært en viktig ressurs for urban hydrologi og vannressurser i flere tiår, og har blitt brukt over hele verden til å studere og håndtere avløpsproblemer, flomrisiko og miljøpåvirkninger av urbane områder. Programmet gir brukere muligheten til å analysere ulike scenarioer og vurdere effektiviteten av ulike drenerings- og flomkontrollstrategier for å forbedre bærekraftig forvaltning av vannressurser i byområder.

Som nevnt i delkapittel 2.3 kan modellbyen i tandem med en digital tvilling i SWMM spille på flere tilnærminger til læring.



Figur 28: Modellbyen modellert i SWMM. Hver lille firkant representerer en modul. Det er mulig å teste med ulike nedbørvarigheter og intensiteter og variere på egenskapene til hvert delfelt (de mindre firkantene) og hvordan de samspiller med avløpsnett.



Figur 29: Avrenningshydrogram fra manuelt kalibrert SWMM-modell sammenliknet med en situasjon i modellbyen uten tiltak.

Figur 29 viser at det eksisterer et potensial for å lage en digital tvilling av modellbyen i SWMM, men bør utforskes videre med flere situasjoner med og uten tiltak.

## 5 Konklusjon

I denne oppgaven har det blitt gjort rede for utfordringer knyttet til overvann i urbane områder, samt motivasjonen for å utvikle, bygge og teste en fysisk bymodell som en pedagogisk og alternativ måte å formidle og tydeliggjøre disse utfordringene. Videre er de ulike komponentene og oppbygning av modellen beskrevet både konseptuelt og fysisk. Tester med ulike nedbørvarigheter er gjennomført og effekten ulike tiltak har på avrenning har blitt registrert og presentert.

Bymodellen sammen med en nedbørsimulator som produserer syntetisk regn har vist at utvalgte utfordringer knyttet til overvann er mulig å simulere. Det er vist at grønne tak og grøntarealer bidrar til å redusere og fordrøye avrenningen til avløpssystemet sammenliknet med en situasjon uten tiltak. Det er også vist at når andelen overflater med tiltak øker, vil også avrenningen til avløpssystemet avta.

Når glipene i modellbyen ikke var dekket med gaffateip viste forsøk at kun 1-3 % av nedbøren fant veien til avløpssystemet. Etter tetting med gaffateip økte denne andelen til rundt 55 %. Tettingen med gaffateip gjør det mer tidkrevende å endre topologien i byen. Det vil derfor være

---

fordelaktig med tanke på undervisningsbruk å finne løsninger som vil bidra til å gjøre systemet lettere.

Konklusjonen er at modellbyen i sin helhet fortsatt kan være godt egnet som en alternativ og engasjerende måte å formidle kunnskap om overvannsfaget på. Forhåpentligvis vil den bidra til å øke forståelsen for faget både for studenter og andre personer som jobber innenfor dette feltet.

---

## 6 Referanser

- Braskerud, B. C. (2014). *Styrtregn og avrenning fra grønne tak med sedumvegetasjon*.
- Braskerud, B. C. (2016). *Grønne tak for flomdemping*.
- Braskerud, B. C., & Paus, K. H. (2016). *Regnbed for lokal flomdemping*.
- Elger, D. F., Lebrecht, B. S., Crowe, C. T., & Roberson, J. A. (2016). *Engineering Fluid Mechanics* (11th Edition). John Wiley Sons Inc.
- EPA - United States Environmental Protection Agency. (2023). *Storm Water Management Model (SWMM)* (5.2.3). EPA.
- Grierson, I. T., & Oades, J. M. (1977). A Rainfall Simulator for Field Studies of Run-off and Soil Erosion. In *I. agric. Engng Res* (Vol. 22).
- Hanssen-Bauer, I., Førland, E. J., Haddeland, I., Hisdal, H., Mayer, S., Nesje, A., Nilsen, J. E. Ø., Sandven, S., Sandø, A. B., Sorteberg, A., & Ådlandsvik, B. (2015). *Klima i Norge 2100 Kunnskapsgrunnlag for klimatilpasning oppdatert i 2015*. [www.miljodirektoratet.no/20804](http://www.miljodirektoratet.no/20804)
- Klimaservicesenter. (2023a, April 29). *Klimapåslag*. <https://klimaservicesenter.no/kss/laermer/klimapåslag>
- Klimaservicesenter. (2023b, April 29). *Nedbørintensitet (IVF-verdier)*. <https://klimaservicesenter.no/ivf?locale=nb&locationId=SN18701>
- Lindholm, O. (2008). *Veiledning i klimatilpasset overvannshåndtering Rapport Norsk Vann*. [www.norskvann.no](http://www.norskvann.no)
- Miljø Blad Nr. 32. (2023). *Montering av kumramme og kumløkk*. <https://www.vablad.no/montering-av-kumramme-og-kumløkk/>
- Miljødirektoratet. (2023). *Klimatilpasning i vann og avløpsektoren*.
- N. P. Thomas, & Samir A. El Swaify. (1989). *Construction and Calibration of a Rainfall Simulator*.
- Orozco. (2022, April 1). *How to Waterproof 3D Prints*. X3D. <https://x3d.com.au/blogs/tips-and-tricks/how-to-waterproof-3d-prints>
- Paus, K. H. (2020). *Norsk Vann rapport B26 - Kunnskapsbehov innen overvann og klimatilpasning*. [www.norskvann.no](http://www.norskvann.no)
- Pipelife. (2020). *Pragma overvannsrør SN 8*. <https://catalog.pipelife.com/no/articlelist/pragma-overvannsrør-drensrør-180366/178148/pp-c-2w-sn-8-black-pragma-pipe>
- Rasen, M. H., & Lilletvedt, M. (2020). *Utvikling og produksjon av en nedbør-avløpssimulator til bruk i undervisning*.
- Scalgo Live. (2023, April 19). [https://scalgo.com/live/norway?res=1024&ll=14.803972%2C65.063752&lrs=geonorge\\_norgeskart2](https://scalgo.com/live/norway?res=1024&ll=14.803972%2C65.063752&lrs=geonorge_norgeskart2)
- Shams, L., & Seitz, A. R. (2008). Benefits of multisensory learning. *Trends in Cognitive Sciences*, 12(11), 411–417. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2008.07.006>
- Stenersen, J., Skaaraas, H., Hansen, A.-J., Riise, E., & Refling, D. (2015). *NOU 2015: 16 Overvann i byer og tettsteder*. [www.fagbokforlaget.no/offpub](http://www.fagbokforlaget.no/offpub)
- Stenius, S., Glad, P. A., Wang, T. K., & Væringstad, T. (2015). *Veileder for flomberegninger i små uregulerte felt*.
- Trimble Inc. (2023). *SketchUp* (2023.0).



