



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2023 30 stp

Fakultet for realfag og teknologi

Videreutvikling og testing av en fysisk bymodell til bruk i overvanns- undervisning

Development and testing of a physical model for
stormwater education

Sondre Nygaard Telle og Sverre Våset Weel

Vann- og Miljøteknikk

Forord

Denne masteroppgaven er vårt avsluttende prosjekt i studiet "Vann- og Miljøteknikk" ved Norges Miljø- og Biovitenskaplige Universitet (NMBU). Mye tid og innsats er lagt ned. Derfor håper vi arbeidet vårt sprer kunnskap og kompetente løsninger i framtiden.

Vi takker vår veileder, Kim Aleksander Haukeland Paus, for godt samspill, gode vinklinger og god veiledning gjennom masteroppgaven. I tillegg viser vi takknemlighet til verkstedet på NMBU som responderte kvikt og godt ved behov. Derfor takkes Øyvind Hansen, Oliver Sollie, Emil Sandås og medarbeiderne for velvillig og muntert samarbeid. Uunngåelig takkes også alle medstudenter for en fremragende studieperiode på NMBU.

Avslutningsvis takkes familie, venner, nære og kjære for støtte og motivasjon i oppgaven.

Ås, desember 2023

Sondre Nygaard Telle og Sverre Våset Weel

Sammendrag

Urbane områder står overfor flere problemer knyttet til overvannshåndtering. Klimaendringer fører til kraftigere og hyppigere nedbør. Økt urbanisering og tetting av grønne flater minker mengden infiltrert nedbør i bakken. Konsekvensene er større avrenning og flomhendelser som forårsaker skader på bygninger, infrastruktur og helse. Fremtidens overvannshåndtering må utvikles og forbedres for å håndtere utfordringene.

Dagens opplæring og kompetanseheving består i hovedsak av tradisjonelle undervisningsformer som for eksempel kurs, oppgaveløsning og casestudier. En stor del av overvannsundervisning foregår på ulike dataprogrammer, som gjør at man kan miste nærhet til faget.

Hensikten med masteroppgaven er å videreutvikle og teste en fysisk modellby til bruk i overvannsundervisning ved NMBU. Modellbyen står under en nedbørssimulator som tilfører nedbør. I modellbyen kan naturbaserte overvannstiltak som regnbed og grønne tak plasseres forskjellige steder. Tiltakene påvirker den totale avrenningen fra modellen. Gjennom testing og utprøving av modellen kartlegges effekten av tiltakene. Bymodellen forbedres blant annet i form av lekkasjereduksjon ved tetting av ledningsnettet.

Bymodellens hensikt er å bli brukt som et undervisningsverktøy. Hvor godt modellen fungerer som undervisningsverktøy ble testet under arbeidet med oppgaven. Både studenter og ansatte i fagfeltet besøkte og testet modellbyen. Etterpå deltok besøkende i en spørreundersøkelse som ga tilbakemeldinger på opplevelsen med modellen. Deltagerne var som regel veldig fornøyd med hvordan modellen fungerte og synes det var interessant å se effekten av overvannstiltak i en fysisk modell. Flere hadde innspill for videre forbedring av modellen.

Resultater fra modellen brukes som datagrunnlag for å trene en digital modell med maskinlæring. I modellen endres ulike parametere for de ulike overvannstiltakene slik at simulert avrenning stemmer med observerte resultater. Etter kalibrering av modellen brukes den til å finne optimale løsninger. Til slutt testes noen optimale løsninger i bymodellen for å undersøke nøyaktigheten til de simulerte resultatene. Flere store avvik oppsto mellom de simulerte og de observerte resultatene. Årsaken var usikkerhetsfaktorene i nedbørssimulatoren og bymodellen. Dersom usikkerhetene reduseres, nærmer de observerte verdiene de simulerte optimale forsøkene. Man kan derfor anta at modellen er kalibrert riktig, og kan anvendes til å finne optimale løsninger for overvannstiltak.

Summary

Urban areas face multiple challenges related to stormwater management. Climate change leads to more intense and frequent rainfall. Increased urbanization and the sealing of green areas reduce the amount of rainfall infiltrating the ground. The consequences include increased runoff and flood events, causing damage to buildings, infrastructure, and public health. Future stormwater management needs to be developed and improved to handle these challenges more effectively.

Current education and skill development primarily rely on traditional teaching methods such as courses, problem-solving, and case studies. A significant portion of stormwater education occurs on various computer programs, lacking physical proximity to the subject and its issues.

The purpose of the master's thesis is to further develop and test a physical model city for stormwater education at NMBU. The model city is placed under a rainfall simulator that simulates precipitation. Nature-based stormwater measures such as rain beds and green roofs can be placed in different locations in the model city. These measures affect the total runoff from the model. The effects of the measures are mapped through testing and experimentation with the model. The city model is also improved by reducing leaks through the sealing of the drainage network.

The purpose of the city model is as an educational tool and is continuously tested. Both students and professionals visited and tested the model city. Afterward, visitors participated in a survey providing feedback on their experience with the model. Participants were very satisfied with how the model functioned and found it interesting to see the physical effects of stormwater measures. Several also provided good ideas for further improving the model.

Results from the model are also used as data for training a machine learning-based digital model. Various parameters for different stormwater measures are adjusted in the model to match simulated runoff with observed data. After calibration, the model is used to find optimal solutions. Finally, some of these optimal solutions are tested in the city model to examine the accuracy of the simulated results. Several significant discrepancies occurred between the simulated and observed results, primarily due to uncertainties in the rainfall simulator and city model. The main factor was varying rainfall amounts due to the pump. If uncertainties are reduced, observed values approach the simulated optimal ones. Therefore, it can be assumed that the model is calibrated correctly and can be applied to find optimal stormwater management solutions.

Innhold

Forord	I
Sammendrag	II
Summary	III
Innhold	IV
Figurer	VI
Tabeller	VII
1 - Introduksjon	1
2 - Metode	4
2.1 - <i>Oppbygning av modellbyen</i>	4
2.1.1 - Ledningsnett	7
2.1.2 - Terrengoverflatene	8
2.1.4 - Kjeller med kuleventil	9
2.1.5 – Bygning-moduler	11
2.1.6 – Plassering av overvannstiltak	11
2.1.7 - Nedbørssimulator	12
2.2 – <i>Testing av modellby</i>	14
2.2.1 - Innledende forsøk for å bestemme parametere	14
2.2.2 – Systematiske forsøk	14
2.2.3 - Datagrunnlag for maskinlæring	15
2.3 – <i>Gjennomføring og evaluering av undervisningsaktiviteter</i>	16
2.4 - <i>Den digitale modellen</i>	17
2.4.1 - Metode for bygging av SWMM-modell	18
2.4.2 - Metode for kalibrering og validering av SWMM-modell	18
2.4.3 Metode for multiobjektiv optimalisering av modellen	19
2.4.4 Programvare	20
3 - Resultater og diskusjon	21
3.1 <i>Forbedring av fysisk modell</i>	21
3.1.1 Hva er lekkasjeandelen før gjentetting?	21
3.1.2 - Årsaken til lekkasjen	21
3.1.3 - Effekten av gjentetting av rør-modulene.....	22
3.1.4 - Effekten av gjentetting mellom modulene	22
3.1.5 - Den totale lekkasjereduksjonen	23
3.1.6 - Hvor mye nedbør skal modellen håndtere?	24
3.1.7 - Hva er usikkerheten?	25
3.2 - <i>Modellens evne til å formidle overvannsproblematikk</i>	27
3.2.1 - Asplan Viak AS.....	27

3.2.1.1 - Læringsutbytte, tilbakemeldinger og forbedringspotensialer av Asplan Viak AS	28
3.2.2 - THT300, NIVA og HiØ	29
3.2.2.1 - Læringsutbytte, tilbakemeldinger og forbedringspotensialer av THT300 og NIVA	30
3.2.2.2 - Læringsutbytte, tilbakemeldinger og forbedringspotensialer av HiØ	31
3.2.3 – Oppsummering av tilbakemeldinger fra konkurransene	31
3.3 – <i>Multi-objektiv optimalisering av digital modell</i>	32
3.3.1 - Resultater fra maskinlæring.....	32
3.3.2 - Paretofront	33
3.3.3 - Testing av optimal løsning i modellbyen	35
4 - Konklusjon	40
4.1 - <i>Videre arbeid</i>	41
Referanser	43
Vedlegg A - IVF-statistikk for Oslo - Blinder Plu	45
Vedlegg B - Spørreundersøkelsen gitt til deltagerne for tilbakemeldinger av konkurranse med modellbyen.....	46
Vedlegg C - Optimale løsninger som ble testet i delkapittel 3.3.3.	47

Figurer

Figur 1: Bymodellen og digital modell i plan.....	2
Figur 2: Oversikt og ulike kombinasjoner av tiltak.....	4
Figur 3: Ledningsnett etter gjentetting.	5
Figur 4: Modellbyen uten tiltak.....	6
Figur 5: Modellbyen med tiltak i alle delfelt.	7
Figur 6: Gatenett med ledningsnett. Figuren viser teiping av veiplatene og festing av moduler.	8
Figur 7: Overflatetyperne impermeabelt dekke, permeabelt dekke og ulike gatekonstruksjoner.....	9
Figur 8: Kjellermodul og kuleventil.	10
Figur 9: Bygning-modul.....	11
Figur 10: Svampene som blir brukt som regnbed og grønne tak.....	12
Figur 11: Nedbørssimulator. Hentet fra (Rasen & Lilletvedt, 2020).....	13
Figur 12: Ulike kombinasjoner av tiltak for testing.....	16
Figur 13: Konstruert SWMM-modell.....	17
Figur 14: Lekkasjereduserende tiltak, som liming av rørkoblinger og skru sammen moduler.....	23
Figur 15: Plastikk-veggene montert på siden av grunnflaten under regntaket.....	25
Figur 16: Ventilarmen etter sveising.....	26
Figur 17: Resultatene fra spørreundersøkelsen gitt til Asplan Viak AS.	28
Figur 18: Resultatene fra spørreundersøkelsen gitt til THT300 og HiØ.....	30
Figur 19: Kalibrering og validering av SWMM-modellen.....	32
Figur 20: Noen optimale løsninger.....	34
Figur 21: Paretofronten som ble funnet av maskinlæring.....	35
Figur 22: Simulert og observert avrenningskoeffisient.....	37
Figur 23: Justert simulert og observert avrenningskoeffisient.....	38
Figur 24: Simulert og observert kost/nytte.....	39

Tabeller

Tabell 1: Resultater fra første store testing av effekten av tiltak.....	15
Tabell 2: De endelige verdiene etter kalibrering	33
Tabell 3: Kostnadsfordelingen til de ulike tiltakene.....	34
Tabell 4: Sammenligning av simulerte og observerte resultater.....	36

1 - Introduksjon

De siste årene har vi opplevd mer ekstremvær og flom forårsaket av klimaendringer (Miljødirektoratet, 2023). Lokal overvannshåndtering i urbane områder krever derfor mer oppmerksomhet. Økt byutvikling fører til større avrenning, når grønne overflater, skogbunn, bekker og elveløp tettes igjen og erstattes med impermeable flater. (Norges offentlige utredninger, 2015) Bærekraftig utvikling, med implementering av lokale overvannstiltak som regnbed, fordrøyningsmagasin og grønne tak, blir viktig for å møte klimautfordringene. Utbygging av overvannstiltak møter imidlertid flere utfordringer, inkludert høye kostnader, arealkrevende naturbaserte tiltak, behov for spesialisert kompetanse, og kompleks planlegging som involverer flere interessenter.

For å imøtekomme utfordringene knyttet til overvann er det behov for undervisning innen overvannsfaget. Av den grunn blir det utviklet en modellby for å videreutvikle overvannsundervisningen ved NMBU. Modellbyen etterligner et byområde og ble bygd i forbindelse med Trygve Grobstok Skjeseth sin masteroppgave (Skjeseth, 2023). Bymodellen består av 50 moduler, hvor 29 kan romme overvannstiltak, vist i figur 1. Byen bruker nedbørssimulator konstruert i masteroppgaven til Mariann Rasen og Marianne Lilletvedt (Rasen & Lilletvedt, 2020). Nedbørssimulatoren gir modellbyen simulert ekstremnedbør som ulike overvannstiltak i byen skal håndtere på en realistisk måte.



Figur 1: Bymodellen og digital modell i plan

Aktiv undervisning via arbeid med modellbyen involverer flere sanser, som gir nærhet til faget. Kunnskap formidles fysisk med bymodellen og ikke bare digitalt via dataprogrammer eller forelesninger. I modellbyen iverksettes ulike tiltak for å redusere og fordrøye avrenning.

I Skjeseth sin masteroppgave designes og konstrueres bymodellen, men den ble ikke ferdig testet. Bymodellen hadde flere mangler og forbedringspotensialer, eksempelvis høy vannlekkasje (>50%). Den høye lekkasjeandelen ut av bymodellen reduserer effekten tiltak har på avrenning. Store deler av oppgaven består derfor hovedsakelig av reduksjon av lekkasjer, samt oppdage og løse andre problemer så overvannstiltakene til bymodellen får større effekt.

Hensikten med oppgaven er videreutvikling, testing og evaluering av effekten en modellby har i overvannsundervisning. I modellbyen iverksettes ulike overvannstiltak for å forsinke nedbør og avlede nedbør fra ledningsnett. Byen videreutvikles for å vise reduksjon av vannføring etter at tiltak blir

plassert. Flere ulike overvannstiltak er tilgjengelige, slik at et stort antall ulike kombinasjoner av tiltak er mulige.

Nye digitale verktøy, slik som kunstig intelligens, har økt produktiviteten i mange bransjer.

Overvannshåndtering er et komplekst fagfelt med mange ulike tilnærminger. Et aktuelt spørsmål i dag, er om det er mulig å anvende maskinlæring og kunstig intelligens i overvannshåndtering. En slik tilnærming ville gjort det mulig for en ingeniør å sette opp en modell av nedbørsfeltet, for så å la dataprogrammet finne de beste overvannsløsningene.

I denne oppgaven skal vi utforske mulighetene for anvendelse av maskinlæring. I tillegg til å videreutvikle modellbyen skal det utvikles en digital tvilling av modellbyen. En modell skal trenes opp til å finne gode overvannsløsninger. De beste løsningene skal til slutt bli testet for å se om maskinlæringsmetoden er egnet for bruk i overvannshåndtering.

Hovedmålet med oppgaven er å **utvikle og teste en fysisk modell, slik at den kan brukes i overvannsundervisning**. For å nå dette målet er det flere delspørsmål som må defineres:

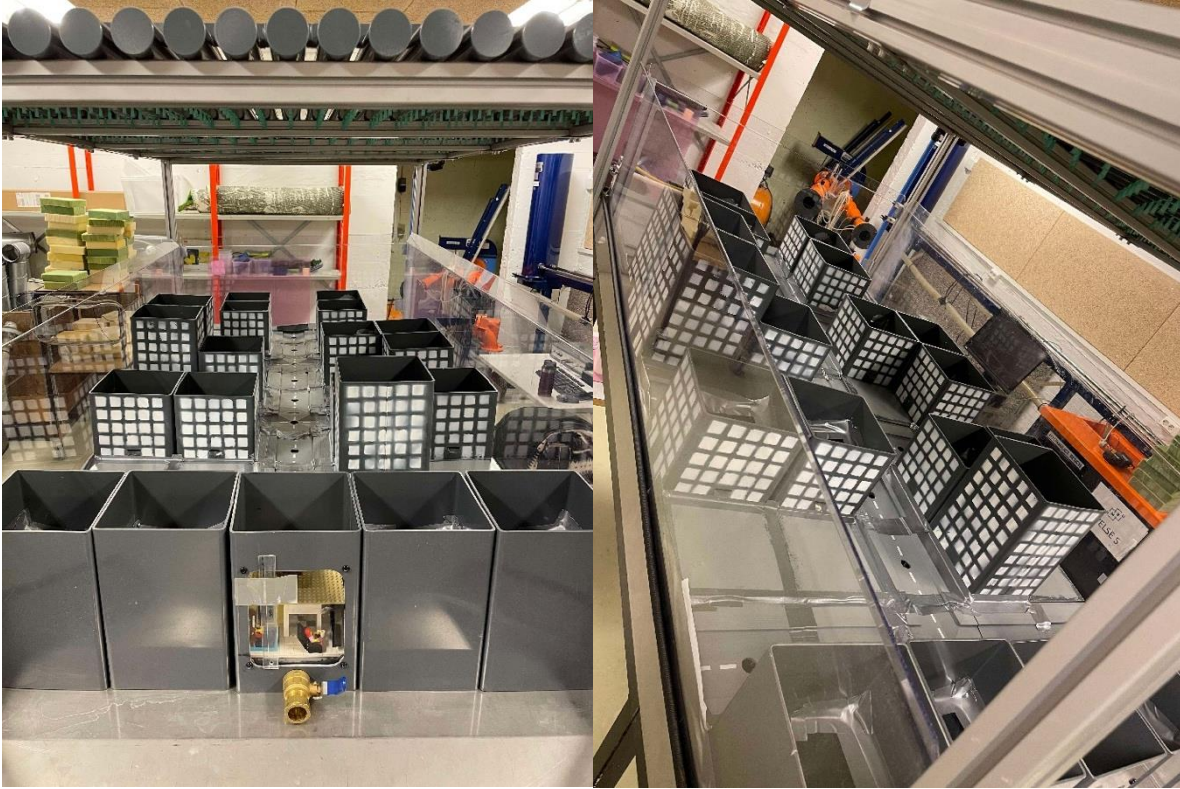
1. Hvordan kan bymodellen forbedres slik at tiltakene får høyere effekt for å holde tilbake nedbør?
2. Hvordan oppleves bruk av modellen, og hvordan fungerer modellen til å formidle problemer om overvann?
3. Hvordan videreutvikle et undervisningsopplegg tilknyttet modellen som viser anvendelse av maskinlæringsmetoder?

Figur 3 viser konstruksjon av ledningsnett.



Figur 3: Ledningsnett etter gjetting.

Heretter vises modellen fra forskjellige vinkler ferdig konstruert, først uten tiltak. Deretter vises modellbyen med tiltak.



Figur 4: Modellbyen uten tiltak



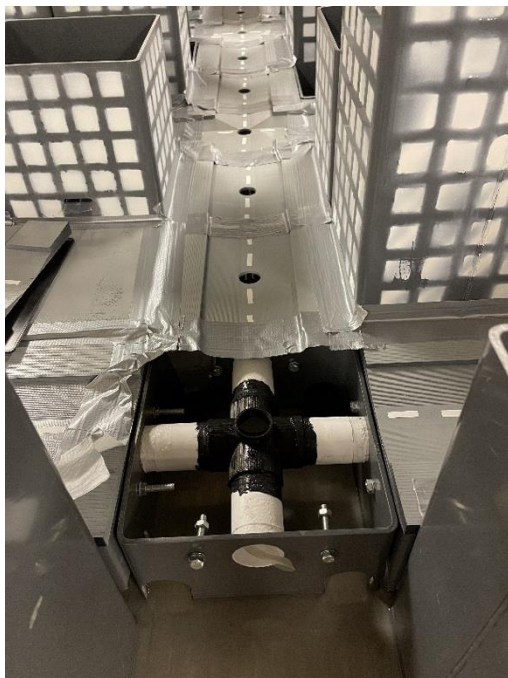
Figur 5: Modellbyen med tiltak i alle delfelt.

Modellbyens 50 moduler er inndelt i 20 bygninger, 21 vei-moduler og 9 terrengdekker.

Sammensetningen vises i tidligere figurer. Kvartalsstrukturen er symmetrisk og består av gatenett vinkelrett på hverandre. Det er totalt 6 kvartaler hvor bygg og impermeable flater ligger. Kvartalene er satt opp på forskjellige måter. Antall bygninger, terrengflater og hvor avrenning fra bygningene ender opp varierer. Noen terrengflater tar ikke imot avrenning fra andre arealer, og noen tar imot fra flere. Dette er for å gi noen impermeable flater større effekt enn andre ved effektiv plassering av tiltak. Byen heller mot den ene kortsiden av modellen hvor avrenningen samles og måles. Under veidekkene ligger ledningsnett, og avrenningen fra overflatene ledes mot sluk i veiene.

2.1.1 - Ledningsnett

I bymodellens gate-moduler er rør satt inn for å skape et ledningsnett. Rørene i hver gatemodul består av tre deler: to PP-rør som er satt inn i hver side av et 3D-printet sluk. PP-rørene har indre diameter på 36milimeter [mm] og ytre dimeter på 40mm. Sluket står midt i modulen med åpning opp mot veiflaten. Det er i tillegg 3 gatekryss-moduler som er bygget opp på samme måte som gate-modulene, men består av PP-rør og åpninger i 4 retninger, som vist i figur 6. Rør-modulene kobles sammen av en 3D-printet rørdel som føres inn i rør-modulene.

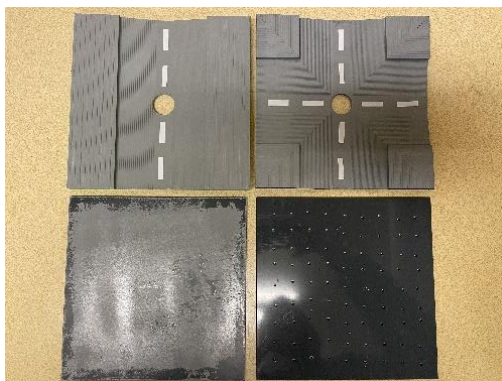


Figur 6: Gatenett med ledningsnett. Figuren viser teipingen av veiplatene og festing av moduler.

2.1.2 - Terrengoverflatene

I terreng-modulene er det to alternative terrengflater. Den ene flaten er en helt flat PVC-plate som virker som et impermeabelt asfaltdekke, se figur 7. Det andre alternativet er regnbed, hvor PVC-platen fjernes og modulen åpnes til grunnplaten under byen. Under konkurranser og undervisning plasseres her svamp for å etterligne grønne dekker.

Gatene i byen er 3D-printet og består av fortau og nedsunket veibane. I midten av gate-modulene er det sluk som kobler avrenningen fra terrengflatene til ledningsnettet.



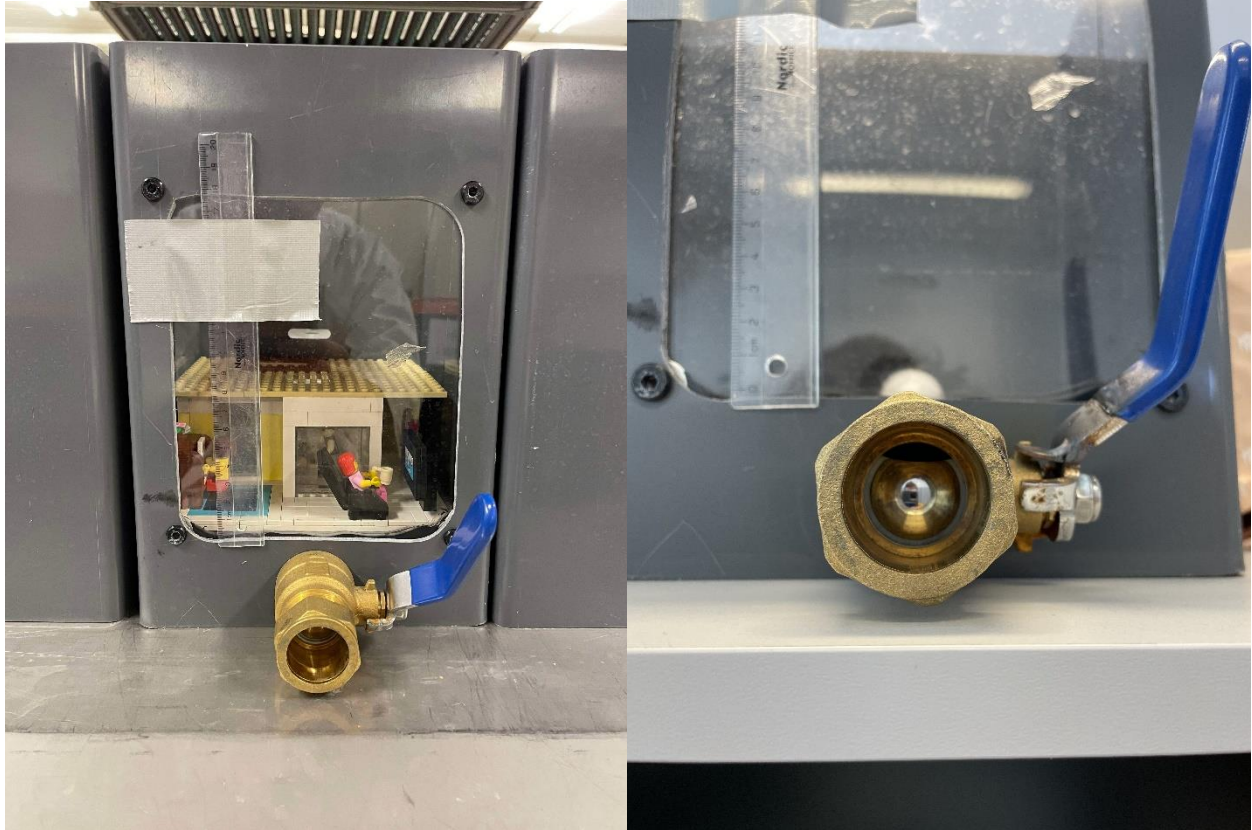
Figur 7: Overflatetyperne impermeabelt dekke, permeabelt dekke og ulike gatekonstruksjon.

2.1.4 - Kjeller med kuleventil

Nederst i modellbyen står en bygning med en kjeller, se figur 8. Kjelleren er laget for å kunne visualisere kjelleroversvømmelse og vise deltagere konsekvenser. Vann fra nedbøren strømmer inn i kjelleren fra ledningsnettets. Det er åpent mellom kjeller og ledningsnettets under, så kjelleren oversvømmes ved overfylt ledningsnett. I kjelleren er det bygget et LEGO-interiør, for å gjøre oversvømmelsen visuelt interessant.

Utløpet av ledningsnettets reguleres med en kuleventil. Dersom ventilen står helt åpen, er vannføringen ut av modellen for høy. Da unngås oversvømmelse. Ventilen strupes derfor til ønsket effekt og ledningene overdimensjoneres i forhold til resten av modellbyen. Strupingen simulerer dermed rør med mindre dimensjon/kapasitet og vannføringen ut av modellbyen reduseres. Dette etterligner en situasjon hvor ledningene nedstrøms er underdimensjonert eller utdatert.

Bygningen til kjelleren har tett tak. Nedbøren på takflaten renner dermed ut av modellbyen, og har ingen effekt på avrenningen fra utløpet.



Figur 8: Kjellermodul og kuleventil.

2.1.5 – Bygning-moduler

Det er 19 bygninger i modellen. Uten tiltak fører all nedbør til bakkeplan. Vannet renner på en skråstilt plate ut fra en sidevegg per bygning, og fungerer som takrenne som vist i figur 9.



Figur 9: Bygning-modul

2.1.6 – Plassering av overvannstiltak

Originalt ble modellbyen konstruert til å ha to ulike overvannstiltak: grønne tak og regnbed (Skjeseth, 2023).

Grønne tak simuleres ved hjelp av svamper som settes inn i bygningene, se figur 10. Disse svampene plasseres i bygget og reduserer avrenningen og bremser vannets avrenningshastighet.

Regnbed utføres ved å fjerne et impermeabelt dekke. Nedbør kan dermed renne ned til platen byen står på. Her legges en svamp i modulen på samme måte som for grønne tak. Vannet ledet til denne modulen renner utenom ledningsnettet og ned på modellbyens grunnplate.