## Vedlegg A: Sjablongverdier benyttet i oppgaven

NRF-nr	D	d	Dmax	l	l2	Datablad
→ <a href="#">3074509</a>	110 mm	97 mm	128 mm	6 m	72 mm	<a href="#">9010459148681</a>
→ <a href="#">3074524</a>	160 mm	139 mm	183 mm	6 m	94 mm	<a href="#">9010459186539</a>
→ <a href="#">3074534</a>	200 mm	176 mm	227 mm	6 m	113 mm	<a href="#">9010459186546</a>
→ <a href="#">3074539</a>	250 mm	222 mm	284 mm	6 m	129 mm	<a href="#">9010459186553</a>
→ <a href="#">3074544</a>	315 mm	278 mm	355 mm	6 m	148 mm	<a href="#">9010459186560</a>
→ <a href="#">3074548</a>	400 mm	352 mm	451 mm	6 m	158 mm	<a href="#">9010459186577</a>
→ <a href="#">3074552</a>	500 mm	439 mm	555 mm	6 m	188 mm	<a href="#">9010459136671</a>
→ <a href="#">3074554</a>	630 mm	554 mm	712 mm	6 m	232 mm	<a href="#">9010459136664</a>

**Figur A.1:** Rør med ulike diametere hentet fra Pipelife sin nettside.

IVF-verdier for Oslo - Blindern Plu (SN18701), 94 moh.

Data fra 1968 - 2022, 53 ses. Oppdatert 31.12.2022.

Gjentaksintervall (år)	Varigheter (minutter)															
	1	2	3	5	10	15	20	30	45	60	90	120	180	360	720	1440
2	1,6	2,6	3,5	4,8	7,2	8,5	9,7	11,4	13,1	14,6	16,6	18,5	21,4	26,3	31,9	39,1
5	2,2	3,7	5,0	7,0	10,6	12,7	14,7	17,0	19,6	21,6	24,1	26,2	29,6	35,6	41,8	49,8
10	2,6	4,5	6,0	8,5	12,9	15,8	18,4	21,3	24,8	26,9	29,8	32,0	35,5	41,9	48,7	57,2
20	3,1	5,2	7,0	10,1	15,3	18,9	22,1	25,7	30,1	32,8	35,7	38,0	41,5	48,2	55,8	64,6
25	3,2	5,4	7,3	10,6	16,0	19,9	23,4	27,2	32,0	34,7	37,7	39,9	43,5	50,1	58,2	67,0
50	3,7	6,1	8,3	12,2	18,4	23,2	27,6	32,2	38,3	41,5	44,4	46,1	49,9	56,4	66,0	75,0
100	4,2	6,9	9,3	13,8	21,0	26,9	32,0	37,7	45,4	48,9	51,8	52,9	56,6	62,9	74,0	82,8
200	4,7	7,6	10,4	15,5	23,7	30,8	37,0	43,5	53,4	57,4	60,0	60,4	64,1	69,4	82,5	91,3

**Figur A.2:** IVF-statistikk for Blindern PLU fra Klimaservicesenter.

	Dimensjonerende gjentaksintervall < 50 år	Dimensjonerende gjentaksintervall ≥ 50 år
≤ 1 time	40 %	50 %
>1 – 3 timer	40 %	40 %
>3 – 24 timer	30 %	30 %

Anbefalt klimapåslag for ulike varigheter og gjentaksintervaller.

**Figur A.3:** Anbefalt klimapåslag for ulike varigheter og gjentaksintervaller fra Klimaservicesenter.

---

## Vedlegg B: Detaljbilder av bygg og traktesystem



**Figur B.1:** Detaljbilder av utløpet fra bygninger med og uten trakt.



**Figur B.2:** Spesialbygget nederst i bymodellen sett fra siden og under.



**Figur B.3:** Byggene med trakt sett ovenfra, før og etter tetting med gaffateip.



**Figur B.4:** Trakten laget av polykarbonat.



**Norges miljø- og biovitenskapelige universitet**  
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet  
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003  
NO-1432 Ås  
Norway