Figur 10: Svampene som blir brukt som regnbed og grønne tak

2.1.7 - Nedbørssimulator

For tilføring av vann til modellen brukes nedbørssimulatoren lagd av Mariann Hellne Rasen og Marianne Lilletvedt i deres masteroppgave ved NMBU (Rasen & Lilletvedt, 2020)

Nedbørssimulatoren består av en takkonstruksjon med 14 horisontale vannrør, se figur 11. Vannrørene er sammenkoblet og kanyler penetrerer rørene vinkelrett ned mot grunnplaten. Kanylene behøver trykk for utstrømning. Først ved likt vanntrykk i rørene begynner gjennomstrømningen, så rørene må fylles med vann før nedbør begynner. Dette gir tilnærmet uniform nedbør. Under vannrørene ligger en plate med sidevegger hvor modellbyen plasseres.



Figur 11: Nedbørssimulator. Hentet fra (Rasen & Lilletvedt, 2020)

Nedbørssimulatoren består av en pumpe satt til 265 RPM som gir konstant og likt fordelt nedbør over arealet på 2 kvadratmeter [m^2]. Det gir nedbør på 11,1 liter per minutt [l/min]. Gjennomsnittlig nedbør er 5,5mm. Dette kan sammenlignes med IVF-verdi for Oslo-området, hvor 200 års-regnhendelse på 1 minutt er 4,7mm. (Norsk Klimaservicesenter, 2023). Vår regnhendelse er derfor vesentlig større enn et 200 års-regn. Nedbøren ble valgt til å være stor for å redusere andelen av vann som forsvinner via lekkasje. Dette øker dermed effekten av tiltakene. 1 minutt varighet er valgt for å forkorte tiden et forsøk vil ta.

Byens helning i retning utløpet er målt til 14,5 promille [%]. Helningen fra sidene til midten av modellen er ikke målt. Det er et lavpunkt i midten av modellen på grunn av vekten av modellbyen og manglende støtte opp under platen. Dette gir strømning inn mot midten fra sidene.

2.2 – Testing av modellby

Dette delkapittelet omhandler hvordan tester utføres, fra enkelte forsøk til større og systematiske testrunder.

Forsøk gjennomføres ved start av stoppeklokke og pumpe samtidig. Avrenningen fra lednings-nettet strømmer ut, samles og veies på en vekt ved utløpet. Vannet som lekker av bymodellen renner på grunnplaten byen står på, og samles i en separat beholder. Etter 60 sekunder [sek] avsluttes vannpumpen. Største oversvømmelsen i kjelleren oppstår 10-15 sek etter endt pumping, og vannhøyden leses av fra en linjal festet til vinduet til kjelleren. Maksimal oversvømmelse har en 10-15sek forsinkelse på grunn av konsentrasjonstiden til modellbyen. Selv om pumpen ikke er på, fortsetter vannet å renne ut av byen. Tidsforbruket for tømming av byen er avhengig av strupingen på ventilen. Avrenningsvolumet leses av når avrenningen stabiliseres og det kun drypper fra utløpet. Initialbetingelsene må være like i hvert forsøk. Svampene ble derfor vridd opp før hvert forsøk.

2.2.1 - Innledende forsøk for å bestemme parametere

Testing av modellbyen gjøres gjennom en rekke forsøk i flere faser. Her ble vi kjent med pumpen, nedbørssimulatoren, bymodellen og ledningsnettet. Tidlig oppdaget vi den viktigste initialbetingelsen er strupingen på utløpet. Strupingen forårsaker oversvømmelse i kjelleren.

Fremgangsmåten for å finne passende vinkel struping var å gjøre mange forsøk hvor strupingsvinkelen ble økt mellom hvert forsøk. Avrenning for forsøk ble målt fra åpent utløp til stengt ventil. Flere strupevinkler ble testet. For å finne den beste vinkel ble aktuelle strupinger testet først uten noen tiltak, og så med tiltak i alle delfelt. Målet var strupingen med størst differanse mellom avrenning med og uten tiltak. Her vil tiltak redusere avrenning og oversvømmelse mest mulig.

2.2.2 – Systematiske forsøk

Etter at strupingen ble fastslått, gjennomføres systematiske forsøk. Hensikten var å finne ulike kombinasjoners effekt ved forskjellig plassering, antall og type tiltak. Det finnes mange ulike kombinasjoner med tiltak, og det er ikke realistisk å teste alle. Derfor ble det valgt ut et sett med 44 forsøk som ga god spredning. Forsøkene gjennomføres først med by uten tiltak. Så fordeles grønne tak gradvis, eksempelvis 3 eller 4 nye grønne tak mellom hvert forsøk. Denne fremgangsmåten blir

gjennomført for alle antall regnbed. Forsøkene gir en stor spredning på kostnader og avrenning. Resultatene for avrenning [L] vises i tabell 1.

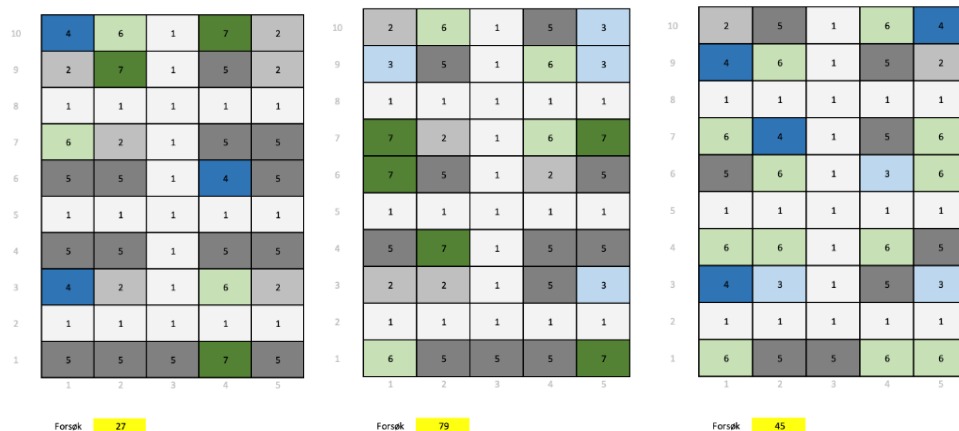
Tabell 1: Resultater fra første store testing av effekten av tiltak.

Avrenning [L]	Antall regnbed									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	6,99		6,94	6,19	5,8	5,79	5,28	5,24	4,65	4,77
1										
2										
3										
4	7,08		6,7	5,61	5,52	5,62	5,18	4,72	4,64	4,35
5										
6										
7										
8	6,86		6,23	5,02	5,24	5,27	4,9	4,66	4,19	3,98
9										
10										3,86
11									3,78	
12	6,21		5,98	4,65	4,65	4,55				
13								4,42		
14							4,29			
15										
16	5,69		5,05			3,978				
17					4,16					
18				3,83						
19	5,22		4,87							

2.2.3 - Datagrunnlag for maskinlæring

Det ble gjennomført en siste runde med innhenting av data. Formålet var å hente et datagrunnlag for maskinlæring. Forsøkene hadde veldig god spredning av ulike kombinasjoner med tiltak. Oppsettets formål var å gi best mulig grunnlag for å bygge en digital modell med få nødvendige forsøk. Alle delfelt blir testet med ulike typer tiltak. Noen forskjellige kombinasjoner er vist i figur 12. Gjennomsnittlig inneholder en modul et tiltak i 43% av forsøkene. Modulen som ble testet oftest var modul 5-3, som ble testet i 62% av forsøkene. Avrenningen leses av i hvert forsøk, og resultatene ble brukt som datagrunnlag for maskinlæring.

ID	OVER-FLATE	K [NOK]
1	Gate	0
2	IMP	0
3	PP	4
4	BC	10
5	TR	0
6	EGR	2
7	IGR	3



Figur 12: Ulike kombinasjoner av tiltak for testing.

2.3 – Gjennomføring og evaluering av undervisningsaktiviteter

Modellens pedagogiske effekt utforskes gjennom konkurranser med modellen. Ulike grupper fra bedrifter, høyskoler og universiteter blir presentert modellbyen og deltar i konkurransen. Besøkende var Asplan Viak AS, Norsk Institutt for Vannforskning (NIVA), Høyskolen i Østfold (HiØ) og vannstudenter fra NMBU. De besøkende blir delt inn i grupper på 3-5 personer og får i oppgave å plassere overvannstiltak i byen, for mest mulig redusert avrenningsvolum billigst mulig. Dette måles som kost/nytte med enhet $[m_{\text{redusert}}/\text{NOK}]$. Før gruppens løsninger blir testet, kjøres et forsøk uten tiltak for å gi en referanseverdi. Kost/nytte er redusert avrenningsvolum per krone, i forhold til referanseverdiene. Målet med konkurransen i praksis er å evaluere hvordan modellbyen fungerer i undervisningssituasjon.

Opplevelsen deltagerne hadde med modellbyen og konkurransen ble kartlagt etter besøkene med en spørreundersøkelse. Det var en kort undersøkelse med 5 spørsmål, der spørsmål 3 og 4 var langsvarspørsmål mens resten var flervalgsspørsmål.

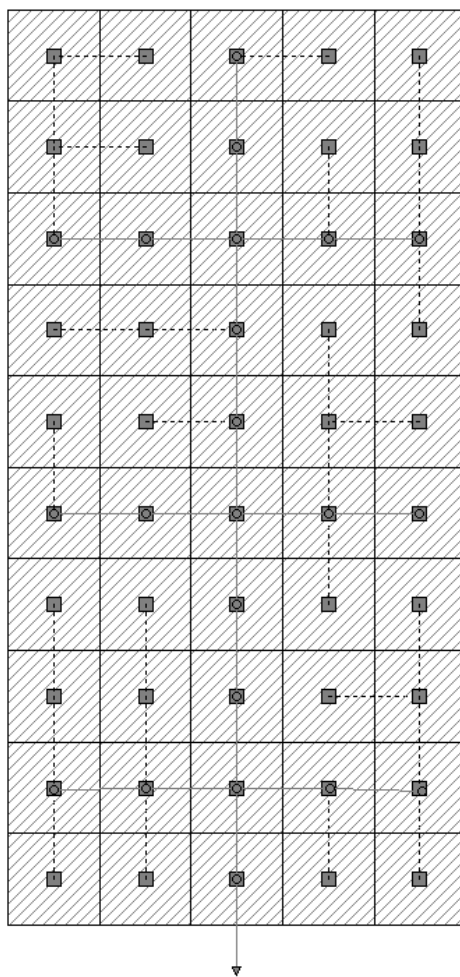
- 1) Hvor godt blir overvannsproblematikk formidlet?
- 2) Hvor godt blir effekten av overvannstiltak formidlet?
- 3) Hva fungerer godt med modellen/konkurransen?
- 4) Hva kan forbedres med modellen/konkurransen?
- 5) Hvor godt egnet er modellen til overvannsundervisning?

Formålet med undersøkelsen var å få innblikk i hvordan modellen oppfattes i bruk, og for å innhente ideer til videre utvikling. Hvordan modellen oppleves for personer som ikke har brukt modellen tidligere

er svært viktig å få oversikt over. Modellen bør oppfattes intuitiv og interessant fra første test, og man skal forstå hvordan man bruker nedbørssimulatoren og modellen tidlig.

2.4 - Den digitale modellen

Det utvikles en digital modell i analyseprogrammet SWMM (Storm Water Management Model) (EPA, 2023). Modellen skal etterligne by-modellen så godt som mulig. Det er viktig at effekten av tiltak i modellen, samt lekkasje fra tette flater, påvirker avrenningen likt som i by-modellen. Forholdet mellom total nedbør og avrenning (volum-avrenningskoeffisienten) må derfor stemme med resultatene fra nedbørssimulatoren.



Figur 13: Konstruert SWMM-modell.

2.4.1 - Metode for bygging av SWMM-modell

En SWMM-modell med 50 delfelt og ledningsnett tilsvarende den fysiske modellen ble laget, som vist i figur 13. Hvert delfelt tilsvarer en modul i den fysiske modellen, og avrenningen har lik retning som i by-modellen. Modellens utløp ("Outlet" node) tilsvarer utløpet til den fysiske modellen. Det er i denne noden hvor avrenningen fra hele modellen måles. Ettersom SWMM ikke er egnet til å beskrive situasjoner med små størrelser som i by-modellen, bygges modellen med skalering på 1:100. Alle delfelt har et areal på 0,04ha og en bredde (Width) på 20m. Arealet til delfelt 3-1, bygget hvor kjelleren er plassert, fikk et areal på 0. Årsaken er arealets manglende avrenning til ledningsnettet.

Som følge av skaleringen på 1:100 ble skalering i tid og nedbørsvolum nødvendig. Nedbørshendelse med konstant intensitet på 331,1mm/t og varighet på 60 minutter ble brukt. Dette tilsvarer nedbørmengden brukt i nedbørssimulatoren. Indre diameter på ledningsnett settes til 1000mm. Formålet med dimensjoneringen var å hindre oversvømmelse i noder (node flooding) i SWMM- modellen. Helning settes til 1%. Delfelt settes til 100 % impermeabelt og manningstall på 0,5.

Simuleringene gjennomføres med 1 minutt tidsoppløsning, 10s routing step og dynamisk bølgelikning. Simuleringsvarigheten er 120 minutter så all avrenning når utløpet i den digitale modellen. Volumetriske avrenningskoeffisient beregnes som volum tilført utløpet dividert på nedbørsvolumet $[V_{\text{tilført}}/V_{\text{nedbør}}]$.

Så lenge kun volumetriske avrenningskoeffisienter betraktes, og ikke hydrogrammer, så er enkelte verdivalg vilkårlig; eksempelvis helning, Manningstall n , nedbørintensitet og nedbørvarighet.

2.4.2 - Metode for kalibrering og validering av SWMM-modell

SWMM-modellen kalibreres og valideres med datagrunnlaget fra de kontrollerte testene beskrevet i delkapittel 2.2.3.

Kalibreringen blir gjort ved hjelp av Global Optimalisering med Differensiell Evolusjon, eller GODE. (Brownlee, 2021). GODE benytter en optimaliseringsalgoritme kalt Differential Evolution, og er inspirert av naturlig utvalg. Fremgangsmåten til algoritmen er at en populasjon av løsninger blir generert tilfeldig. Det blir i tillegg generert andre løsninger, kalt forsøksvektorer, som opprettes ved å kombinere og modifisere eksisterende løsninger gjennom en mutasjonsoperasjon. Forsøksvektorene kombineres med den opprinnelige populasjonen gjennom en krysningsoperasjon, for å utveksle informasjon mellom forskjellige løsninger. En ny populasjon blir så valgt ut basert på kvaliteten på løsningene. Dette gjøres ved hjelp av en fitness-funksjon, som evaluerer hvor godt en gitt løsning løser optimaliseringsproblemet.

Prosesen blir gjennomført iterativt frem til et avslutningskriterium er oppnådd, eksempelvis et maksimalt antall iterasjoner.

Gropmagasinering for overflatetypene samt lekkasje fra ledningsnett (conduit seepage rate) defineres som kalibreringsvariabler. Den digitale modellen simulerer ikke forsinkelsen i vannføring, men reduksjonen i avrenningsvolum. Dette vurderes tilstrekkelig da effekten av tiltakene her begrenser seg til hvor mye vann tiltaket fjerner fra den totale avrenningen.

De prediktive egenskapene til SWMM-modellen måles gjennom *midlere absolutt avvik* (mean absolute error). *Midlere absolutt avvik* beregnes for simulerte og observerte verdier for volumetriske avrenningskoeffisienter. Kalibreringsvariabler endres slik at *midlere absolutt avvik* minimaliseres. Videre valideres modellen, gjort ved testing av modellen for observasjoner som ikke benyttes til kalibrering av modellen. Datasettet for validering utgjorde 20 % av det totale datasettet og velges tilfeldig.

2.4.3 Metode for multiobjektiv optimalisering av modellen

For å gjennomføre en multiobjektiv optimalisering brukes NSGA-II, eller “Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II”. (pymoo, 2020) NSGA-II bruker genetiske algoritmer for å finne løsninger som representerer optimale kompromisser mellom flere motstridende mål. Genetiske operasjoner simulerer naturlig utvalg og bruker seleksjon og mutasjon for å finne bedre løsninger. Løsninger blir rangert ved hjelp av en teknikk som kalles “non-dominated sorting” og baseres på pareto-dominans. Pareto-dominans er et konsept som sier at en løsning er bedre enn en annen løsning dersom den er bedre på minst ett mål og ikke dårligere på noen andre mål.

Multiobjektiv optimalisering kjøres for validert SWMM-modell. Objektene defineres som:

1. Totalkostnad
2. Volumetrisk avrenningskoeffisient

Objektene forsøkes å holdes lavest mulig.

Variablene i analysen utgjorde plassering, type og antall tiltak i modellen (totalt 28).

Paretofronter utarbeides for ulik fordeling av kostnader per tiltakstype. Formålet er å finne fordelingen av kostnader for mest effektive tiltak og tiltakenes plassering til lavest mulig kostnad. Et eksempel er hvis kostnaden for regnbed settes for lavt foretrekkes alltid regnbed, da det gir størst effekt.

2.4.4 Programvare

Programmering utført i Python. (Python, 2023) Der brukes følgende program-pakker:

- 1) Numpy: (NumPy, 2023)
- 2) Pandas: (pandas, 2013)
- 3) SWMM_api: (Pichler, 2023)
- 4) Scipy.optimize (scipy, 2023)
- 5) Pyplot: (matplotlib, 2023)
- 6) Time: (python, 2023)
- 7) Pymoo: (pymoo, 2022)

Ved kalibrering via Global optimization via differential evolution (GODE) benyttes *popsiz*e på 10 og *maxiter* på 10. *Popsiz*e representerer antall alternativer for hver celle i modellbyen. *Maxiter* er antall beregninger av alle alternativene kombinert.

Ved multiobjektiv optimalisering via NSGA-ii benyttes en populasjon på 100 og 30 generasjoner.

3 - Resultater og diskusjon

3.1 Forbedring av fysisk modell

Delspørsmål 1 defineres som “Hvordan kan bymodellen forbedres slik at tiltakene får høyere effekt for å holde tilbake nedbør?” Dette er en utfordring som har mange ulike løsninger. Først gjennomføres mange tester, så kartlegging av modellens funksjoner belyses. Vi lærer her hvordan systemet fungerer, og vi ble kjent med modellbyen. Gjennom testing av nedbørsmengder, lekkasjesøking og vanlig drift av modellbyen, fant vi ulike problemer og forbedringspotensialer ved modellen.

3.1.1 Hva er lekkasjeandelen før gjentetting?

Ledningsnettets kan forbedres ved å redusere lekkasjen i ledningsnettets. Testene gjøres ved å helle målt mengde vann i innløpet øverst i ledningsnettets, se figur 4. Vannet helles til ledningsnettets er fullt. Fordi vannet helles raskt, ble hele ledningsnettets fylt og samtlige koblinger viste lekkasje. Ikke noe rant ut fra slukene. Altså stammer all lekkasje i ledningsnettets fra koblingene. Etterpå måltes mengde vann ut av ledningsnettets. Differansen mellom tilført vann og målt utløp definerer lekkasjeandelen.

Lekkasjeandelen er avhengig av strupingen på utløpet. Dette er på grunn av at høy struping forårsaker stående vann i ledningsnettets og vann lekker ut i skjøtene. Ved 0 grader [°] struping er lekkasjeandelen ca. 35%, og ved struping på 55° øker den til 48%.

På grunn av direkte tilførsel av vann øverst på ledningsnettets, ble det sannsynligvis andre resultater enn ved bruk av nedbørssimulatoren. Nøyaktig hvor mye vann nedbørssimulatoren slipper på nettet og ved hvilken intensitet, er vanskelig å vite. Lekkasjetesten tilførte mer vann til nettet enn ved ordinær testingen, så ledningsnettets fylles mer. Vi forutsetter derfor en lavere lekkasje i ledningsnettets ved forsøkene.

3.1.2 - Årsaken til lekkasjen

Den største andelen av lekkasje kommer fra koblingene mellom rør og slukene. De er 3D-printet, og rørene er grovt tilpasset slukene. Rørene sitter relativt løst i slukene, og vann trenger ut. Koblingene ble limt sammen med TEC7. Etter rørene var tettet ble nye lekkasjeforsøk gjennomført.

Der ledningsnettets møtepunkter til "veggene" i modellen, tettes det med gaffateip. Vannlekkasje i vegg-skjøtene er ikke observert, men mulig i små mengder. Bymodellen heller inn mot midten, slik at det kun står vann ut til "veggene" dersom det er mye vann i ledningsnettets. Det er grunnen til at lekkasje fra veggene neglisjeres.

Overgangene mellom modulene er ikke tettet. Disse overgangene holder vannstrømmen intakt mellom modulene, men sitter løst. Permanent montering av denne delen ønskes ikke, da det låser ledningsoppsettet.

Kjellermodulen lekker mye i begynnelsen og er tettet med dårlig lim, så det lekker fra sprekker mellom vinduet og bygningen. Ledningsnettets inngang i bygget lekker og ved store oversvømmelser i kjelleren renner vann ut her.

3.1.3 - Effekten av gjentetting av rør-modulene

Etter tetting internt i hver modul, reduseres lekkasjen fra 48% til ca. 25%. Det utgjør en halvering. En stor del av den resterende lekkasjen kom fra den nederste bygningen, der årsaken er gammel og dårlig lim. Nye tester uten bygningen ble gjennomført. Det ga lekkasje på ca. 16%.

3.1.4 - Effekten av gjentetting mellom modulene

Det ble drilllet hull rundt hullene til ledningsnettets. Modulene ble skrudd sammen med bolter og muttere, vist i figur 14. Rundt rørstumpene mellom modulene ble det plassert en gummipakning. Skruer og muttere holder modulene sammen. Modulveggene bøyde seg mye i starten og veidekkene satt løst på toppen av modulen. Dette skyldes at pakningene på midten av modulveggen var for tykke og tok for stor plass. Skrueskiver settes inn rundt boltene mellom modulene for å redusere veggbyggingen.



Figur 14: Lekkasje-reducerende tiltak, som liming av rørkoblinger og skru sammen moduler.

Effekten av tiltaket var stor. Lekkasje reduseres fra ca. 25% til 10% når strupingen var på 55°, og 15% til 5% for åpen strømming.

3.1.5 - Den totale lekkasjereduksjonen

For 55° struping falt lekkasjen i ledningsnettets fra 48% til 10%, altså 79,2% reduksjon.

For åpen strømming falt lekkasjen fra 35% til 5%, altså 85,7% reduksjon. Reduksjonen er lekkasje fra ledningsnettets, og representerer ikke lekkasjereduksjonen med hele bymodellen i drift. Lekkasje fra sprekker i planet til modellbyen ble ikke redusert. Videre måtte byen bli satt opp igjen og teipet sammen, og nye tester utføres slik at den nye tilstanden til modellbyen måles.

Tester gjort før byen ble forbedret, viser lekkasjeandelen uten struping på 45% (Skjeseth, 2023). Med hele byen montert, målt lekkasjen av total nedbør på byen og vannføringen ut av byen. Nedbør-simulatoren gir en nedbør på 11,09l. Ut av ledningsnettets kom i snitt 8,1l ved 0% struping. Total lekkasje ved regnhendelse tilsvarer 26%. Lekkasjen økte ikke mye før vi strupte til 65%, hvor 7l rant ut av røret. Dette ga lekkasje på 37%.

3.1.6 - Hvor mye nedbør skal modellen håndtere?

Nedbørstester gjennomførtes for maskinen med og uten sidevegger, vist i figur 15. Hensikten til veggene er å fjerne vann som spruter ut av modellbyen. Veggene gir mer stabil nedbørsmengde, og hindrer vann på gulvet.

Fire tester gjennomføres. Først ble gjennomført to tester i nedbørssimulatoren uten byen til stede. Senere ble det testet med byen til stedet. Det ble testet med og uten veggene, både for tom simulator og med byen til stedet. Alt av nedbør til platen veies. Vi lot pumpen gå i 60s. Vi ventet 90s før vi leste av avrenningen.

Uten modellbyen er forskjellen på mengden avrenning liten. Årsaken er at platen modellbyen står på har lave sideplater som håndterer spruten godt. Variasjonen i avrenningen gikk litt ned, men gjennomsnittet var omtrent likt. Uten byen var avrenningen gjennomsnittlig 11,07l.

Så testes det med byen til stedet, og sideveggenes effekt ble målt. Gjennomsnittlig avrenning uten vegger kom på 10,6l, og med vegger 11,1l. Dette er en 5% økning i avrenning, og indikerer at hver gang maskinen kjøres hindres fjerning av 0,5l vann.



Figur 15: Plastikk-veggene montert på siden av grunnflaten under regntaket.

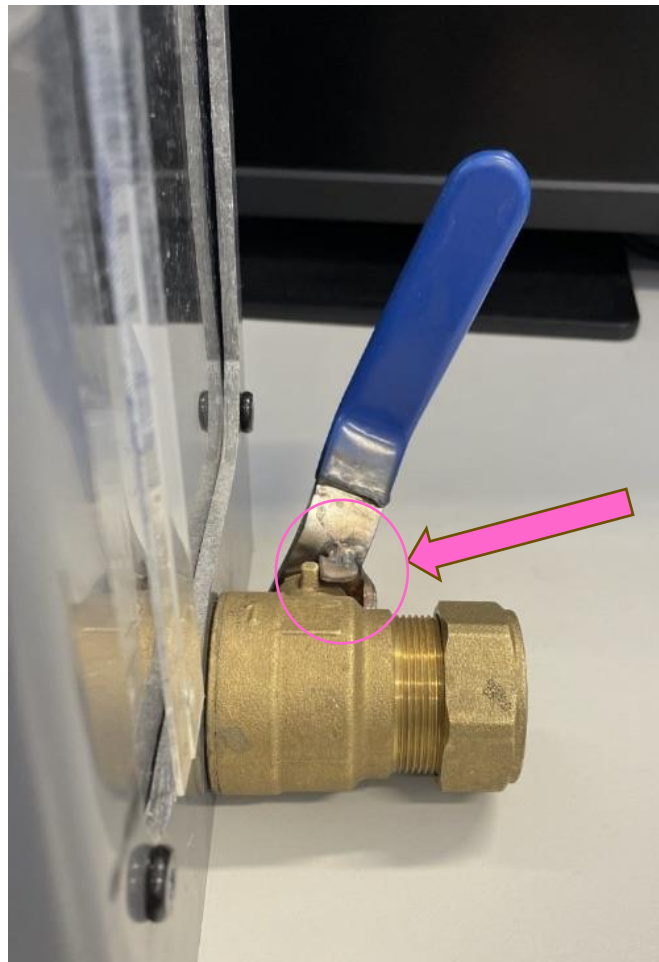
3.1.7 - Hva er usikkerheten?

Alle testene har usikkerhet i resultatene. Usikkerheten forsøkte vi å redusere så mye som mulig, men mange av usikkerhetsfaktorene er uunngåelige med dagens modellby.

Plassering og "tømming" av svamper gjøres manuelt. Eksakt lik plassering av svampene i kubene er umulig hver gang. Det kan ikke sikres at svampene blir vridd opp likt hver gang.

Svampene er laget for hånd, se figur 10. Noen av de har små rifter, andre er litt mindre og presses ikke ut til modulenes sidevegger like godt som andre. Vann trenger lettere gjennom noen av svampene. Det er trolig at man ved bare å bruke de lettest gjennomtrengelige svampene vil få et annet resultat enn ved bruk av bare de vanskelig gjennomtrengelige svampene.

Gjenstrupingen er vanskelig å sette likt hver gang. Det er litt bevegelse i selve ventilen, og det er vanskelig å se nøyaktig vinkel med en vinkelmåler. Dersom ventilen står uforstyrret, så er utgangspunktet for like verdier til stede. Av den grunn bør vinkelen bør stå urørt mellom forsøkene. Med kun en liten endring i vinkel, vil verdiene endres mye. En mulig løsning er endring av ventilen. Ventilen er en kuleventil med 0-90° struping. Med en fysisk hindring montert stopper ventilen ved en spesifisert vinkel forsikres strupingen identisk mellom hver gang, som vist i figur 16.



Figur 16: Ventilarmen etter sveising.

Tetningen endres mellom hver gang modelldelene tas fra hverandre og settes sammen igjen. Modulene teipes sammen og tettes med gaffateip. Vi har ingen måte å sikre identisk teiping hver gang. Likest mulige forhold sikres ved at testene gjennomføres rett etter hverandre. Ved fjerning av terrengflatene

må teipen rives av, og man kan påvirke teipen som tetter flatene rundt. Resultatet er at endring av byen vil kunne forandre tettheten i byen.

Pumpen pumper 0.19liter per sekund [l/s], noe som gjør at menneskelig feil ved start og stopp av pumpen har stor effekt. Dersom ulike personer styrer pumpen mellom testene vil det kunne påvirke pumpetiden på en måte som gjør at den vil endres. For å redusere usikkerheten, kan en framtidig løsning være en pumpe som kan programmeres til å jobbe i nøyaktig ett minutt.

Mengden nedbør ut av nedbørssimulatoren, samt hvor i simulatoren nedbøren kommer fra, kan endre seg over tid. Årsaken til dette er at kanylene i nedbørssimulatoren kanylene i regntakene utsettes for forurensning og kan tettes. Det observeres ulik vannstråle fra alle kanyler og noen er tette. På grunn av dette kan to tilsynelatende like delfelt ha forskjellig avrenning.

3.2 - Modellens evne til å formidle overvannsproblematikk

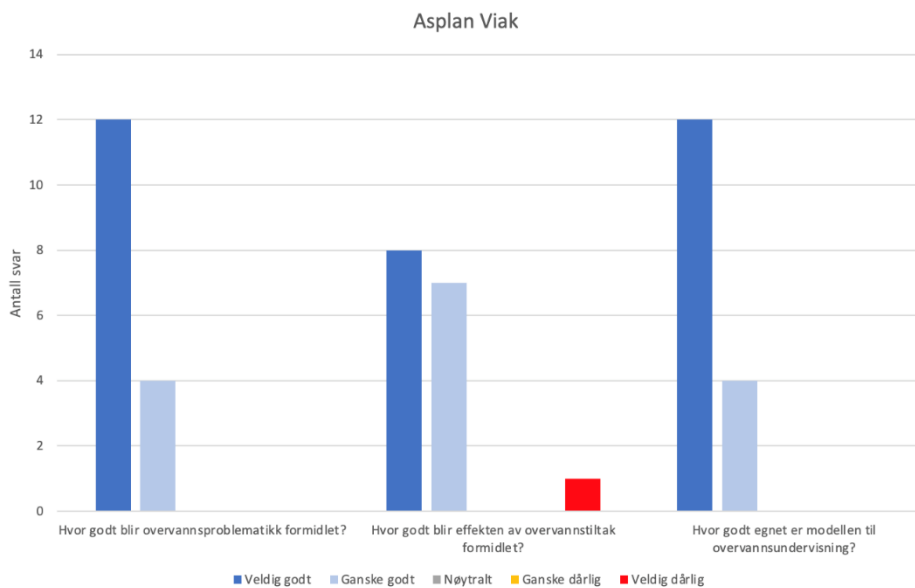
I delspørsmål 2 er ønsket vi å finne ut: "Hvordan oppleves bruk av modellen, og hvordan fungerer modellen til å formidle problemer om overvann?". Spørsmålet besvares ved å teste modellen på ulike grupper som skal gjennomføre en konkurranse med modellbyen. Etter endt besøk mottar deltagerne en spørreundersøkelse. På den måten kan vi motta tilbakemeldinger, og nye ideer til videre utvikling av modellen.

3.2.1 - Asplan Viak AS

Den 20. september deltok Asplan Viak AS i konkurranse med modellbyen. De besøkende ble delt inn i mindre grupper og fordelte tiltak selv. Alternative tiltak var intensive grønne tak, ekstensive grønne tak og regnbed. Flomdempende effekter og kostnader for de forskjellige tiltakene er forskjellige. De to måtene man kunne vinne på i konkurransen var enten ved å redusere mest mulig oversvømmelse, eller ved å få redusert mest mulig oversvømmelse med så lite kostnad som mulig. Dette er det første av flere besøkende, og erfaringene ble brukt til å veilede arbeidet videre.

3.2.1.1 - Læringsutbytte, tilbakemeldinger og forbedringspotensialer av Asplan Viak AS

Oversikt over svarene fra flervalgsspørsmålene vi stilte deltagerne følger nedenfor, se figur 17. Totalt kom det inn 16 svar. Nøyaktig antall deltagelse ble ikke registrert på grunn av gruppeinndeling, men 8 grupper på 3-4 personer var til stedet. Det viser at vi antar omtrent halvparten av deltagerne svarte på undersøkelsen.



Figur 17: Resultatene fra spørreundersøkelsen gitt til Asplan Viak AS.

De mest interessante svarene omhandler spørsmål om hva som fungerte og hva som burde forbedres. Da svarene ble gitt som fri tekst og ikke standardiserte svaralternativ, er det ikke mulig å tallfeste antall like svar. Svar med tilnærmet lik ordlyd ble vurdert som likt meningsinnhold. Hva som fungerer bra med modellen kom klart fram, og de aller fleste synes bruk og læringsutbytte var gøy. Det var mange som nevnte kostnadsbetraktningen som nyttig. Kost/nytte illustrert er spennende og vekker konkurranseinstinktet. Effekten av tiltak oppfattes tydelig og de besøkende engasjeres.

Viktigst for videre arbeid er spørsmålet om forbedringspotensialer. Et tema nevnt flere ganger er ventetiden mellom forsøkene. For å få oversvømmelse i kjelleren trengs høy struping, men høy strupingen krever lang på å tømme ledningsnett. Etter stoppet pumpe er ventetiden 3-4 minutter før neste gruppe kan starte. Ventetiden er kjedelig for deltagerne.

Manglende grunnvann og metningsgrad av grunnen nevntes som ønsket initialbetingelse. Noen mente planleggingstiden bør økes i forkant av konkurransen. Tettheten til bymodellen bør økes, blant annet ved hjelp av pakninger/tetning rundt modulene. Det ble nevnt at det kunne vært interessant å se hydrogrammene, slik at man kan se spissavrenningen og forsinkelsen som følge av tiltak.

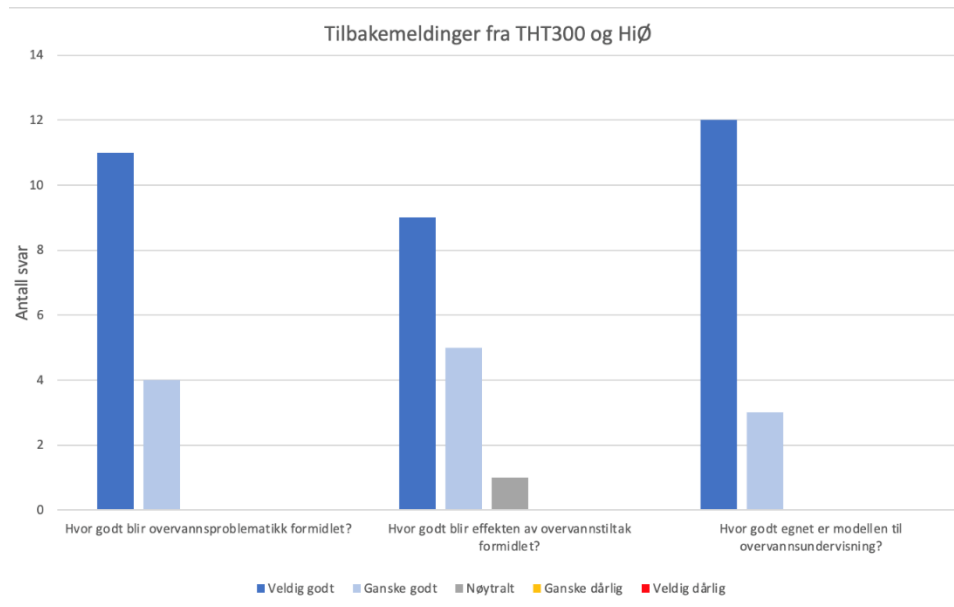
I etterkant tenker vi at oppbygningen av bymodellen bør forklares bedre før konkurransen. Det ble nevnt manglende informasjonsdeling om hva grøntakene og regnbedene faktisk er, og manglende forklaring om at regnbedene ikke fører infiltrert vann til ledningsnett. Flere alternative typer tiltak som grønne vegger for økt variasjon i utforming ble foreslått. Tilbakemeldingene foreslår også en forbedring av kostnadsbildet, ved muligheten til å tallfeste kostnaden på skadene forårsaket av kjelleroversvømmelsen. Dette kan eksemplifiseres med en konstant kostnad per mm oversvømmelse. Kostnadene for skadene sammenlignes med kostnadene for tiltakene, og ut ifra dette blir nytten beregnet.

Deltagerne fra Asplan Viak AS er fornøyde med bymodellen, og oppsummerer den som spennende og læringsrik. Den oppfattes som enkel å bruke. Engasjement for modellen og konkurransen kommer til uttrykk gjennom diskusjoner blant deltagerne. Flere av de nevnte forslagene til forbedring er vanskelige å gjennomføre. Ytterligere reduksjon av lekkasjen er krevende å få til. Forslaget om pakninger mellom modulene istedenfor teiping er forsøkt, men er ikke mulig med dagens by-utforming. Å ha grunnvann/metningsgrad som en initialbetingelse, har manglende effekt på oversvømmelse, siden vannet som renner ned i grunnen i vår modell ikke lekker inn i ledningsnett. Forslagene som ble tatt med videre er å redusere ventetiden, samt å legge til et nytt tiltak i konkurransen.

3.2.2 - THT300, NIVA og HiØ

Den 6. november kom flere deltagere for å prøve modellbyen. Den første gruppen var studenter fra NMBU som tok faget "THT300 - Planlegging og design av urbane vannsystemer". Sammen med studentene kom representanter fra NIVA. Senere samme dag var besøkende 3. klassestudenter fra HiØ.

Figuren under viser svarene fra flervalgsspørsmålene i undersøkelsen. Svarene fra begge besøkene er samlet. Det var 15 svar som kom inn av totalt 33 deltagere. Oppsummering er vist i figur 18.



Figur 18: Resultatene fra spørreundersøkelsen gitt til THT300 og HiØ.

3.2.2.1 - Læringsutbytte, tilbakemeldinger og forbedringspotensialer av THT300 og NIVA

Flere deltagere fra forrige besøk kommenterte lang ventetid mellom forsøkene. Det nevnes ikke av denne gruppen deltagere. Siden forrige besøk har vi endret strupeventilen slik at den kan åpnes og lukkes mellom hvert forsøk, og ledningsnettets tømmes raskere.

De fleste tilbakemeldingene vi fikk trakk fram at konkurransen var engasjerende. Mange av deltakerne likte konkurranse og opplegget. At man kan se effekten av tiltak med egne øyne, og ikke kun se avrenningsvolum på en skjerm ble verdsatt. Kost/nytte tilnærmingen trekkes fram som en smart løsning, for å få et mer realistisk perspektiv til tiltakene.

Det ble nevnt var at det virket som om løsninger med færre tiltak favoriseres. Disse løsningene med best kost-nytte vant, tross høy avrenning. Noen kommenterte ønske om å se bymodellen fysisk før tiltak blir valgt.

Tiltakene ble plassert strategisk av deltagerne. Feltene med avrenning fra flere felt ble valgt, og større nedbørsareal dekkes dermed. Deltagernes forkunnskaper er tydelige, og de har diskutert og forstått oppgaven godt.

3.2.2.2 - Læringsutbytte, tilbakemeldinger og forbedringspotensialer av HiØ

Kommentarene fra spørreundersøkelsen er positive. Mange av deltakerne visste ikke hvordan grønne tak fungerer, og noen nevnte at de likte å få se teori i praksis. Å få en forklaring om hvilke løsninger som er mest lønnsomme trekkes fram av flere. Dette manglet vi tall for ved besøket, og bestemmes av vår kostnadsfordeling bestemt i delkapittel 3.3.2.

3.2.3 – Oppsummering av tilbakemeldinger fra konkurransene

Etter besøk fra Asplan Viak AS, HiØ, NIVA og NMBU, har vi hatt over 60 besøkende. Vi har fått 31 tilbakemeldinger fra spørreundersøkelsen, samt kommentarer og samtaler under konkurransene. Dette har gitt et godt inntrykk av hvordan modellbyen blir oppfattet. Tilbakemeldingene var nesten utelukkende positive. Det kom mange tilbakemeldinger om hvor engasjerende modellbyen var å jobbe med. Å selv plassere ut overvannstiltak og se effekten på avrenningen, ble vurdert som interessant.

Flere deltagere ga konstruktiv kritikk og ideer til videre arbeid. Endring av ventil-armen til å kunne åpne og lukke likt hver gang for å redusere ventetiden, var en forbedring som kom etter kommentarer fra den første konkurransen. Effekten av dette var at ingen kommende grupper kommenterte ventetiden, og at deltagerne ble enda mer engasjerte.

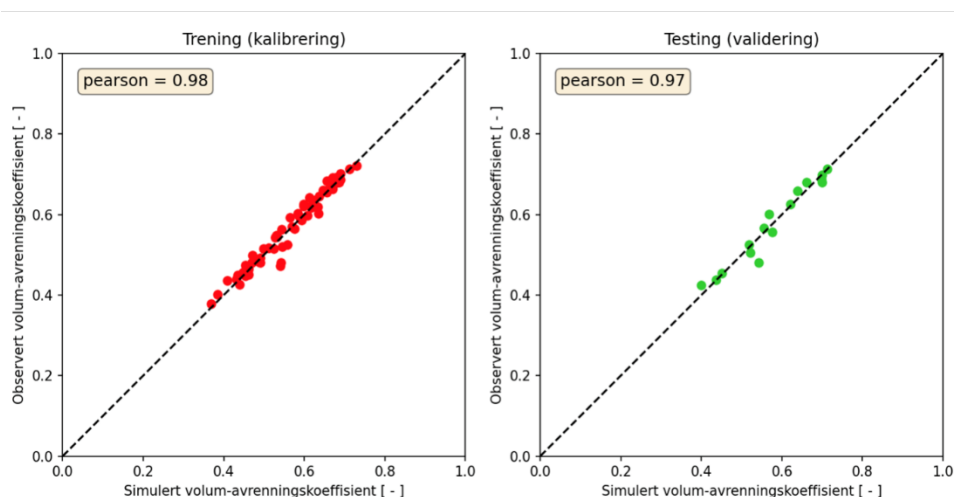
Det finnes ytterligere ideer det ikke har blitt jobbet med, men som kan utvikles i framtidig arbeid med modellbyen. En av årsakene til å implementere overvannstiltak er å redusere skader på bygninger og infrastruktur. Kostnaden til å reparere skader kan derfor bli sett opp imot kostnaden til tiltakene. Ved hjelp av en strømningsmåler kan man se effekten tiltakene har på avrenningsmengde og hvordan avrenningen forsinkes. Flere deltagere etterspurte bedre informasjon om oppbygning av modellbyen og hvordan tiltak fungerer før konkurransen. Dette er noe som kan forbedres i nye konkurranser.

3.3 – Multi-objektiv optimalisering av digital modell

Delspørsmål 3 er definert som “Hvordan videreutvikle et undervisningsopplegg tilknyttet modellen som viser anvendelse av maskinlæringsmetoder?”.

3.3.1 - Resultater fra maskinlæring

Via kalibreringen undersøker SWMM-modellen hvilke koeffisienter som passer. De valgte verdiene på variablene ga svært gode tall som vist i figur 19, jfr. “pearson = 0,98” der 1,00 er ideelt. Deretter testes de gitte koeffisientene for SWMM-modellen via validering. På grunn av usikkerhetene i bymodellen er det svært vanskelig å få en modell som kan simulere helt riktige verdier. Pearson-verdi lik 0,97 betyr at de kalibrerte verdiene gir en modell som stemmer veldig godt med virkeligheten.



Figur 19: Kalibrering og validering av SWMM-modellen.

Tabell 2 under viser de ulike verdiene etter kalibrering. Verdien ϕ er tiltakets volumavrenningskoeffisient, det vil si forholdet mellom avrenning fra byens utløp, og tilført nedbør. En negativ ϕ , som permeable dekker (PP) i tabell 2, betyr at tiltaket håndtere mer vann enn mengden nedbør tilført arealet.

Tabell 2: De endelige verdiene etter kalibrering

Tiltakstype	Konfigureringsvariabel	Verdi etter kalibrering	Min	Max	phi
Gate	Gropmagasinering [mm]	85	0	100	0.74
Impermeable dekker	Gropmagasinering [mm]	94	0	100	0.72
Permeable dekker	Gropmagasinering [mm]	364	0	1324.4	-0.10
Svarte tak	Gropmagasinering [mm]	32	0	100	0.90
Ekstensive grønne tak	Gropmagasinering [mm]	116	0	331.1	0.65
Intensive grønne tak	Gropmagasinering [mm]	165	0	331.1	0.50
Rør	Seepage rate [mm/t]	655	0	1000	-0.98


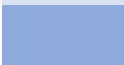
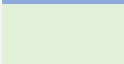

3.3.2 - Paretofront

Etter validering av SWMM-modellen testes nye og ikke tidligere prøvde kombinasjoner av tiltak. Et stort antall mulige oppsett av modellbyen undersøkes, og optimale løsninger ble funnet. Disse optimale løsningene er kombinasjonene av tiltak som reduserer avrenningen mest for gitte kostnader av tiltakene.

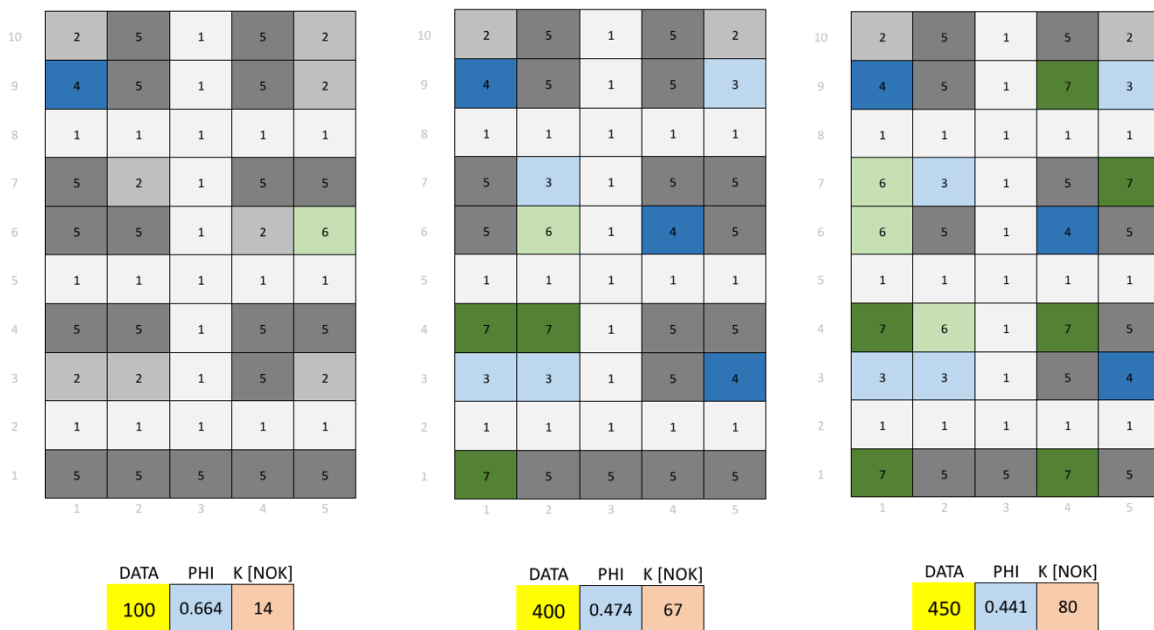
Kostnaden til tiltakene er variable. Å bruke en virkelighetstro kostnad på regnbed eller grønne tak gir ikke nødvendigvis en god kostnad på tiltak i modellbyen. Effekten av tiltakene i modellbyen varierer fra virkeligheten. Det gjør sammenligning av pris vanskelig. Kostnad settes derfor etter hvor stor effekt de har på avrenningen, og ikke hvor mye tiltakstypen koster i virkeligheten.

Det ble valgt en kostnadsfordeling som ga en god fordeling av tiltakstyper i de optimale løsningene, vist i tabell 3. Vi ønsket flere typer effektive tiltak slik at ideelle løsninger ikke er åpenbare. Eksempelvis hvis regnbed og intensive grønne tak blir for billig ser deltagere lettere de optimale løsningene, og foreslåtte løsninger blir for like. Derfor ble det valgt en kostnadsfordeling slik at optimale løsningene har en god spredning av ulike tiltakstyper. Figur 20 under viser noen av de optimale løsningene funnet.

Tabell 3: Kostnadsfordelingen til de ulike tiltakene

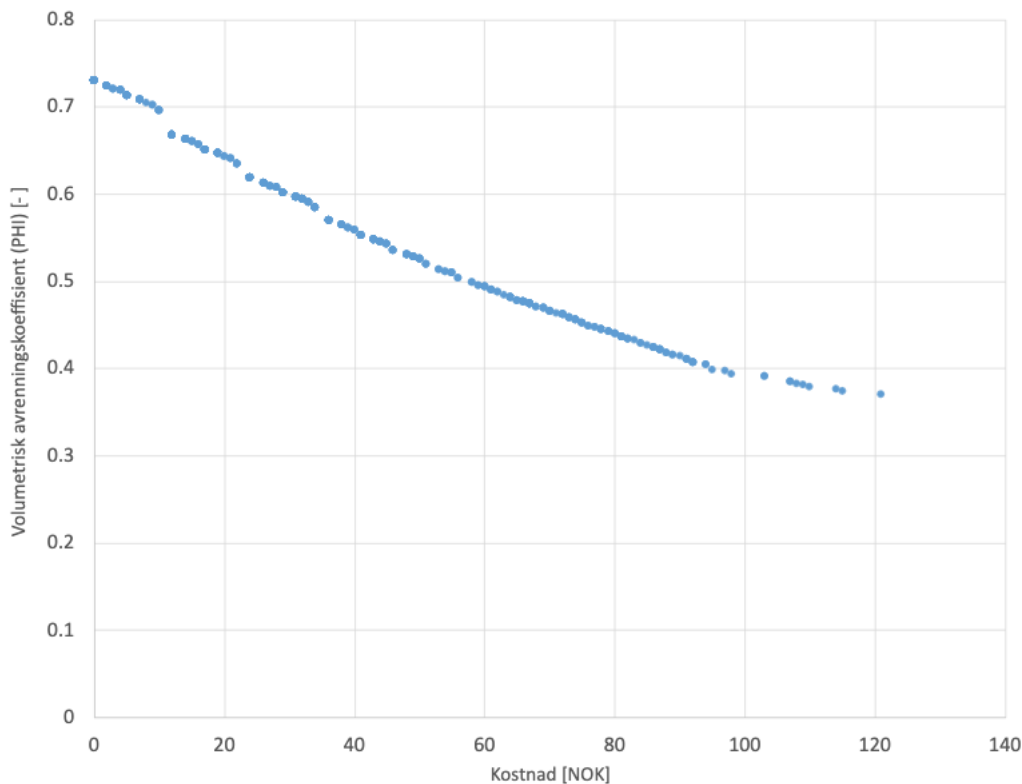
Tiltakstype	Kostnad	Fargekode
Permeabelt dekke	5 kr	
Regnbed	12 kr	
Ekstensivt grønt tak	2 kr	
Intensivt grønt tak	3 kr	

Impermeable dekker og vanlige hustak er vist som grå, og veiene er hvite.



Figur 20: Noen optimale løsninger

Den kalibrerte modellen forstår tiltakenes effekt godt. Den kalibrerte modellen lærte hvilke delfelt som får mest ut av ulike tiltak. De optimale plasseringene til regnbedene velges. Felt 1-9 er det første regnbedet som blir brukt. Dette er den beste plasseringen til regnbed, fordi det håndterer alt nedbør fra 4 delfelt. Så velges delfelt 4-6 og 5-3, som tar hånd om 3 delfelt hver. Intensive grønne tak og permeable dekker favoriseres ikke. Har deltagerne lavt budsjett, er regnbed og ekstensive grønne tak mest effektivt. Ved større budsjett vil det brukes alle tilgjengelige tiltakstyper.



Figur 21: Paretofronten som ble funnet av maskinlæring.

3.3.3 - Testing av optimal løsning i modellbyen

Modellens forbedrede nøyaktighet ble undersøkt. Utvalgte simulerte optimale løsninger ble testet for å se om de er de beste løsningene i virkeligheten.

Tabell 4 viser resultatene fra forsøkene. Både den reduserte avrenningen og kost/nytte sammenlignes. Med unntak av de første to testene, er forskjellen mellom simulert og observert kost/nytte under 15%. Det er stor variasjon i resultatene. Enkelte observerte resultater gir høyere kost/nytte enn simulert.

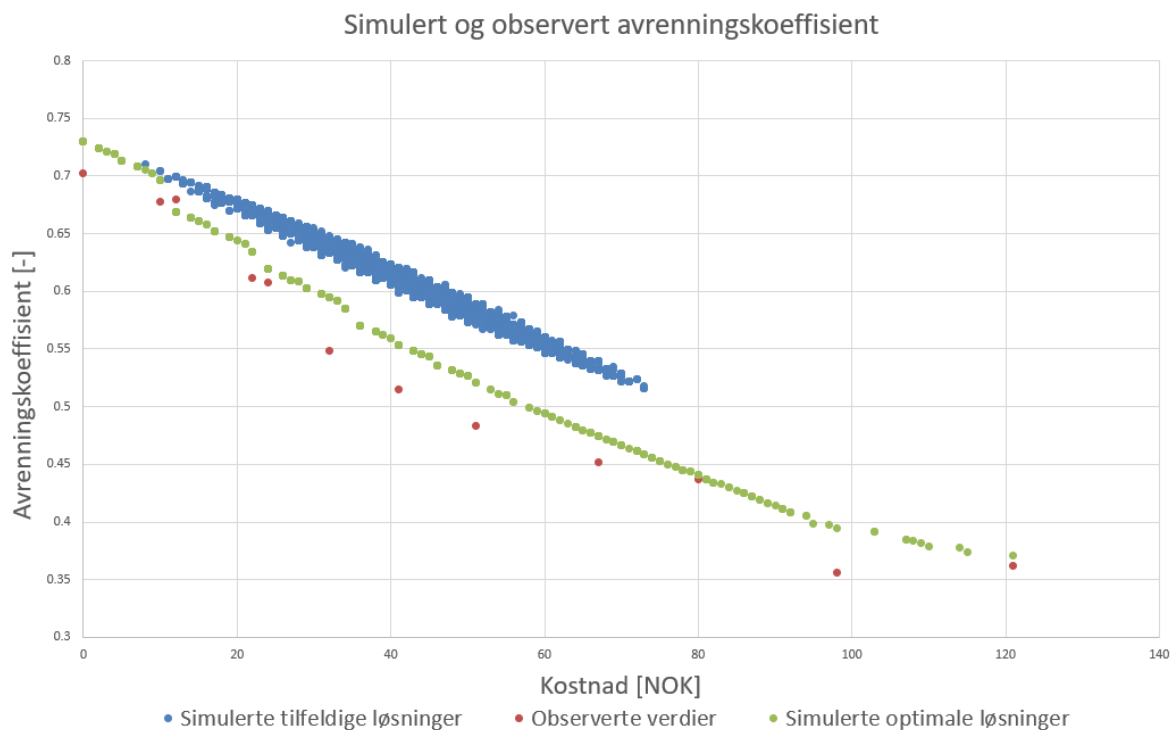
Årsaken til de store variasjonene var usikkerhetene nevnt i delkapittel 3.1.7. Faktoren som utgjorde størst usikkerhet er trolig den menneskelige feilen ved bruk av pumpen. På grunn av manglende innstilling til nøyaktig 60s utgjør små forskjeller i pumpetid mye for vannmengde fra nedbørssimulatoren.

Tabell 4: Sammenligning av simulerte og observerte resultater.

<i>Kostnad [NOK]</i>	<i>Observert reduisert avrenning [ml]</i>	<i>Simulert reduisert avrenning [ml]</i>	<i>Observert kost/nytte [ml/NOK]</i>	<i>Simulert kost/nytte [ml/NOK]</i>	<i>Avvik [%]</i>
10	279	373	27,9	37,3	25,3%
12	260	679	21,7	56,6	61,7%
22	1016	1052	46,2	47,8	3,4%
24	1060	1222	44,2	50,9	13,3%
32	1070	1493	53,4	46,7	14,5%
41	2084	1952	50,8	47,6	6,7%
50	2440	2240	48,2	44,8	8,8%
67	2790	2818	41,6	42,1	1%
80	2944	3191	36,8	39,9	7,8%
98	3847	3700	39,3	37,8	3,9%
121	3776	3955	31,2	32,7	4,5%

Selv om ingen av forsøkene ga helt like verdier, estimerer modellen virkeligheten godt. De fleste forsøkene ga avrenning innenfor 200 milliliter [ml] fra simulerte avrenninger. 200ml tilsvarer et sekund med nedbør fra nedbørssimulatoren, så feilen forklares med avvikende pumpetid.

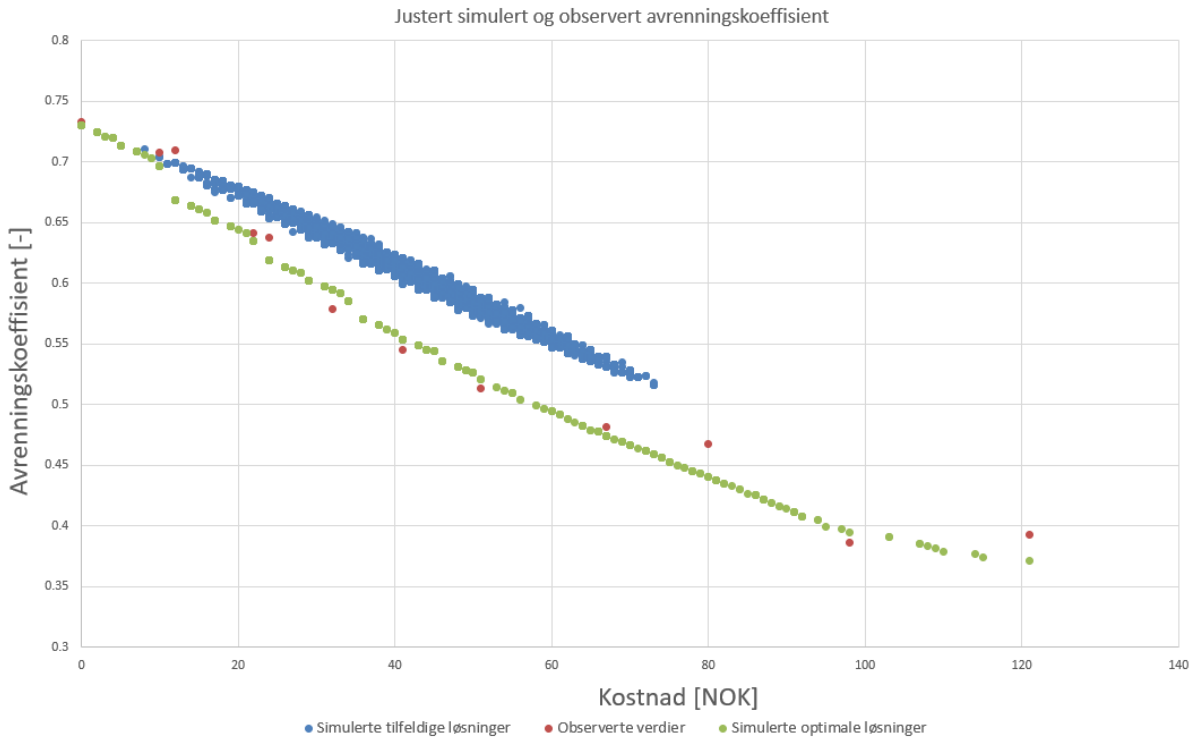
Figur 22 under viser avrenningskoeffisienten til et utvalg på 100 000 simulerte løsninger. Dette utvalget er en liten andel av alle mulige løsninger. Gitt 28 delfelt med 3 ulike overflater får man totalt $3^{28} = 2.3 * 10^{13}$ ulike løsninger. Sammen med de tilfeldige løsningene vises den teoretiske paretofronten og de simulerte optimale løsningene. Forsøkene fra tabell 5 vises på samme graf. I figur 22 er avvikene fra de observerte og simulerte optimale løsningene til tider store. Årsaken til avviket er at den avleste verdien er avrenningskoeffisienten, og ikke redusert avrenning. Flere uker etter datagrunnlaget til modellen innhentes ble de observerte verdiene funnet. Dermed var initialbetingelsene til modellbyen endret. Tettheten i flatene var redusert på grunn av løsere teip, slik at den totale avrenningen var mindre.



Figur 22: Simulert og observert avrenningskoeffisient

Figur 23 under viser de samme forsøkene som figuren over, men de observerte verdiene er justert. Alle observerte avrenningskoeffisienter er økt med 0.03. Dette tilsvarer økningen i lekkasje mellom datagrunnlaget ble hentet inn til de siste testene ble gjennomført. Her ligger mange av forsøkene veldig nærme paretofronten, og differansen mellom optimale og tilfeldige løsninger er stor.

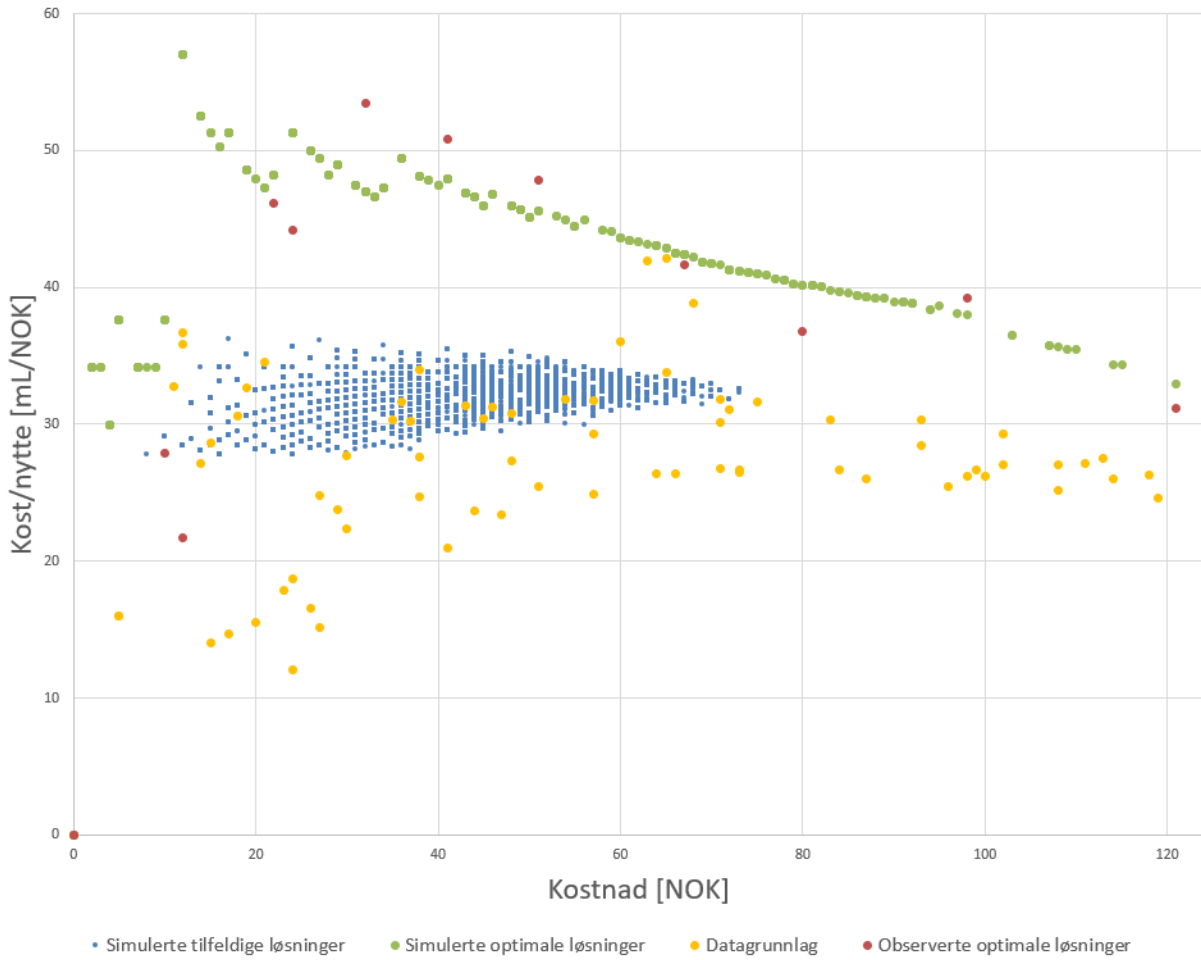
På grunn av usikkerhetene i modellbyen og nedbørssimulatoren, er det vanskelig å få helt nøyaktige verdier. Usikre initialbetingelser gjør det vanskelig å konkludere hvor godt maskinlæring fungerer. Resultatene viser tydelige tegn på at de optimale løsningene funnet fra modellen samsvarer svært godt med løsninger i den fysiske modellen.



Figur 23: Justert simulert og observert avrenningskoeffisient

Figur 24 under viser kost/nytte for simulerte og observerte forsøk. Her er det lagt inn kost/nytte for forsøkene som la datagrunnlaget for maskinlæring. Figuren viser tydelig spredning i kost/nytte for ulike tilfeldige løsninger, og at de optimale løsningene testet i nedbørssimulatoren har bedre kost/nytte enn de fleste forsøkene fra datagrunnlaget. Dette gir grunn til å mene at løsningene foreslått av modellen faktisk er de beste, og at modellen dermed er kalibrert godt.

Simulert og observert kost/nytte



Figur 24: Simulert og observert kost/nytte

4 - Konklusjon

1. Hvordan kan bymodellen forbedres slik at tiltakene får høyere effekt for å holde tilbake nedbør?

Modellbyen ble endret på følgende måter. Først ble lekkasjer redusert, slik at vannføringen ut fra utløpet økte. Lekkasjeandelen i ledningsnettets med åpent utløp ble redusert fra 35% til 5%. Med strupet utløp reduseres lekkasjen fra 48% til 10%. Lekkasjen ble redusert ved å lime sammen rørdelene i modulene og ved å feste by-modulene tett sammen med skruer, mutre og pakninger. Lekkasjen ut fra nedbørssimulatoren ble redusert med 0,5l med sidevegger som hindret at nedbør sprutet ut av modellen.

Vi introduserte to nye overvannstiltak under arbeidet med modellbyen. Da vi overtok modellbyen var det kun to typer tiltak, grønne tak og regnbed. Vi la til intensive grønne tak som et alternativ til intensive grønne tak. Vi lagde permeable dekker som alternativ til regnbed og impermeable dekker. Antall ulike kombinasjoner av tiltak for modellbyen økte betraktelig.

Utløpsventilen var helt fri. Det ga ulik struping hver gang vinkelen ble endret. En fysisk stopper sveises på, slik at vinkelen til strupingen er lik hver gang den lukkes. Dette avkortet ventetiden i forsøkene, fordi ledningsnettets nå tømmes raskere. Denne forbedringen gjorde at den siste konkurransen hadde mindre venting, og ingen deltagere nevnte ventetiden som noe negativt på spørreundersøkelsen.

2. Hvordan oppleves bruk av modellen, og hvordan fungerer modellen til å formidle problemer om overvann?

Etter besøkene fra Asplan Viak AS, NIVA og studenter fra HiØ og NMBU fikk vi mange tilbakemeldinger på modellbyen. Den generelle oppfatningen var at deltakerne opplevde modellen som interessant og morsom å jobbe med. Majoriteten av tilbakemeldingene var positive. Vi fikk flere konstruktive tilbakemeldinger, hvor flere ble brukt til å forbedre modellen. De viktigste forbedringene var å redusere ventetiden ved hjelp av ny ventil-løsning og å introdusere flere tiltak. Det nye tiltaket ble ikke testet i en konkurranse, ettersom tiltaket ble ferdigstilt etter det siste besøket. Flere tilbakemeldinger gjaldt ønske om bedre forklaring på hvordan tiltakene fungerer. Til videre arbeid i undervisning bør tiltakenes virkemåte bli beskrevet mer nøyaktig til deltagerne.

3. Hvordan videreutvikle et undervisningsopplegg tilknyttet modellen som viser anvendelse av maskinlæringsmetoder?

En SWMM-modell ble utviklet ved hjelp av maskinlæring. Strukturert og systematisk testing av flere kombinasjoner av tiltak ga et datagrunnlag som gjorde det mulig å kalibrere modellen troverdig i forhold til den fysiske modellen. Etter kalibrering fulgte validering, og modellens resultater stemte godt med virkeligheten. Modellen ble testet på veldig mange ulike oppsett av modellbyen. En paretofront med optimale løsninger ble resultatet. Noen av løsningene ble prøvd ut i modellbyen, for å se om modellen er god nok til å finne løsninger som er optimale både i virkeligheten og i SWMM.

Resultatene vi fikk fra testingen viser at usikkerhetene i bymodellen og nedbørssimulatorer er for store til å gi nøyaktige resultater. Det er et avvik mellom den simulerte og den observerte avrenningen som tilsvarer et sekund fra eller til med pumping. Dersom man får en nøyaktig lik pumpeperiode i hvert forsøk, vil denne usikkerheten bli mindre, og simulert og observert avrenning vil trolig bli svært lik.

Hvor godt samsvar det er mellom observerte og simulerte løsninger, er det vanskelig å vite sikkert. Det er flere usikkerheter ved forsøkene som vanskeliggjør muligheten for å oppnå like resultater for to forsøk med like tiltak. Samtidig er det tydelig at simulerte optimale løsninger er blant de beste løsningene i den fysiske modellen. De fleste løsningene ligger tett inntil paretofronten. Trolig kan man derfor trene opp en modell som gir veldig gode løsninger ved hjelp av maskinlæring.

4.1 - Videre arbeid

Modellbyen er forbedret. Usikkerhetene og lekkasje er redusert og vi kjenner modellbyen bedre. Flere grupper med ulikt kompetansenivå har besøkt modellbyen, og deres samlede inntrykk av modellen er positivt.

Dog er forbedringer fortsatt mulig. Flere usikkerheter kan fjernes i nedbørssimulatoren og modellbyen. Ved bruk av pumpe med eksakt driftstid, kan nøyaktigheten av nedbørsmengden forbedres. I dag oppstår en liten variasjon i tid på grunn av at en stoppeklokke tar tiden. Ut fra pumpen strømmes 0,19l/s og total volumstrømning variasjoner derfor litt mellom forsøkene, selv med like tiltak.

En mulig løsning er at en strømningsmåler kan settes ved bymodellens avløp, for å se hydrogrammene fra forsøkene. I våre forsøk har bare avrenningsvolum blitt avlest, siden overvannstiltaks hovedhensikt er å forsinke avrenning. Det vil være av interesse å se forsinkelsen tiltak gir under forsøk.

Kjelleren bør heves fra bunnen av kjellermodulen for hindring av kjelleroversvømmelser ved «vanlige» budsjetterte tiltak ved fremtidige konkurranser. Kjelleren kan støttes av noe, eksempelvis LEGO-klosser. Ved «vanlige» budsjetterte tiltak oppstår nå ca. 40mm med oversvømmelse. Så med heving av kjelleren på 40mm unngår enkelte grupper oversvømmelse. Heving av kjelleren gjør det også mulig å overdimensjonere tiltakene i byen, slik at visse tiltak unngår kjelleroversvømmelse, med større kostnad enn nødvendig.

Resultatene fra maskinlæring og den simulerte pareto-fronten ble ferdig etter at den siste gruppen hadde sin konkurranse. Derfor har det ikke blitt utviklet et undervisningsprogram som kan illustrere bruk av maskinlæring. Etter ferdigstilling av resultatene, kan dette utvikles. Hvordan det best gjøres, og hvor godt det fungerer, utforskes ikke i denne oppgaven.

Referanser

- Brownlee, J. (2021, 10 12). *Differential Evolution Global Optimization With Python*. Retrieved from <https://machinelearningmastery.com/differential-evolution-global-optimization-with-python/#:~:text=Differential%20Evolution%20is%20a%20global,valed%20numbers%20instead%20of%20bitstrings>
- EPA. (2023, 10 5). *Storm Water Management Model (SWMM)*. Retrieved from <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>
- FN. (2023, 03 21). *Klimaendringer*. Retrieved from <https://www.fn.no/tema/klima-og-miljoe/klimaendringer#:~:text=Det%20blir%20varierte%20nedb%C3%B8r%20og,av%20Norge%20og%20Nord%20Europa>
- If. (2023, 08 07). *Millionskader etter regn om sommeren*. Retrieved from <https://www.if.no/om-if/presse/nyhetssenter?id=millionskader-etter-regn-om-sommeren>
- Lindholm, O. (2004). *Miljøgifter i overvann fra tette flater*. Retrieved from https://niva.brage.unit.no/niva-xmlui/bitstream/handle/11250/212323/4775_200dpi.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Magnussen, K., Wingstedt, A., Rasmussen, I., & Reinvang, R. (2015). *Kostnader og nytte ved overvannstiltak*. Retrieved from <https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/m305/m305.pdf>
- matplotlib. (2023, 11 13). *Pyplot*. Retrieved from <https://matplotlib.org/stable/tutorials/pyplot.html>
- Miljødirektoratet. (2015, 2). *Klima i Norge 2100*. Retrieved from <https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/m406/m406.pdf>
- Miljødirektoratet. (2023, 09 15). *Dagens og framtidens klima for Norge*. Retrieved from <https://www.miljodirektoratet.no/ansvarsomrader/klima/for-myndigheter/klimatilpasning/klimatilpasning-krever-kunnskap/dagens-og-framtidens-klima/>
- NIVA. (2023, 11 13). *Vann- og samfunnsutfordringer*. Retrieved from <https://www.niva.no/tema/vann-og-samfunnsutfordringer>
- Norconsult. (2023, 11 13). *Vann i byprosjekter*. Retrieved from <https://norconsult.no/tjenester/vann/vann-i-byprosjekter/>
- Norges offentlige utredninger. (2015). *NOU 2015:16 Overvann i byer og tettsteder*. Oslo: Departementenes sikkerhets- og serviceorganisasjon.
- Norsk Klimaservicesenter. (2023, 12 05). *IVF-verdier*. Retrieved from <https://klimaservicesenter.no/ivf?locale=nb&locationId=SN18701>
- Norsk Vann. (2021, 04 13). *Overvann - fra utfordring til ressurs*. Retrieved from <https://norskvann.no/overvann-fra-utfordring-til-ressurs/>

NumPy. (2023, 09 16). *NymPy*. Retrieved from <https://numpy.org/>

pandas. (2013, 11 10). *pandas*. Retrieved from <https://pandas.pydata.org/>

Paus, K. (2020, 05 05). *Risikoakseptnivåer og tre-trinnsstrategi?* Retrieved from <https://www.nve.no/media/9873/6-kim-helgeland-paus.pdf>

Pichler, M. (2023, 10 30). *swmm-api*. Retrieved from <https://pypi.org/project/swmm-api/>

pymoo. (2020). *NSGA-II*. Retrieved from <https://pymoo.org/algorithms/moo/nsga2.html>

pymoo. (2022). *pymoo: Multi-objective Optimization in Python*. Retrieved from <https://pymoo.org/>

Python. (2023, 11 13). *Python*. Retrieved from <https://www.python.org/>

python. (2023, 11 11). *time*. Retrieved from <https://docs.python.org/3/library/time.html>

Rasen, M. H., & Lilletvedt, M. (2020). *Utvikling og produksjon av en nedbør-avløpssimulator til bruk i undervisning*. Retrieved from <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/handle/11250/2721187>

scipy. (2023, 11 13). *scipy.optimize*. Retrieved from <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/optimize.html>

Skjeseth, T. G. (2023, 05). *Utvikling og testing av modell-by for overvanns-undervisning*. Retrieved from <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/bitstream/handle/11250/3076765/no.nmbu%3awiseflow%3a6839593%3a54592439.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Stenius, S., Glad, P. A., Wang, T. K., & Væringstad, T. (2015, 7). *Veileder for flomberegninger i små uregulerte felt*. Retrieved from https://publikasjoner.nve.no/veileder/2015/veileder2015_07.pdf

SurveyMonkey. (2023, 12 05). *Tilbakemelding etter "Run-off City" konkurranse*. Retrieved from <https://no.surveymonkey.com/r/R7K2WS7>

Vedlegg A - IVF-statistikk for Oslo - Blinder Plu

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 A1 - hentet fra (Norsk Klimaservicesenter, 2023)

Vedlegg B - Spørreundersøkelsen gitt til deltagerne for tilbakemeldinger av konkurranse med modellbyen.

Tilbakemelding etter "Run-off City" konkurranse

1. Hvor godt blir overvannsproblematikk formidlet?

- | | |
|--------------------------------------|--|
| <input type="checkbox"/> Veldig godt | <input type="checkbox"/> Ganske dårlig |
| <input type="checkbox"/> Ganske godt | <input type="checkbox"/> Veldig dårlig |
| <input type="checkbox"/> Nøytralt | |

2. Hvor godt blir effekten av overvannstiltak formidlet?

- | | |
|--------------------------------------|--|
| <input type="checkbox"/> Veldig godt | <input type="checkbox"/> Ganske dårlig |
| <input type="checkbox"/> Ganske godt | <input type="checkbox"/> Veldig dårlig |
| <input type="checkbox"/> Nøytralt | |

3. Hva med modellen/konkurransen fungerer bra?

4. Hva med modellen/konkurransen kan forbedres?

5. Hvor godt egnet er modellen til overvannsundervisning?

- | | |
|--------------------------------------|--|
| <input type="checkbox"/> Veldig godt | <input type="checkbox"/> Ganske dårlig |
| <input type="checkbox"/> Ganske godt | <input type="checkbox"/> Veldig dårlig |
| <input type="checkbox"/> Nøytralt | |

Figur B1 – Hentet fra (SurveyMonkey, 2023)

Vedlegg C - Optimale løsninger som ble testet i delkapittel 3.3.3.

10	2	5	1	5	2
9	3	5	1	5	2
8	1	1	1	1	1
7	5	3	1	5	5
6	5	5	1	2	5
5	1	1	1	1	1
4	5	5	1	5	5
3	2	2	1	5	2
2	1	1	1	1	1
1	5	5	5	5	5
	1	2	3	4	5

DATA	PHI	K [NOK]
71	0.696	10

10	2	5	1	5	2
9	4	5	1	5	2
8	1	1	1	1	1
7	5	2	1	5	5
6	5	5	1	2	5
5	1	1	1	1	1
4	5	5	1	5	5
3	2	2	1	5	2
2	1	1	1	1	1
1	5	5	5	5	5
	1	2	3	4	5

DATA	PHI	K [NOK]
72	0.669	12

10	2	5	1	5	2
9	4	5	1	5	2
8	1	1	1	1	1
7	5	2	1	5	5
6	5	5	1	2	5
5	1	1	1	1	1
4	5	5	1	5	5
3	3	3	1	5	2
2	1	1	1	1	1
1	5	5	5	5	5
	1	2	3	4	5

DATA	PHI	K [NOK]
167	0.635	22

10	2	5	1	5	2
9	4	5	1	5	2
8	1	1	1	1	1
7	5	2	1	5	5
6	5	5	1	4	5
5	1	1	1	1	1
4	5	5	1	5	5
3	2	2	1	5	2
2	1	1	1	1	1
1	5	5	5	5	5
	1	2	3	4	5

DATA	PHI	K [NOK]
168	0.619	24

10	2	5	1	5	2
9	4	5	1	5	2
8	1	1	1	1	1
7	5	2	1	5	5
6	5	5	1	2	5
5	1	1	1	1	1
4	7	5	1	5	5
3	2	3	1	5	4
2	1	1	1	1	1
1	5	5	5	5	5
	1	2	3	4	5

DATA	PHI	K [NOK]
250	0.595	32

10	2	5	1	5	2
9	4	5	1	5	2
8	1	1	1	1	1
7	5	2	1	5	5
6	5	5	1	4	5
5	1	1	1	1	1
4	5	5	1	5	5
3	2	3	1	5	4
2	1	1	1	1	1
1	5	5	5	5	5
	1	2	3	4	5

DATA	PHI	K [NOK]
300	0.553	41

10	2	5	1	5	2
9	4	5	1	5	2
8	1	1	1	1	1
7	5	3	1	5	5
6	5	5	1	4	5
5	1	1	1	1	1
4	6	6	1	5	5
3	3	2	1	5	4
2	1	1	1	1	1
1	5	5	5	5	5
	1	2	3	4	5

DATA	PHI	K [NOK]
345	0.527	50

10	2	5	1	5	2
9	4	5	1	5	3
8	1	1	1	1	1
7	5	3	1	5	5
6	5	6	1	4	5
5	1	1	1	1	1
4	7	7	1	5	5
3	3	3	1	5	4
2	1	1	1	1	1
1	7	5	5	5	5
	1	2	3	4	5

DATA	PHI	K [NOK]
400	0.474	67

10	2	5	1	5	2
9	4	5	1	7	3
8	1	1	1	1	1
7	6	3	1	5	7
6	6	5	1	4	5
5	1	1	1	1	1
4	7	6	1	7	5
3	3	3	1	5	4
2	1	1	1	1	1
1	7	5	5	7	5
	1	2	3	4	5

DATA	PHI	K [NOK]
450	0.441	80

10	2	5	1	7	3
9	4	5	1	7	3
8	1	1	1	1	1
7	7	3	1	5	7
6	7	6	1	4	5
5	1	1	1	1	1
4	6	7	1	7	5
3	3	3	1	5	4
2	1	1	1	1	1
1	7	7	5	7	7
	1	2	3	4	5

10	2	5	1	7	3
9	4	5	1	7	3
8	1	1	1	1	1
7	5	4	1	5	7
6	7	6	1	4	6
5	1	1	1	1	1
4	6	7	1	7	5
3	4	4	1	7	4
2	1	1	1	1	1
1	7	7	5	7	7
	1	2	3	4	5

DATA	PHI	K [NOK]
490	0.394	98

DATA	PHI	K [NOK]
500	0.371	121



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway