



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2020 30 stp
Fakultet for realfag og teknologi

Utvikling og produksjon av en nedbør-avløpssimulator til bruk i undervisning

Development and production of a rainfall-runoff
simulator for educational purposes

Mariann Hellne Rasen, Marianne Lilletvedt
Vann- og miljøteknikk

Forord

Denne oppgaven er vårt avsluttende arbeid på masterprogrammet Vann- og miljøteknikk ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet. Oppgaven ble utarbeidet over et tidsrom på 5 måneder og omfatter 30 studiepoeng.

Vi ønsker først og fremst å takke hverandre for et godt samarbeid. Det har vært en svært fin og lærerik opplevelse. Videre vil vi gi en stor takk til vår hovedveileder, Vegard Nilsen, for god og støttende veiledning gjennom hele arbeidet. Vi vil også takke vår biveileder Nils-Otto Kitterød for alle gode råd. Vi vil gjerne takke Øyvind Hansen, Arne Svendsen og resten av verkstedet ved NMBU for hjelpelighet og nyttige innspill. I tillegg ønsker vi å takke Tom Ringstad for utarbeidelse av nødvendig programvare til simulatoren.

Avslutningsvis vil vi takke alle våre medstudenter for fem flotte studieår.

Ås, Juni 2020

Marianne Lilletvedt

Mariann Hellne Rasen

Sammendrag

De siste årene har det blitt et økt fokus på konsekvensene av ekstremvær. En kombinasjon av hyppige og voldsomme nedbørhendelser og en økende grad av urbanisering kan føre til høye andeler overflateavrenning, som kan gi store og kostbare skader på infrastruktur. I håp om å øke kunnskapen hos studenter om underliggende konsepter som tilhører nedbør- og avløpsdannelse vil denne oppgaven beskrive utviklingen og produksjon av en nedbør-avløpssimulator. Simulatoren skal kunne demonstrere ulike nedbørhendelser og deres tilhørende avrenningsforløp.

Simulatoren nedbørfelt har en størrelse på 2 m^2 . En pumpe tilfører ønsket nedbørintensitet til et fordelingsystem som distribuerer nedbøren uniformt over feltet. Simulatoren nedbørfelt kan representere ulike overflatetyper, og tre ulike overflater er presentert i oppgaven. Det er også mulig å stille inn ønsket helning på nedbørfeltet. Avrenning fra feltet blir målt og logget ved bruk av vekt, slik at man kan lage utløpshydrogram for ulike simulerte nedbørhendelser.

Simulatoren demonstrerer at avrenningsforløpet er sterkt påvirket av både nedbørhendelse og nedbørfeltkarakteristikk. Ved videre utvikling av simulatoren kan også prosesser knyttet til infiltrasjon og erosjon demonstreres. Simulatoren kan brukes til undervisning ved NMBU som et mer praktisk og visuelt alternativ for studentene. Forhåpentligvis vil simulatoren bidra til å styrke forståelsen av sammenhengen mellom nedbør- og avrenningsprosesser.

Summary

In the last few years, there have been an increased focus on the consequences of extreme weather. A combination of frequent and aggressive precipitation events and an increase in urbanization may lead to large quantities of surface runoff, which can cause major and expensive damage to infrastructure. In the hope of increasing the students' knowledge of fundamental concepts regarding rainfall and runoff, this study will describe the development and production of a rainfall-runoff simulator. The simulator will be able to demonstrate different kinds of rainfall events and their corresponding runoff.

The simulator has a catchment area of 2 m². A pump will supply the desired rainfall intensity to a distribution system that distributes the rain uniformly over the catchment area. The catchment area can represent different kinds of surfaces, where three different surfaces are presented in this study. It is also possible to variate the surface slope on the catchment area. The runoff from the catchment area is weighed and logged, so that the runoff curve for different kinds of rainfall events can be generated.

The simulator demonstrates that the generation of runoff is strongly affected by both the rainfall event and the characteristics of the catchment area. By further development of the simulator, processes connected to infiltration and erosion may also be demonstrated. The simulator can be used for educational purposes within NMBU, as a more practical and visual alternative for students. Hopefully the simulator will contribute to enhance the understanding of the relationship between rainfall and runoff processes.

Innhold

Forord	i
Sammendrag	iii
Summary	v
Innhold	vii
Figurer	xiii
Tabeller	xvi
Forkortelser	xvii
1 Introduksjon	1
1.1 Motivasjon og problemstilling	1
1.2 Forutsetninger og begrensninger	2
1.3 Relatert arbeid	2
1.4 Struktur	3
2 Bakgrunn	5
2.1 Nedbør	5
2.1.1 Nedbørintensitet	5
2.1.2 IVF-kurver	6
2.1.3 Syntetiske nedbørhendelser	7
2.1.4 Variasjon over tid og rom	10
2.1.5 Uniformitetskoeffisienten	11
2.2 Avrenning	12
2.2.1 Effektiv nedbør og nedbørtap	12
2.2.2 Infiltrasjon	13
2.2.3 Overflateavrenning	14
2.2.4 Konsentrasjonstid	14
2.2.5 Den rasjonale metode	16
2.2.6 Ruhet	16
2.2.7 Ikke-lineær karmodell	17
2.3 Vannføringsregulering	18
2.3.1 Ventiler	18

2.3.2	Pumper	19
2.4	Vannføringsmåling	21
2.4.1	Vannføringsmåling i fylte rør	21
2.4.2	Vannføringsmåler i åpne renner og delfylte rør	22
2.4.3	Vannføringsmåler ved nivå- eller mengdemåling	24
2.4.4	Alternativ vannføringsmåler	25
3	Metode	27
3.1	Utvikling av nedbør-avløpssimulatorene	27
3.1.1	Nedbørintensitet, konsentrasjonstid og nedbørfelt	28
3.1.2	Regulering av vanntilførsel	29
3.1.3	Fordelingssystem	30
3.1.4	Avrenningsmåler	39
3.1.5	Arbeidstegning av nedbør-avløpssimulator	46
3.2	Kvalitetstesting av simulatorene	47
3.2.1	Sammenheng mellom pumpehastighet og nedbørintensitet	47
3.2.2	Databehandling av avrenningsmåler	47
3.2.3	Uniformitetstest	48
3.2.4	Konsentrasjonstid- og ruhetsanalyser	49
3.2.5	Modellregn og oppsett i LabView	50
3.2.6	Modellregn og avrenning i SWMM	52
4	Resultater	55
4.1	Ferdigstilt nedbør-avløpssimulator	55
4.1.1	LabView-verdier	57
4.2	Sammenheng mellom pumpehastighet og nedbørintensitet	57
4.3	Databehandling av avrenningsmålinger	60
4.4	Nedbørens uniformitet	64
4.5	Konsentrasjonstid og ruhet	67
4.6	Modellregn og avrenning i nedbør-avløpssimulator	70
4.7	Modellregn og avrenning i SWMM	73
5	Diskusjon	77
5.1	Utforming av nedbør-avløpssimulatorene	77
5.1.1	Programvare	78
5.2	Sammenheng mellom pumpehastighet og nedbørintensitet	78
5.3	Databehandling av avrenningsmåler	79

5.4	Nedbørens uniformitet	79
5.5	Nedbørfeltens konsentrasjonstid og ruhet	80
5.6	Modellregn	81
5.7	Sammenligning med SWMM	81
5.8	Videre arbeid	82
6	Konklusjon	83
	Referanser	85
	Vedlegg A Energitap i tilførselsrør	89
	Vedlegg B Energitap i fordelingsrør	91
	Vedlegg C Bilder av simulatoren	93

Figurer

2.1	IVF-kurve for Rustadskogen, Ås	7
2.2	Kasseregn	8
2.3	Trekantregn	8
2.4	Symmetrisk blokkhyetogram	9
2.5	Asymmetrisk blokkhyetogram	9
2.6	Chicago-metoden	10
2.7	Den hydrologiske syklusen	13
2.8	Illustrasjon av en ikke-lineær karmodell	18
2.9	Stempelpumpe	19
2.10	Tannhjulpumpe	20
2.11	Peristaltpumpe	20
2.12	Ultralyd mengdemåler	21
2.13	Dopplermåler	22
2.14	Turbinmåler	22
2.15	V-overløp	23
2.16	Kapazitiv sonde	25
2.17	Vippekar	25
3.1	Flytskjema av nedbør-avløpssimulatoren i planleggingsfasen	27
3.2	Watson Marlow 360Du pumpe	30
3.3	Fordelingssystemet tidlig i planleggingsfasen	31
3.4	Tap per lengdeenhet i tilførselsrør	33
3.5	Fordeling av vannføring i et friksjonløst rør	34
3.6	Illustrasjon av kanyler i fordelingsrør	36
3.7	Sammenhengen mellom vannføringskoeffisient C_d og trykkehøyden h ved en indre kanylediameter på 0,8 mm	37
3.8	Sammenhengen mellom vannføringskoeffisient C_d og trykkehøyden h ved en indre kanylediameter på 0,5 mm	37
3.9	Sammenheng mellom trykk og vannføring ved indre kanylediameter 0,5 mm	38

3.10	Ultrasonic Flow Meter UF25B	40
3.11	Ultrasonic Flow Meter UF25B: Plassering og oppstuvning	41
3.12	Vekt i oppsamlingskar	43
3.13	Utløpshydrogram med vekt som avrenningsmåler	43
3.14	Planleggingskisse av nedbør-avløpssimulator	46
3.15	Aluminiumsform	48
3.16	Uniformitetstest: Plassering av aluminiumsformer i nedbørfeltet	49
3.17	Kasseregn i LabView	51
3.18	Trekantregn i LabView	52
3.19	Symmetrisk blokkhyetogram i LabView	52
4.1	Flytskjema for ferdigstilt nedbør-avløpssimulator	56
4.2	Ferdigstilt nedbør-avløpssimulator	56
4.3	Eksempel på loggede verdier fra LabView	57
4.4	Sammenheng mellom pumpehastighet og vannføring	59
4.5	Sammenheng mellom pumpehastighet og vannføring med bruk av tredje-gradspolynom	59
4.6	Vektmåling i oppsamlingskar fra simulert kasseregn på gress med helning 50 ‰ og en nedbørintensitet på 310,5 mm/t	60
4.7	Vektmåling i oppsamlingskar fra simulert kasseregn på gress med helning 50 ‰ og en nedbørintensitet på 14,4 mm/t	60
4.8	Simulert kasseregn på gress med helning 50 ‰ og en nedbørintensitet på 310,5 mm/t	61
4.9	Simulert kasseregn på gress med helning 50 ‰ og en nedbørintensitet på 14,4 mm/t	61
4.10	Hvordan bevegelser i oppsamlingskaret påvirker vektmålinger	64
4.11	Uniformiteten representert som vanddybder i nedbørfeltet ved ulike pumpehastigheter	65
4.12	Uniformiteten representert som forholdstall mellom hver målt vektverdi og vektgjennomsnitt ved ulike pumpehastigheter	66
4.13	Sammenheng mellom ruhet og nedbørintensitet ved ulike overflater og helninger	68
4.14	Simulert trekantregn på grus med 20 ‰ helning.	71
4.15	Simulert symmetrisk blokkhyetogram på grus med 20 ‰ helning.	71
4.16	Kasseregn som er basert på samme nedbørstatistikk som trekantregnet i 4.14	72
4.17	Kasseregn som er basert på samme nedbørstatistikk som symmetrisk blokkhyetogram i 4.15	72
4.18	Simulert kasseregn med og uten fordrøyningsmagasiner på nedbørfelt	73

4.19 Sammenligning av simulert trekantregn og avrenning i simulatoren og SWMM	74
4.20 Sammenligning av simulert symmetrisk blokkhyetogram og avrenning i simulatoren og SWMM	74
C.1 Detaljbilder av gressoverflaten	93
C.2 Detaljbilder av grusoverflaten	93
C.3 Gress- og ståloverflate som nedbørfelt	94
C.4 Grusoverflate som nedbørfelt, med og uten nedbør	94
C.5 Detaljbilder av nedbør og avrenning	95
C.6 Rør fra pumpa og opp til fordelingssystemet	95
C.7 Detaljbilder av simulatoren	96
C.8 Fordelingsystemet sett ovenifra	96

Tabeller

2.1	Forhold mellom konsentrasjonstid og regnvarighet.	15
2.2	Et utdrag fra tabell over Mannings n ved overflatestrømning.	17
3.1	Tap per lengdeenhet ved ulikt antall rør og ulike rørdiametere for fordelingsrør.	34
3.2	Energitap gjennom hull med diameter 0,6 mm i fordelingsrør.	36
3.3	Forsøk gjennomført på vekt ved lav vannføring.	44
3.4	Forsøk gjennomført på vekt ved høy vannføring.	44
4.1	Pumpehastighet og tilhørende vannføring.	58
4.2	Differansen mellom nedbørintensitet og gjennomsnittet av svingningene i avrenningen på gress med 50 ‰ helning.	62
4.3	Differansen mellom nedbørintensitet og gjennomsnittet av svingningene i avrenningen på stål med 50 ‰ helning.	62
4.4	Differansen mellom nedbørintensitet og gjennomsnittet av svingningene i avrenningen på grus med 50 ‰ helning.	63
4.5	Differansen mellom nedbørintensitet og gjennomsnittet av svingningene i avrenningen på grus med 20 ‰ helning.	63
4.6	Standardavvik og uniformitetskoeffisient ved ulike pumpehastigheter. . .	67
4.7	Oversikt over mye brukte verdier under forsøk.	68
4.8	Konsentrasjonstid og ruhet for gress med 50 ‰ helning.	69
4.9	Konsentrasjonstid og ruhet for stål med 50 ‰ helning.	69
4.10	Konsentrasjonstid og ruhet for grus med 50 ‰ helning.	69
4.11	Konsentrasjonstid og ruhet for grus med 20 ‰ helning.	70
4.12	Ruhet til ulike nedbørfelt.	70
4.13	Oversikt over resultatene fra nedbør-avløpssimulator og SWMM.	75
A.1	Tap pr. lengdeenhet i tilførselsrør.	89
B.1	Energitap gjennom hull med dimensjon 0,6 mm i fordelingsrør ved ulike trykk.	91

B.2	Energitap gjennom kanyler i fordelingsrør med indre diameter 0,5 mm i fordelingsrør ved ulike trykk.	91
B.3	Energitap gjennom kanyler i fordelingsrør med indre diameter 0,8 mm i fordelingsrør ved ulike trykk.	91

Forkortelser

GI	Gjentaksintervall
IVF	Intensitet-varighet-frekvens
LABVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering
NKSS	Norsk Klimaservicesenter
RPM	Runder per minutt
SWMM	Storm Water Management Model
US EPA	United States Environmental Protection Agency
VS	Vannsøyle

1. Introduksjon

1.1 Motivasjon og problemstilling

Den hydrologiske syklusen beskriver den kontinuerlige forflytningen og sirkuleringen av vann. Havvann varmes opp av solenergi og fordamper, vanddampen fraktes som skyer over jorda og når vanddampen blir avkjølt faller det som nedbør. Vannet kan infiltreres i bakken, transporteres på overflaten eller lagres på ulike måter, men til slutt vil vannet ende tilbake i havet (Hendriks, 2010).

Klimaendringene vil trolig øke hastigheten på den hydrologiske syklusen (Hendriks, 2010). FNs klimapanel bruker formler og fysiske konsepter til å lage klimamodeller som prøver å forutsi fremtidens klima. Resultater fra disse modelleringene viser en økning i gjennomsnittstemperatur på jorda, som igjen vil føre til en generell økning i nedbørintensitet og mer av de kraftige nedbørhendelsene (NKSS, 2015). Ved kraftigere og mer hyppig nedbør vil jordoverflaten oftere være mettet med vann. Mettet jord har dårligere infiltrasjonskapasitet og større andel av nedbøren vil derfor ende som overflateavrenning (Holvik, 2011).

Økt grad av urbanisering vil også påvirke den naturlige hydrologiske syklusen (Niemczynowicz, 1999). Tette flater i urbane strøk fører til at en stor andel av nedbøren ender som overflateavrenning. Impermeable flater i kombinasjon med klimaendringene kan føre til ekstremt høy overflateavrenning som blant kan medføre kostbare skader på infrastruktur (NOU, 2015). For å unngå unødvendige og kostbare skader på infrastrukturen i fremtiden er det derfor viktig med mye kunnskap og god forståelse av sammenhengen mellom nedbør og avrenning.

Hovedmålet med denne masteroppgaven er å utforme og produsere en nedbør-avløpssimulator som skal brukes i undervisning. Nedbør- og avrenningshendelser er dynamiske og kompliserte prosesser som ikke nødvendigvis er intuitivt for studenter. Simulatoren skal derfor visuelt demonstrere sammenhengen mellom nedbør og avrenning, samt måling og logging av nedbørhendelser med tilhørende avrenning.

Mål, delmål og problemstillinger til oppgaven ble derfor satt til:

- Hvilke nedbør- og avrenningsfenomener skal være mulig å simulere?
 - Hvilke typer nedbørhendelser?
 - Hvordan skal nedbørfeltet være utformet?
- Hvordan styre tilførselen av nedbør samt måle og logge avrenning?
- Fungerer simulatoren som planlagt?
- Hva slags usikkerheter finnes?

1.2 Forutsetninger og begrensninger

For at oppgaven skulle være mulig å gjennomføre i henhold til den tiden som var til rådighet ble det kun sett på overflateavrenning på impermeable flater. Konsepter som infiltrasjon og erosjon ble derfor ikke vurdert i oppgaven. Dråpestørrelse og dråpenes kinetiske energi har påvirkning på erosjon og infiltrasjonsevnen, men har ingen påvirkning på overflateavrenning. Derfor blir dråpestørrelse og dens kinetiske energi ikke tatt hensyn til i oppgaven. For å gjøre undervisning og bruk av simulatoren lettere, skal simulatoren være plassert innendørs. Det gjør at man ikke trenger å ta hensyn til mulige forstyrrelser utenifra, f.eks. vind.

Det var 150 000 kr disponibelt for utvikling og produksjon av nedbør-avløpssimulatoren. For å ikke overstige budsjettet var det viktig å kjenne til alle kostnader før utstyr og tjenester ble bestilt.

1.3 Relatert arbeid

Det finnes flere forsøk gjennomført med syntetisk nedbør, både i simulatorer og på feltforsøk. Eksempelvis har Nielsen mfl. (2019b) gjort forsøk på sammenhengen mellom nedbør, jordens vanninnhold og avrenning. Forsøket ble utført på en feltstasjon med et gressdekket, urbant område på 4300 m². Nielsen mfl. (2019a) konstruerte en nedbør-avløpssimualtor med en størrelse på 1 m² for å demonstrere sammenhengen mellom nedbør, avrenning, infiltrasjon, jordens vanninnhold og nedbørfeltets helning.

Abudi mfl. (2012) og Pappas mfl. (2008) har demonstrert effekten nedbør har på erosjon i små nedbørfelt. Abudi mfl. (2012) benyttet seg av to testfelt, hvor hvert testfelt hadde en størrelse på 2 m². Pappas mfl. (2008) benyttet seg av fire mindre testfelt, hvor hvert testfelt hadde en lengde på 1 m.

Aksoy mfl. (2012) undersøkte sammenhengen mellom nedbør og sedimenttransport i avrenningen og benyttet seg av et feltområde på nesten 9 m². I dette tilfellet var nedbørkarakteristikken svært viktig, slik som uniformitet og dråpenes størrelse, hastighet og kinetiske energi.

Det er få simulatorer der fokuset kun ligger på sammenhengen mellom nedbør og avrenning. Det finnes nedbør-avløpssimulatorer som er lagd til undervisningsformål og er kommersielt tilgjengelig. Både Armfield (2015) og Gunt (2019) har produsert små nedbør-avløpssimulatorer som kan demonstrere og visualisere avrenningsforløp basert på ulike nedbørhendelser og nedbørfeltkarakteristikk. Disse simulatorene er svært kostbare og det er derfor ønskelig å produsere en egen simulator.

1.4 Struktur

Oppgaven er skrevet i IMRAD-stil (introduksjon, metode, resultater, diskusjon) i tillegg til et eget bakgrunns kapittel for å gi den grunnleggende teorien for oppgaven. Det er også inkludert et konklusjonskapittel.

2. Bakgrunn

For å forstå sammenhengen mellom nedbør og avrenning må man først forstå konseptene som ligger bak. I dette kapittelet skal den teoretiske bakgrunnen presenteres slik at valg og analyser gjort i oppgaven er begrunnet.

2.1 Nedbør

Nedbør oppstår når varm og fuktig luft stiger opp i luften og kjøles ned på grunn av den kalde temperaturen i atmosfæren (Hendriks, 2010). Når luften blir avkjølt, begynner vanndampen i luften å kondensere og danne små vanndråper eller iskrystaller. Disse dråpene blir til slutt så store og tunge at de vil falle ned mot jordoverflaten (Hendriks, 2010).

Nedbøren kan komme i mange former slik som regn, snø og is. Det er regn som er den viktigste nedbørstypen i store deler av verden. Det er fordi regn som oftest har størst betydning når det kommer til urban overvannshåndtering (Akan og Houghtalen, 2003). En regnhendelse eller en nedbørhendelse vil si en tidsperiode der nedbøren som faller er målbar. Lengden på denne tidsperioden blir kalt for *regnvarigheten* og ligger mellom perioder hvor det er ingen målbar nedbør (Akan og Houghtalen, 2003).

2.1.1 Nedbørintensitet

Nedbørintensitet er et uttrykk som beskriver hvor mye nedbør som faller i løpet av en kort tidsperiode, og måles vanligvis som mm/time eller L/(s·ha) (Hendriks, 2010). Dimensjonerende nedbørintensitet blir som oftest hentet ut fra en intensitet-varighet-frekvens kurve (IVF-kurve). Det er vanlig å skille mellom momentan nedbørintensitet, som vil si nedbørens tidsrate, og den *midlere* nedbørintensiteten, som vil si dybden av nedbør for hele nedbørhendelsen delt på regnvarigheten (Akan og Houghtalen, 2003).

Den dimensjonerende nedbørintensiteten varierer vanligvis ut ifra regnvarighet, gjentakintervall, den geografiske lokasjonen og den historiske perioden som IVF-kurven er generert fra (Paus mfl., 2014). I tillegg vil intensiteten også avhenge av sesongvaria-

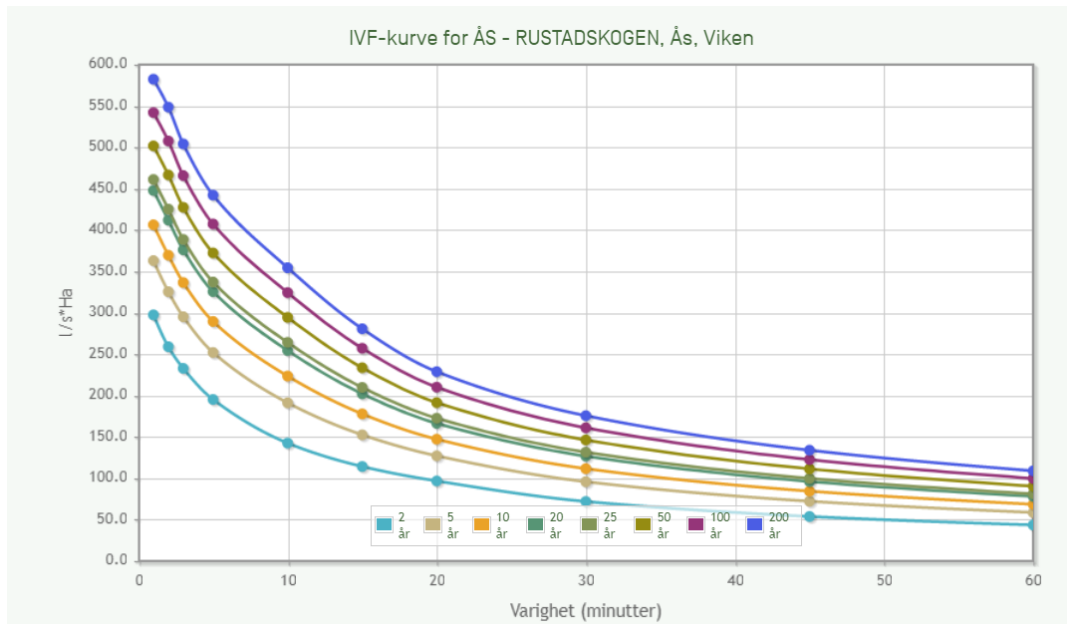
sjoner, hvor intensiteten generelt er høyere om sommeren enn om vinteren (Paus mfl., 2014).

2.1.2 IVF-kurver

Nedbørhendelser kan være svært vanskelig å predikere. Det er alltid usikkert når man skal estimere når en nedbørhendelse vil forekomme, og både mengde og varighet på nedbøren er avhengig av tid og rom (Akan og Houghtalen, 2003). Det er derfor verdt å legge merke til at man i hydrologien behandler nedbørhendelser som tilfeldige hendelser og det må derfor brukes sannsynlighetsmodeller for å predikere dem (Akan og Houghtalen, 2003).

IVF-kurver er en metode for å fremstille nedbørstatistikken til et område (Chin, 2013). Gjennom en IVF-kurve kan man representere sammenhengen mellom regnvarighet, midlere intensitet og gjentakintervall for nedbørhendelser (Chin, 2013). Eksempelvis viser figur 2.1 IVF-kurven til Rustadskogen, Ås. Et gjentakintervall er definert som gjennomsnittlig antall år mellom to hydrologiske hendelser med likt eller større omfang (Akan og Houghtalen, 2003).

For å utarbeide en IVF-kurve trenger man en serie med observerte nedbørmålinger, ofte oppgitt i regnvolum, over gitte tidsintervaller. Det foretrekkes en lang måleserie, helst flere år med data, og at tidsoppløsningen på måleserien er god nok (Chin, 2013). I følge Akan og Houghtalen (2003) blir den årlige maksimale nedbørdybden ved ulike regnvarigheter trukket ut fra den observerte måleserien. Det utføres så en frekvensanalyse på disse dataene, hvor resultatene blir plottet inn som en IVF-kurve (Akan og Houghtalen, 2003). I noen tilfeller benyttes en årlig overskridelsesserie istedenfor en årlig maksimalserie (Akan og Houghtalen, 2003). Marra og Morin (2015) presiserer at på grunn av IVF-kurvens beskrivelse av karakteristikk og statistikk for en nedbørhendelse, slik som intensitet og overskridelses sannsynlighet, er prosedyren svært gunstig å bruke ved overvannshåndtering og flomrisikoanalyser.



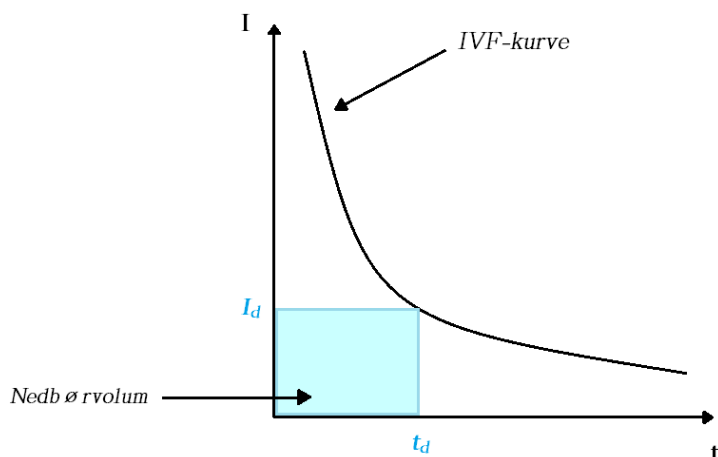
Figur 2.1: IVF-kurve for Rustadskogen, Ås. Tatt fra NKSS (udatert).

2.1.3 Syntetiske nedbørhendelser

Når nedbørintensitet blir representert som funksjon av tid, kaller man kurven for et hyetogram (Ødegaard, 2014). Det finnes ulike typer hyetogram for å representere nedbør og samlet sett blir de ofte kalt for syntetiske nedbørhendelser eller modellregn. Modellregn benyttes i nedbør-avløpsmodeller, både for enkle manuelle beregninger og dataprogrammer (Chin, 2013). De vanligste og mest omtalte typene er kasseregner, trekantregn, symmetrisk- og asymmetrisk blokkhyetogram og Chicago-metoden. Hvordan de ulike typene blir definert avhenger av gjentaksintervall, varighet, tidsfordeling, romfordeling og nedbør dybde (Chin, 2013).

Kasseregner

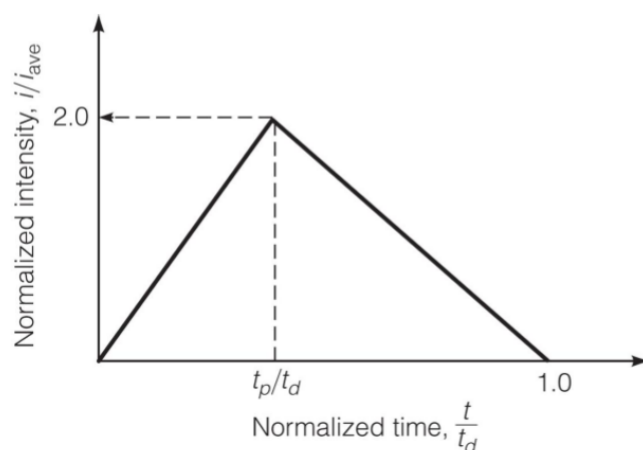
Kasseregner, som vises i figur 2.2, er som oftest det enkleste modellregnet å konstruere, fordi man benytter en konstant intensitet over hele nedbørhendelsen (Ødegaard, 2014). Siden man ofte henter ut intensiteten fra en IVF-kurve, som representerer *midlere* intensitet, vil en stor ulempe ved bruk av kasseregner ofte være at man underestimerer den maksimale nedbørintensiteten gjennom nedbørhendelsen (Ødegaard, 2014). For et mer realistisk regner er det derfor gunstig å ta i bruk trekantregn eller et symmetrisk blokkhyetogram.



Figur 2.2: Illustrasjon av et kasseregner.

Trekantregn

Et trekantregn, som vises i figur 2.3, antar at maks intensitet er dobbel så stor som den midlere intensiteten og at varigheten for modellregneret er lik varigheten fra IVF-kurven. Formen til modellregneret blir en trekant (Chin, 2013). Dette er en av de enkleste formene for en syntetisk nedbørhendelse, og som samtidig er mer realistisk enn kasseregneret.

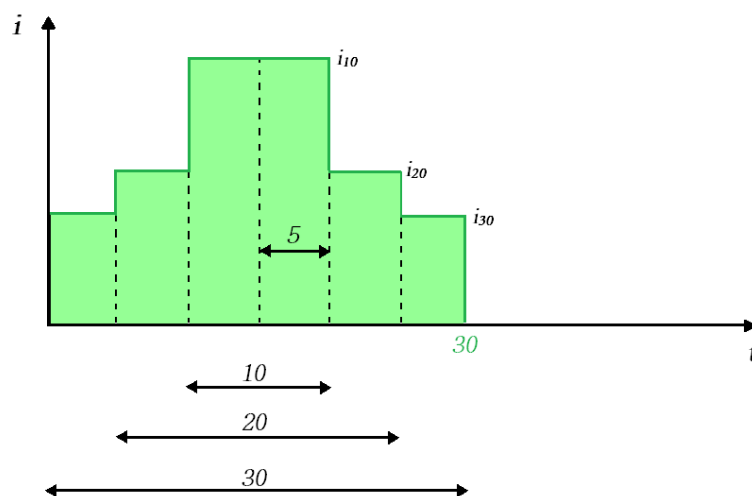


Figur 2.3: Illustrasjon av et trekantregn (Chin, 2013).

Symmetrisk blokkhyetogram

Et symmetrisk blokkhyetogram, som vises i figur 2.4, vil være symmetrisk om midtaksen, hvor maksimal nedbørintensitet opptrer i midten, og synker i gitte tidsintervaller ut mot høyre og venstre side (Chin, 2013). Summen av arealet til alle blokkene innenfor et gitt tidsintervall representerer nedbørvolumet fra IVF-kurven for det samme tidsintervallet.

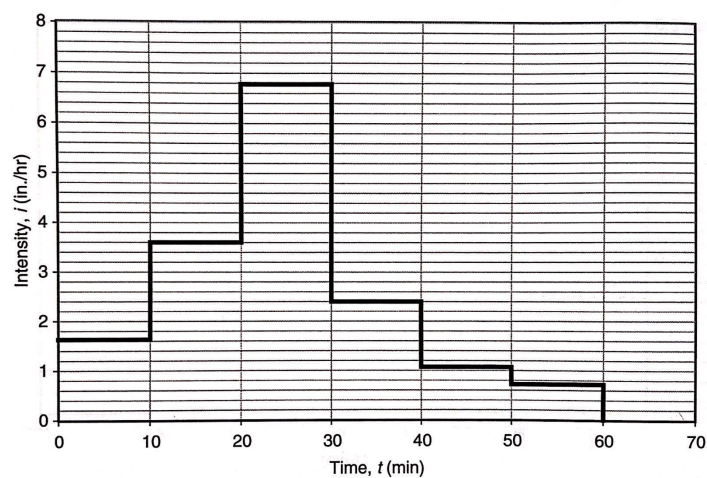
Fordelen med dette er at man får nedbørvolumet for mange varigheter i en og samme nedbørhendelse (Chin, 2013).



Figur 2.4: Illustrasjon av et symmetrisk blokkhyetogram.

Asymmetrisk blokkhyetogram

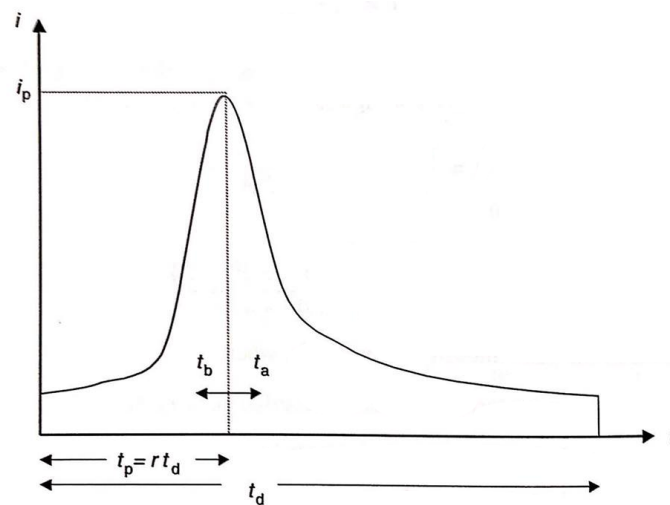
Et asymmetrisk blokkhyetogram, som vises i figur 2.5, har mange likheter med det symmetriske blokkhyetogrammet. F.eks. vil begge vise tidsvariasjon i nedbør ved bruk av IVF-kurver (Na og Yoo, 2018). Forskjellen er at det asymmetriske blokkhyetogrammet vil bytte mellom å plassere de nest største nedbørintensitetene til vekselvis høyre og venstre, slik at hyetogrammet får en asymmetrisk form (Na og Yoo, 2018). I tillegg vil ikke nødvendigvis den maksimale nedbørintensiteten opptre i midten av hyetogrammet, noe som i følge Chin (2013) er en mer realistisk representasjon av nedbørhendelser.



Figur 2.5: Illustrasjon av et asymmetrisk blokkhyetogram (Akan og Houghtalen, 2003).

Chicago-metoden

Chicago-metoden, som vises i figur 2.6, er nyttig ved både store og små nedbørfelt. I denne metoden blir først og fremst den maksimale nedbørintensiteten beregnet og plassert i et diagram (Akan og Houghtalen, 2003). Videre beregner man de momentane nedbørintensitetene henholdsvis før og etter den maksimale intensiteten. Tidsstegene ved bruk av denne metoden er svært små, og resultatgrafene blir derfor kalt for et «glatt» hyetogram (Akan og Houghtalen, 2003). Hvis tidsstegene som brukes i blokkhyetogram-metodene reduseres og nærmer seg null, vil til slutt blokkhyetogrammet og Chicago-hyetogrammet bli tilnærmet helt like. Dette er selvsagt avhengig av at intensitetssekvensen i blokkhyetogrammet er valgt riktig (Akan og Houghtalen, 2003).



Figur 2.6: Illustrasjon av Chicago-metoden (Akan og Houghtalen, 2003).

2.1.4 Variasjon over tid og rom

I følge Chin (2013) er antakelsen om konstant nedbør i både tid og rom vanlig å benytte når man ser på småskala nedbørfelt. Nedbørfeltet er ofte dominert av overflateavrenning og den mest brukte avrenningsmodellen for slike felt er den rasjonale metode, som beskrives i delkapittel 2.2.5 (Chin, 2013).

For store nedbørfelt må man derimot ta hensyn til både tid- og romvariasjon gjennom nedbørhendelsen (Chin, 2013). Jo større nedbørfeltet er, jo mer framtreddende blir den romlige variasjonen for feltet (Akan og Houghtalen, 2003). I tillegg så vil også den romlige variasjonen avhenge av topografien til nedbørfeltet (Hendriks, 2010).

Tidsvariasjonen på nedbøren i feltet vil normalt sett ha stor påvirkning på avrenningen fra feltet. Det er derfor viktig å ha et spesifisert tidsmønster for nedbørintensiteten, som et modellregn.

2.1.5 Uniformitetskoeffisienten

Ved studier og undersøkelser av nedbør- og avrenningsfenomener er det i mange tilfeller relevant å vite om det regner uniformt på det aktuelle nedbørfeltet. Et numerisk uttrykk for å evaluere uniformiteten på et nedbørfelt, er Christiansens uniformitetskoeffisient (Dabbous, 1962).

Eksempelvis har Nielsen mfl. (2019a), J. B. Humphry mfl. (2002) og Aksoy mfl. (2012) i sine studier benyttet Christiansens uniformitetskoeffisient for å uttrykke uniformiteten i nedbør.

Uniformitetskoeffisienten, uttrykt i prosent, er definert av formel 2.1.

$$CU = 100 \left(1 - \frac{SD}{\bar{x}n} \right) \quad (2.1)$$

hvor:

- SD Standardavvik
- n Antall observasjoner
- \bar{x} Gjennomsnitt av alle observasjoner

Hver observasjon vil være representert som målt nedbørsøyde i ulike punkter eller delarealer i nedbørfeltet. Fullstendig uniform nedbør vil tilsvare en CU på 100 %. Det er som oftest volumverdier som benyttes for å beregne uniformitetskoeffisienten. Standardavviket SD vil si det forventede avviket hver observert verdi har fra det totale gjennomsnittet. SD er definert av formel 2.2 (Løvås, 2013).

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.2)$$

Parameterne er de samme som i formel 2.1. x_i uttrykker verdien for observasjon nr. i .

2.2 Avrenning

Prosessen som omhandler sammenhengen mellom nedbør og avrenning er svært komplisert, og det har vist seg vanskelig å produsere nøyaktige nedbør-avløpsmodeller (Akan og Houghtalen, 2003). I landlige og lite bebygde områder er det overflatens fordrøyningskapasitet, infiltrasjonsegenskaper og naturlig skapte dreneringsmønstre, som har den største effekten på avrenningen. I tillegg har også vegetasjon og topografi noe å si (Akan og Houghtalen, 2003).

Ved urbaniserte områder er det derimot større grad av impermeable flater, som følgelig skaper en lavere infiltrasjonsrate og høyere overflateavrenning. Dette kommer av at urbaniserte områder har mindre grøntarealer, og gjennom økt bebyggelse og befolkning vil overflaten gjennomgå både utjevning og komprimering (Akan og Houghtalen, 2003).

I tillegg så har urbaniserte områder ofte et omfattende nettverk av rør og kanaler som skaper kortere veier for overflateavrenningen. En kombinasjon av økende mengder overvann og underdimensjonerte rør eller kanaler kan forårsake store oversvømmelser, i tillegg til akselerering av erosjon og ødeleggelse i kanaler (Akan og Houghtalen, 2003).

2.2.1 Effektiv nedbør og nedbørtap

All nedbør som akkumuleres gjennom en nedbørhendelse vil fordele seg mellom overflateavrenning, infiltrasjon, intersepsjon, fordampning og gropmaganisering. Den andelen nedbør som blir til overflateavrenning kalles for *effektiv nedbør* (Ødegaard, 2014). Infiltrasjon, intersepsjon, fordampning og gropmaganisering har den felles betegnelsen *nedbørtap* (Ødegaard, 2014).

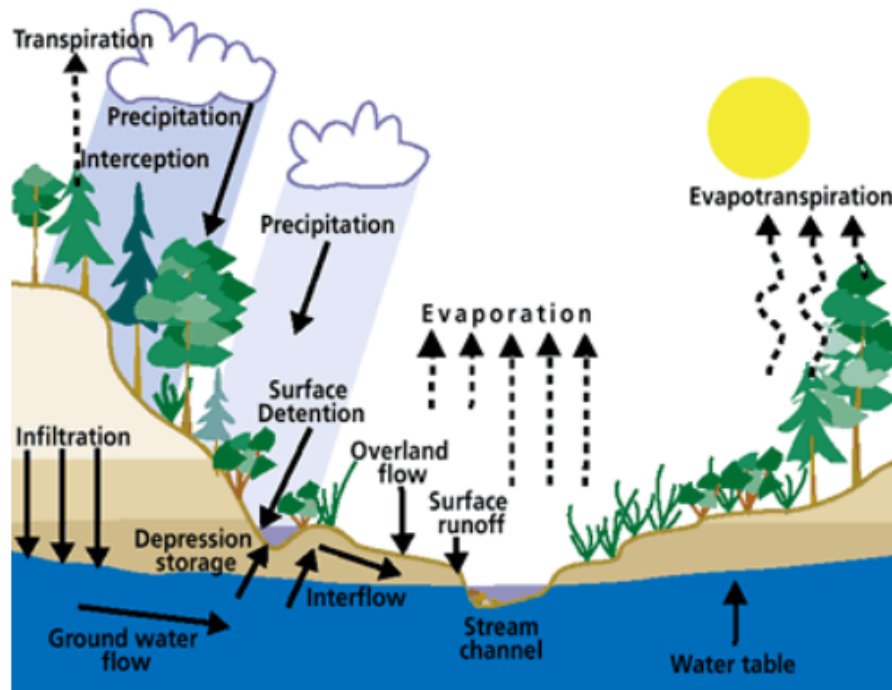
Effektiv nedbør er definert som:

$$P_e = P - P_{tap} \quad (2.3)$$

hvor P er nedbør og P_{tap} er nedbørtap (Nordheim, 2019).

Overflateavrenning vil si avrenning på overflaten og er beskrevet nærmere i delkapittel 2.2.3. Infiltrasjon vil si den andelen av vannet som siger ned i bakken og enten blir tatt opp av planter eller blir en del av grunnvannet (Ødegaard, 2014). Hvor mye vann som kan infiltreres kalles infiltrasjonskapasiteten og er sterkt avhengig av grunnforhold, grunnens permeabilitet og vanninnhold (Ødegaard, 2014). Intersepsjon er definert som andelen av nedbør som fanges opp av vegetasjon, bygninger el. på vei ned mot overflaten (Hendriks, 2010). Gropmaganisering vil si den andelen av vannet som samles opp i små groper i overflaten og ikke bidrar til avrenning (Hendriks, 2010). Fukttap kan også anses

som gropmaganisering og vil si andelen vann som ikke bidrar til avrenning men går til å fukte opp overflaten. En illustrasjon over de ulike nedbørtapene vises i figur 2.7.



Figur 2.7: Den hydrologiske syklusen (Ritter, 2006).

2.2.2 Infiltrasjon

I de fleste tilfeller er det infiltrasjon som har den største tapseffekten når man beregner effektiv nedbør, og infiltrasjon er derfor svært viktig under flomanalyser. I motsetning til overflateavrenning som transporteres av elver og bekker, vil vann som infiltreres i bakken enten bli tatt opp av planter eller bli en del av grunnvannsstanden (Ødegaard, 2014). Grunnvannet transporteres i grunnen fra høytliggende til lavtliggende områder, og renner ofte ut i vassdrag, myrer eller åpne kilder (Ødegaard, 2014). Ved måling av avrenning er det derfor viktig å huske på bidraget fra grunnvannsstrømmen i tillegg til overflateavrenningen.

Vanligvis er det infiltrasjonsraten man er mest opptatt av å finne, og denne finner man med bruk av infiltrasjonsmodeller eller målinger. I følge Chin (2013) finnes det mange ulike infiltrasjonsmodeller fordi ingen infiltrasjonsmodell passer i alle situasjoner. De ulike modellene skiller ofte mellom den faktiske infiltrasjonsraten f og den potensielle infiltrasjonsraten f_p (Chin, 2013). Den potensielle infiltrasjonsraten, også kalt infiltrasjonskapasiteten, er definert som den vannmengden grunnen i teorien hadde klart å infiltrere hvis det er nok vann tilgjengelig (Chin, 2013).

Infiltrasjonsfysikken har vist seg å være svært komplisert, og opp gjennom årene har

det vært behov for forenklinger. De to vanligste infiltrasjonsmodellene som blir brukt er Horton-modellen (Horton, 1933) og Green-Ampt-modellen (Heber Green og Ampt, 1911). Horton er en enkel, empirisk modell som beskriver hvordan den potensielle infiltrasjonsraten f_p synker som en funksjon av tid (Chin, 2013). Green-Ampt er en infiltrasjonsmodell som er mer fysisk basert enn Horton, og er i dag sett på som en av de mest realistiske infiltrasjonsmodellene.

2.2.3 Overflateavrenning

Overflateavrenning forekommer på nesten alle typer nedbørfelt, både på impermeable overflater slik som tak, parkeringsplasser og asfalterte veier, samt permeable flater slik som gress- og grusflater (Akan og Houghtalen, 2003). På permeable flater oppstår ikke overflateavrenning før nedbørintensiteten overstiger infiltrasjonskapasiteten eller før grunnvannsspeilet er steget til overflaten. Man får høyere avrenning ved flater som har større grad av impermeabilitet. Overflateavrenningen strømmer under påvirkning av gravitasjon og renner på overflaten helt til det treffer på en grøft eller en rennestein (Akan og Houghtalen, 2003).

Overflateavrenningen kan betraktes som en spesiell form for åpen kanalstrømning med veldig liten vann dybde (Akan og Houghtalen, 2003). På grunn av den grunne vannstanden er det lett å anta at strømmingen har et lavt Reynoldstall og dermed har en laminær strømning. Det er derimot ikke tilfellet, fordi ved overflateavrenning er det mange andre faktorer som spiller inn på strømmingen (Akan og Houghtalen, 2003). Hindringer i den hydrauliske veien kan dra overflatestrømmingen vekk fra den laminære tilstanden og derav skape turbulens, selv med et opprinnelig veldig lavt Reynoldstall. Det er derfor fornuftig å ha en generell antakelse om at overflateavrenning har en turbulent strømning (Akan og Houghtalen, 2003).

2.2.4 Konsentrasjonstid

Konsentrasjonstiden er den parameteren som er mest brukt for å karakterisere responsen til et nedbørfelt for en nedbørhendelse (Chin, 2013). Konsentrasjonstiden har to mulige definisjoner:

- Tiden det tar for å få stasjonær vannføring ved utløpet av et nedbørfelt ved en uniform regnintensitet
- Tiden det tar for avrenningen å nå utløpet fra det hydraulisk fjerneste punktet i nedbørfeltet.

Chin (2013) påstår at formlene for konsentrasjonstiden, ofte uttrykt som t_c , har vanligvis den funksjonelle formen beskrevet i 2.4.

$$t_c = f(i_e, L, S_0, C) \quad (2.4)$$

hvor:

- t_c Konsentrasjonstid
- i_e Effektiv nedbørintensitet
- L Nedbørfeltets lengde
- S_0 Nedbørfeltets gjennomsnittlige helning
- C En parameter som beskriver nedbørfeltets overflate

Forholdet mellom konsentrasjonstid og regnvarighet beskrives vanligvis som en av tre situasjoner, vist i tabell 2.1 (Ponce, 2014). Likevektsvannføring vil si den vannføringen som opptrer når produsert avrenning er lik effektiv nedbør.

Tabell 2.1: Forhold mellom konsentrasjonstid og regnvarighet (Ponce, 2014).

Overkonsentrert avrenning	Konsentrert avrenning	Underkonsentrert avrenning
Regnvarigheten er lenger enn konsentrasjonstiden	Regnvarigheten er lik konsentrasjonstiden	Regnvarigheten er kortere enn konsentrasjonstiden
Avrenningen fra hele feltet rekker å bidra til avrenningen i utløpet samtidig	Avrenning fra hele feltet rekker akkurat å bidra til avrenningen i utløpet samtidig	De fjerneste delene av nedbørfeltet rekker ikke å bidra til avrenningen i utløpet før det har sluttet å regne
Maksimal vannføring er lik likevektsvannføring	Maksimal vannføring er lik likevektsvannføring	Maksimal vannføring er lavere enn likevektsvannføring

Imhoffs sats

For et nedbørfelt vil det bidragende arealet øke når regnvarigheten øker. Når regnvarigheten øker vil andelen av nedbørfeltet som rekker å bidra til avrenningen øke (Chin, 2013). Det bidragende arealet vil øke helt fram til konsentrasjonstiden er nådd, for deretter å være konstant. Det skyldes at når konsentrasjonstiden er nådd vil hele nedbørfeltet bidra til avrenningen, og det er ikke mer areal i nedbørfeltet som kan tilføre ytterligere avrenning (Chin, 2013). Nedbørintensiteten vil derimot synke når regnvarigheten øker. For de aller fleste nedbørfelt vil det være virkningen av et økende areal som har mest påvirkning på avrenningen framfor at nedbørintensiteten synker (Butler mfl., 2018). Det vil altså si at den maksimale avrenningen for et gitt gjentaksintervall for et nedbørfelt finner man når regnvarigheten er lik konsentrasjonstiden (Bøyum mfl., 1997). Dette prinsippet kalles Imhoffs sats og ligger til grunne for den rasjonale metode.

2.2.5 Den rasjonale metode

Den rasjonale metode er en enkel metode for å finne den maksimale avrenningen fra et felt ved et gitt gjentaksintervall. Metoden viser den maksimale avrenningen som funksjon av avrenningskoeffisienten, nedbørfeltets areal og nedbørintensiteten (Hendriks, 2010). I den rasjonale metoden blir det antatt at regnintensiteten i nedbørhendelsen er konstant gjennom hele hendelsen (Akan og Houghtalen, 2003). I tillegg er det også antatt at i nedbørhendelser med samme gjentaksintervall vil det være den hendelsen som har en regnvarighet lik konsentrasjonstiden til nedbørfeltet som vil produsere den største avrenningen. I den rasjonale metode setter man altså regnvarigheten lik konsentrasjonstiden for å finne maksimal avrenning (Akan og Houghtalen, 2003). Grunnen til dette kan beskrives gjennom *Imhoff's sats*.

Den rasjonale metode egner seg best ved overslagsberegninger, og grunnet alle antakelsene som blir brukt i metoden, blir den hovedsakelig benyttet over små områder, ca. 20-50 ha (Akan og Houghtalen, 2003).

$$Q = CiA \quad (2.5)$$

hvor:

- Q Maksimal vannføring [L^3/T]
- C Avrenningskoeffisienten [-]
- i Nedbørintensiteten [L/T]
- A Nedbørfeltets areal [L^2]

Avrenningskoeffisienten C er uttrykt som et tall mellom 0 og 1, og representerer tap og gropmaganisering i nedbørfeltet (Hendriks, 2010). Avrenningskoeffisienten blir bestemt på grunnlag av overflatens permeabilitet, overflatehelning, nedbørintensitet og regnvarighet. I tillegg kan lokale forhold ha en innvirkning på koeffisienten (Hendriks, 2010).

2.2.6 Ruhet

Ruhet kan fortelle om en overflate er ru eller glatt, og defineres vanligvis med bruk av Mannings ruhetskoeffisient n . Ruhetskoeffisientene for overflatestrømning er avhengig av overflatetype. I følge Chin (2013) blir Mannings n for overflatestrømninger benyttet ved svært grunne strømningsdybder. Denne strømningsdybden blir som oftest definert som en gjennomsnittsdybde. I virkeligheten derimot vil overflatestrømningen divergere og konvergere rundt mikrotopografiske høyder, steiner og vegetasjon, som gjør at strømningsdybden ikke opptrer som konstant (Chin, 2013). Mannings n vil faktisk avhenge av de mikrotopografiske parameterne. I noen tilfeller kan derfor Mannings n bli bedre definert hvis den uttrykkes som en funksjon av strømningsdybden, istedenfor å bli

representert som en konstant (Chin, 2013). Et utdrag av Mannings n er vist i tabell 2.2.

Tabell 2.2: Et utdrag fra tabell over Mannings n ved overflatestrømning (Chin, 2013).

Overflatetype	Mannings n	Variasjonsområde
Glatt betong	0,011	0,01-0,014
Asfalt	0,012	0,010-0,018
Jevn jord	0,018	0,015-0,021
Grus	0,02	0,012-0,030
Gress (Kort prærie)	0,15	0,10-0,25
Skog, ingen kratt	0,20	0,1-0,3
Gress (Tett)	0,24	0,15-0,35
Plen	0,25	0,20-0,30

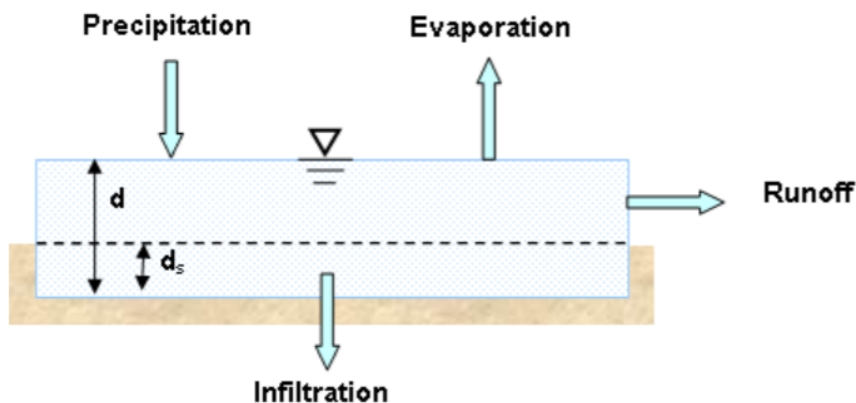
2.2.7 Ikke-lineær karmodell

En ikke-lineær karmodell er en nedbør-avløpsmodell som kan benyttes til beregninger av avrenning (Chin, 2013). Ikke-lineære karmodeller anser nedbørfelt som svært grunne reservoarer, der effektiv nedbør er vannstrømningen inn i karet og vannstrømning ut av karet er en funksjon av strømningsdybden over nedbørfeltet. Denne funksjonen er en ikke-lineær funksjon (Chin, 2013). Forskjellen mellom vannstrømningen inn og vannstrømning ut er lik endringen i lagringsmagasinene som befinner seg i nedbørfeltet. Overflateavrenningen per arealenhet i nedbørfeltet kan beregnes med formel 2.6 (Chin, 2013).

$$\frac{Q}{A} = \frac{W(d - d_s)^{\frac{5}{3}} S_0^{\frac{1}{2}}}{nA} \quad (2.6)$$

hvor:

- Q Overflateavrenning [L^3/T]
- A Nedbørfeltets areal [L^2]
- n Mannings gjennomsnittsrøhet for nedbørfeltet [-]
- W Representativ bredde for nedbørfeltet [L]
- d Vanndybde i nedbørfeltet [L]
- d_s Maksimal dybde i lagringsmagasiner [L]
- S_0 Gjennomsnittshelning i nedbørfeltet [-]



Figur 2.8: Konseptet bak overflateavrenning ved bruk av en ikke-lineær karmodell (Rossman, 2015).

Modelleringsprogrammet SWMM benytter seg av den ikke-lineære karmodellen, hvor hvert nedbørfelt blir behandlet som et ikke-lineært reservoar. Konseptet som SWMM benytter seg av er illustrert i figur 2.8 (Rossman, 2015).

2.3 Vannføringsregulering

Når man skal transportere vann fra et punkt til et annet, oppstår det ofte også et ønske om å kunne kontrollere vannføringen. Det er hovedsakelig pumper og ventiler som benyttes for å kunne kontrollere og regulere vannføring. I dette delkapittelet vil utstyret som ble vurdert til bruk i nedbør-avløpssimulatoren bli gjennomgått.

2.3.1 Ventiler

Det finnes mange ulike ventiler til forskjellige bruksområder. Blant annet kan ventiler brukes til å kontrollere og styre vanntilførsel, som vil være relevant for en nedbør-avløpssimulator.

Magnetventil

Magnetiske ventiler fungerer ved å bruke elektrisk strøm for å åpne eller lukke ventilen, slik at væske eller gass kan strømme gjennom røret (Nesse, 2018). En elektronisk magnetventil er vanlig å bruke der det er nødvendig å kontrollere start og stopp i strømningsystemer.

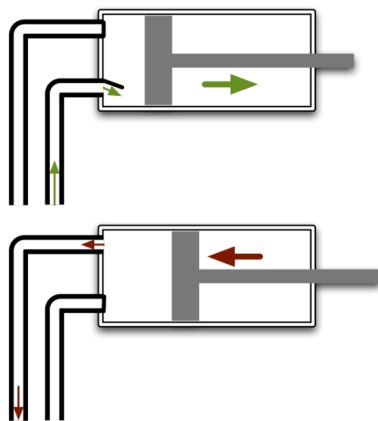
2.3.2 Pumper

Fortrengningspumper har gode muligheter for kontrollert og nøyaktig regulering av vannføring som er ønskelig når nedbør skal simuleres, og derfor blir det kun skrevet om fortrengningspumper i dette delkapittelet. Fortrengningspumper vil si pumper som «låser» fast et visst volum av enten en væske eller en gass, for å deretter presse det videre ut gjennom utløpet av pumpa (Mathisen, 2018).

Stempelpumpe

En stempelpumpe er et klassisk eksempel på en type Pumpe innenfor fortrengningspumper. En stempelpumpe består av én eller flere sylindere, et stempel, en innløpsventil og en utløpsventil (Mathisen, 2018). Dette vises i figur 2.9. Når stempelet blir trukket bakover blir det sugd inn væske i innløpsventilen og videre inn i cylinderen. Når cylinderen har fylt seg opp med et visst volum væske, vil innløpsventilen stenge (Mathisen, 2018). Stempelet vil deretter begynne å bevege seg framover i cylinderen og presser væsken ut gjennom utløpsventilen (Mathisen, 2018).

I stempelpumper er vannføringen lite følsom for motstanden i den hydrauliske kretsen det pumpes gjennom (Mathisen, 2018). Ulempene med stempelpumper er at de ofte skaper pulsering i strømmingen.

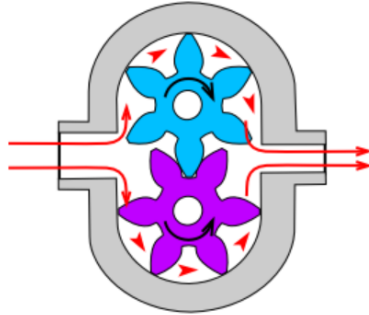


Figur 2.9: Prinsippskisse av en stempelpumpe (Mathisen, 2018).

Tannhjulpumpe

I en tannhjulpumpe vil pumpa bestå av et pumpekammer og ett eller flere tannhjul (LabMo, 2019). I figur 2.10 ser man to tannhjul som roterer i motsatt retning. Det fører til at ved innløpet av pumpa vil tennene i tannhjulene slippet grepet, og væskevolumet økes (LabMo, 2019). Væsken blir så fraktet videre i rommet mellom tennene og pumpeveggen. Når væsken har nådd utløpet, vil tennene gripe hverandre igjen og volumet vil minke. Væsken vil bli presset ut, akkurat som ved stempelpumpa (LabMo, 2019).

En tannhjulspumpe vil gi en god og jevn væskestrøm med liten pulseringseffekt (Mathisen, 2018). Pumpa tilbyr ofte store strømningsområder. Den egner seg derimot ikke hvis en trenger høy nøyaktighet på doseringsvolumer og heller ikke i tilfeller hvor pumpa skal kjøres helt til væskemengden er tom (Mathisen, 2018).

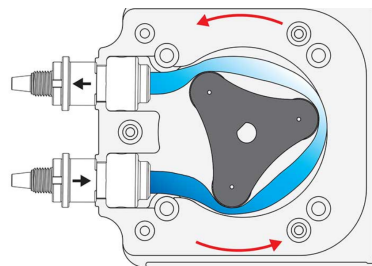


Figur 2.10: Prinsskisse av en tannhjulspumpe (Mathisen, 2018).

Peristaltpumpe

En peristaltpumpe består av en slange og en valse, hvor slangen er montert i et pumpehus (Verder, udatert). Slangen blir periodevis utsatt for kompresjon av en roterende valse som beveger seg langs slangen (Verder, udatert), som vises i figur 2.11. Den roterende valsen skaper et midlertidig segl mellom innløpet og utløpet slik at det oppstår et trykk inne i slangen. På grunn av den roterende bevegelsen vil dette trykket dytte væsken vekk fra innløpet og ut mot utløpet. Det dannes et undertrykk der hvor trykket slipper tak, som gjør at det suges væske inn i slangen (Verder, udatert).

Noen ulemper med peristaltiske pumper er at de har et begrenset hydraulisk område de kan jobbe i, samtidig som at de ofte skaper pulserende strømninger (Stewart, 2019). I tillegg så vil pumpa være avhengig av slangens levetid, som er begrenset ettersom slangen konstant blir utsatt for kompresjoner fra den roterende valsen (Stewart, 2019). Det er derfor viktig at slangen byttes ut med jevne mellomrom.



Figur 2.11: Illustrasjon av en peristaltpumpe (Burke, 2018).

2.4 Vannføringsmåling

I VA-miljøblader (VA Miljø Blad, 2018b) tilbys god informasjon om ulike måleinstrumenter. I de neste delkapitlene vil det gis en kort forklaring av hvordan de ulike metodene og måleinstrumentene fungerer. Det er mulig å måle vannføring på flere måter. Det kan måles i fylte rør, i åpne renner og delfylte rør, og ved konstant nivå- eller mengdemåling i en oppsamlingstank. For en nedbør- avløpssimulator vil det være ønskelig å finne en god målemetode for overflateavrenning.

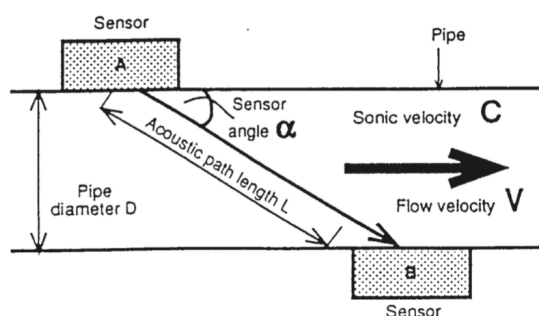
2.4.1 Vannføringsmåling i fylte rør

Elektromagnetisk mengdemåler

En elektromagnetisk mengdemåler består av et målerør der det er installert spoler på hver side. Ved å sende strøm gjennom disse spolene skapes et magnetfelt og den induerte spenning endres når en væske med ledningsevne passerer gjennom måleren (VA Miljø Blad, 2018c). Endring i induert spenning benyttes til å bestemme vannføringen.

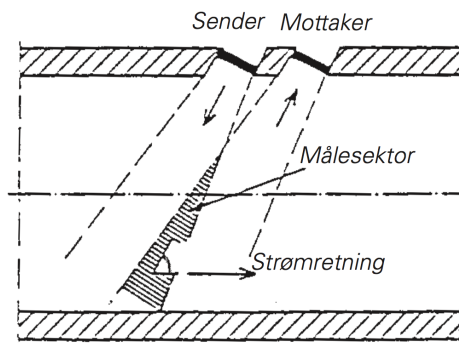
Ultralyd mengdemåler

En ultralyd mengdemåler, som vises i figur 2.12, basert på transittid sender akustiske signaler gjennom mediet fra sensorer som er montert på hver side av røret. Signalene sendes medstrøms og motstrøms i en vinkel på 45° og tidsdifferansen mellom signalet medstrøms og signalet motstrøms er et direkte mål på hastigheten til mediet (VA Miljø Blad, 2018c).



Figur 2.12: Virkemåte for ultralyd mengdemåler. Tatt fra VA Miljø Blad (2018c).

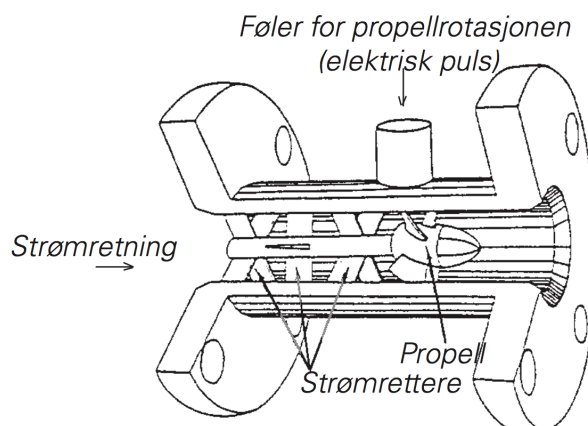
Det finnes også ultralydmålere som bruker dopplereffekt som vist i figur 2.13. En sender og en mottaker er montert på samme side av røret og vannføringen beregnes indirekte ved hjelp av at hastigheten på partiklene i vannet måles (VA Miljø Blad, 2018c).



Figur 2.13: Prinsipp for dopplermåling. Tatt fra VA Miljø Blad (2018c).

Turbinmåler

Turbinmåleren som vises i figur 2.14 har en propell som nesten fyller hele tverrsnittet, der propellakslingene hviler på lagre som lar propellen rotere fritt om akslingen (VA Miljø Blad, 2018c). Vannstrømmen setter propellen i rotasjon og rotasjonshastigheten forteller hvor stor vannføring det er i røret.



Figur 2.14: Eksempel på turbinmåler med elektrisk pulsteller for rotasjonshastigheten. Tatt fra VA Miljø Blad (2018c).

2.4.2 Vannføringsmåler i åpne renner og delfylte rør

Vannføringsmåling i åpne renner

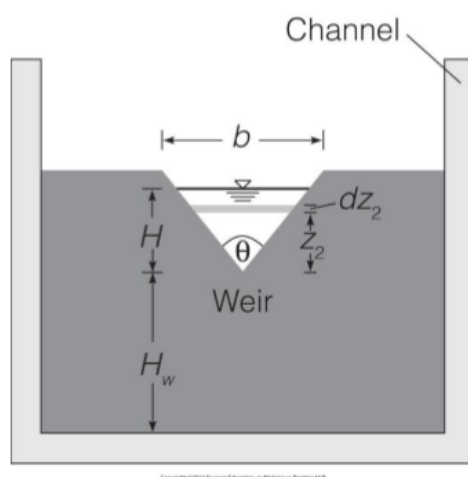
Renner som brukes til å måle vannføring kan være utformet på flere forskjellige måter. En definert vannhøyde i målerenna gir en definert vannmengde gjennom renna, beregnet etter et definert formelverk (VA Miljø Blad, 2018d). For måling av vannhøyden er det vanlig å bruke ultralydmåler, radar, og i noen tilfeller trykkmåler.

Vannføringsmåling ved terskeloverløp

Vannføringsmåling ved terskeloverløp er ganske likt som for åpne renner. De vanligste utformingene er rektangulært overløp og V-overløp. Det er kun høyden som er variabelen og den måles ved kjent terskel (VA Miljø Blad, 2018d). Strømningshastigheten Q over et V-overløpet er gitt ved (Chin, 2013):

$$Q = \frac{8}{15} C_d \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) H^{\frac{5}{2}} \quad (2.7)$$

θ er vinkelen i V-overløpet. Et eksempel på et V-overløp vises i figur 2.15.



Figur 2.15: Eksempel på et V-overløp (Chin, 2013).

C_d vil variere ut i fra vinkelen til V-overløpet. Vanligvis er det godt nok å bruke C_d lik 0,58 for en vinkel mellom 20° og 100° , og høyde H større enn 5 cm (Chin, 2013). For høyder lavere enn 5 cm, vil både viskositeten og overflatespenningen ha en betydning for verdien av C_d .

Vannføringsmåling i delfylte rør

Vannføringsmåling i delfylte rør har hovedsakelig to måleprinsipper (VA Miljø Blad, 2018d). Vannføring kan måles ved hjelp av ultralyd og trykk, der hastigheten på vannet kan måles med ultralyd vha. doppler prinsippet. Trykk måles på samme punkt og vannstanden er dermed kjent i det punktet. Ettersom utformingen på røret, vannstanden og hastigheten er kjent, kan vannføringen beregnes.

Vannføring kan også måles med en elektromagnetisk mengdemåler i kombinasjon med

en kapasitiv måler. En elektromagnetisk mengdemåler for delvis fylte rør og for fylte rør er ganske like. I delvis fylte rør er måleelektroden plassert på bunnen av måleren, noe som gjør at hastigheten kan måles ved lavt nivå i røret (VA Miljø Blad, 2018d). Det er også innebygd en kapasitiv måler i bekledningen til røret som måler vannstanden.

2.4.3 Vannføringsmåler ved nivå- eller mengdemåling

Vannføring kan beregnes ved å samle opp vann og måle endring i volum over tid. Ved god nok oppløsning vil man få tilnærmet riktig momentanvannføring. Det er flere måter å måle endring i volum på.

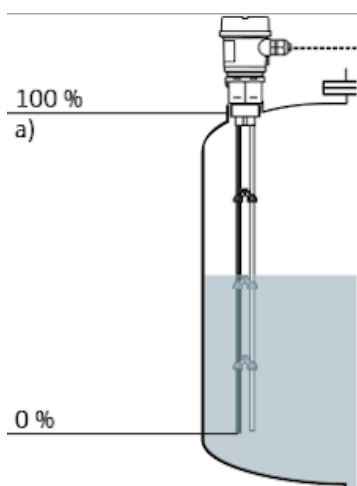
Endring i volum kan måles med vekt, der vekten kan regnes om til volum når tettheten til væsken er kjent (Tipler og Mosca, 2008).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.8)$$

hvor:

ρ	Tetthet [M/L ³]
m	Masse [M]
V	Volum [L ³]

En nivåsonde kan senkes ned i en væske og måle det hydrostatiske trykket, som gir meter væskehøyde (VA Miljø Blad, 2018a). Ved kjent utforming av tanken og kjent væskehøyde er dermed vekten kjent. Både ultralyd og radar kan brukes til nivåmåling. Det sendes ut et signal og tiden det tar å motta et ekkosignal fra en overflate måles. Gangtiden representerer avstanden fra måleren til overflaten og dermed er nivået i tanken kjent. (VA Miljø Blad, 2018a). Bildeanalyse kan til en hver tid tolke nivået i en tank og vil fungere på samme måte som de andre nivåmålerne. En kapasitiv sonde, som vises i figur 2.16, kan brukes til nivåmåler og fungerer ved at sonden og mediet danner en elektrisk kondensator. Når tanken fylles, øker kapasitansen jo mer sonden dekkes og den målte kapasitansen konverteres til et signal med informasjon om nivået i tanken (Endress+Hauser, 2020).

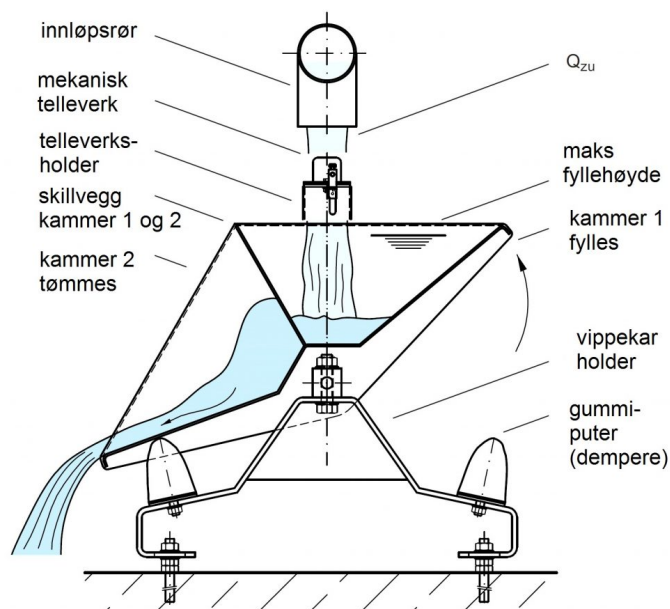


Figur 2.16: Eksempel på en kapasitiv sonde i en tank (Endress+Hauser, 2020).

2.4.4 Alternativ vannføringsmåler

Vippekar

Vippekar brukes hovedsakelig til å måle intensitet ved store nedbørhendelser, men det kan også benyttes til å måle vannføring. Et vippekar er bygd opp slik som vist i figur 2.17. Karet tippes når det er fullt. Ved å registrere hver gang et kar tipper, og volumet av karet er kjent kan den gjennomsnittlige vannføringen over det tidsintervallet måles (Hoås, 2018).



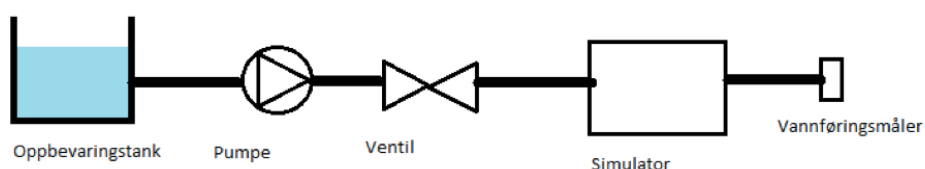
Figur 2.17: Eksempel på et vippekar (MFT, 2020) .

3. Metode

Målet med oppgaven er å utforme og produsere en nedbør-avløpssimulator som skal brukes til undervisning. Det er ønskelig at simulatoren skal simulere nedbørhendelser med vilkårlig tidsvariasjon. Avrenningsforløpet skal sammenlignes med nedbøren, og kan demonstrere hvordan avrenningen varierer ved ulike nedbørhendelser og feltkarakteristikk. Nedbørhendelsen og avrenningsforløpet skal gi data som kan sammenlignes med nedbør-avløpsmodeller.

3.1 Utvikling av nedbør-avløpssumulatoren

Den første delen av oppgaven besto blant annet av å velge nedbørintensiteter, modellregn og nedbørfelt. Følgelig ble det nødvendig å predikere konsentrasjonstiden ved ulike nedbørfelt og beregne maksimal avrenning. Størrelse, overflatetype og felthelning var de viktigste faktorene ved utforming av nedbørfeltet. Et flytskjema ble laget tidlig i planleggingsfasen og vises i figur 3.1. Det var nødvendig å finne en god måte å tilføre og regulere vann til simulatoren. Fordelingssystemet måtte utformes på en måte som gjorde at nedbøren ble realistisk representert. Avslutningsvis var det nødvendig å gjennomføre analyser av hvordan overflateavrenningen fra nedbørfeltet skulle måles og logges.



Figur 3.1: Flytskjema av nedbør-avløpssumulatoren tidlig i planleggingsfasen.

3.1.1 Nedbørintensitet, konsentrasjonstid og nedbørfelt

Det ble bestemt at simulatoren skulle kunne demonstrere kasseregner, trekantregner og symmetriske blokkhyetogram. Til beregninger av konsentrasjonstid og nedbørintensiteter ble det benyttet data fra IVF-kurven fra Rustadskogen i Ås. IVF-kurven vises i figur 2.1 i delkapittel 2.1.2. Rustadskogen målestasjon startet med målinger i 1974 og angir derfor en kurve med lang måleserie og god tidsoppløsning (NKSS, udatert). Det ble benyttet ordinære fremfor nedskalerte nedbørintensiteter for å tydelig vise effekten av ekstreme nedbørhendelser.

Det er viktig at konsentrasjonstiden er så lang at det er mulig å måle avrenningen fra nedbørfeltet og produsere et godt utløpshydrogram. Ved for kort konsentrasjonstid kan avrenningen skje så fort at målingen kan bli unøyaktig. Det ble derfor siktet mot at nedbørfeltet bør ha en konsentrasjonstid på minst ett minutt og en lengde på 2 m. For å ta hensyn til at simulatoren skal bli brukt i vanlige undervisningstimer, er det heller ikke ønskelig å ha en alt for lang konsentrasjonstid.

Konsentrasjonstiden kan beregnes ved bruk av den kinematiske bølgeformelen vist i formel 3.1 (Chin, 2013). Formelen er mye brukt for beregninger av overflatestrømning. En viktig forutsetning ved bruk av formelen, er at regnet må være uniformt distribuert over nedbørfeltet. Uniformitet ble derfor et krav som måtte tas hensyn til ved videre utvikling av simulatoren (Chin, 2013).

$$t_c = \frac{6,99}{i_e^{2/5}} \left(\frac{nL}{\sqrt{S_0}} \right)^{3/5} \quad (3.1)$$

hvor:

- t_c Konsentrasjonstid [min]
- i_e Midlere nedbørintensitet [mm/t]
- n Overflatens ruhet [-]
- L Nedbørfeltets lengde [m]
- S_0 Nedbørfeltets helning [-]

Det ble plukket ut et bredt spekter av midlere nedbørintensitet fra IVF-kurven ved ulike gjentaksintervall og ved ulike regnvarigheter. Gjentaksintervall 2, 10, 25, 50 og 100 år ble benyttet i analysen. For hvert gjentaksintervall ble det valgt regnvarigheter på 2, 3, 5, 10, 15, 20, 30, 45 og 60 minutter. Når gjentaksintervallet øker vil nedbørintensiteten øke og derav vil konsentrasjonstiden blir kortere. Det ble derfor konkludert med at å simulere et regn med gjentaksintervall 200 år eller høyere var uaktuelt, siden konsentrasjonstiden i disse tilfellene ble alt for kort.

Nedbørhendelsen fra IVF-kurven med gjentaksintervall på 100 år og regnvarighet på to minutter gir derfor størst intensitet på 182,4 mm/t. For å kunne simulere trekantregn, ble nedbørintensiteten fra IVF-kurven doblet og satt til 364,8 mm/t. Ettersom det er ønskelig å kjøre modellregn i simulatoren vil minimal intensitet tilført simulatoren være tilnærmet lik null.

Simulatoren er dimensjonert for den maksimale nedbørintensiteten. Størrelsen på nedbørfeltet i simulatoren ble satt til 2 m², med en lengde på 2 m og en bredde på 1 m. En mindre størrelse vil skape utfordringer med å få lang nok konsentrasjonstid. Det er heller ikke ønskelig å ha simulatoren større enn 2 m², med tanke på plassbruk og mobilitet. Ved å benytte helninger mellom 10 og 50 ‰ og ruhet n mellom 0,02 og 0,25, vil det være mulig å simulere en nedbørhendelse med 100 års gjentaksintervall der konsentrasjonstiden er høyere enn ett minutt.

I følge Chin (2013) har plen en ruhet n på 0,25 og grus en ruhet n på 0,02. Verdierne passer i det ønskelige ruhetsspekteret og det ble derfor bestemt at disse overflatene som skulle etterlignes. Grusen er pålimt på en plate, mens gresset er en innkjøpt kunstgressmatte. Formålet med ulike overflater er å vise de tydelige forskjellene på avrenningsforløpet ved ulike intensiteter. Bunn av nedbørfeltet er lagd av stål. Det ble opprinnelig antatt at konsentrasjonstiden ved denne overflaten er for kort.

3.1.2 Regulering av vanntilførsel

For å simulere modellregn i nedbør-avløpssimulatoren er det viktig å kunne kontrollere og regulere vanntilførselen. Det er ønskelig at utstyret har digital kommunikasjon slik at det enklere kan styres gjennom et dataprogram, for å enkelt kunne simulere modellregn. En pumpe er nødvendig for å tilføre vann til systemet. Bruk av en ventil i kombinasjon med en pumpe er kun nødvendig hvis pumpa ikke kan styres tilstrekkelig. For å kunne simulere trekantregn og symmetriske blokkhyetogram må pumpa kunne styres slik at både en jevn- og trinnvis økning i vannføring er mulig. Etter beregninger gjort i delkapittel 3.1.1, var det nødvendig med en pumpe som kunne tilføre en nedbørintensitet fra 0 til 364,8 mm/t, som tilsvarer en vannføring fra 0 til ca. 200 ml/s med et felt på 2 m². Det ble antatt at en oppløsning på 5 ml/s i innstilt pumpevannføring var godt nok.

Watson Marlow 360Du

Faktorer som pris og tilgjengelighet hadde en betydning i valg av pumpe. Det ble konsultert med flere ulike leverandører angående pumper som tilfredstilte de spesifikke kravene som var satt og det var utfordrende å finne en pumpe som leverte vannføring i det ønskelige hydrauliske spekteret. Christian Berner (udatert) fører en peristaltpumpe fra Watson Marlow.



Figur 3.2: Watson Marlow 360Du pumpe (Watson-Marlow, 2018).

Watson Marlow 360Du har en begrensning i det hydrauliske området fra 0 til 192 ml/s. Den tilfredsstillende altså ikke kravet om en maksimal vannføring på 200 ml/s. Likevel er differansen så liten at dette blir sett bort ifra. Pumpa styres med intervaller på 0,1067 ml/s, som er godt innenfor ønsket om en oppløsning på 5 ml/s.

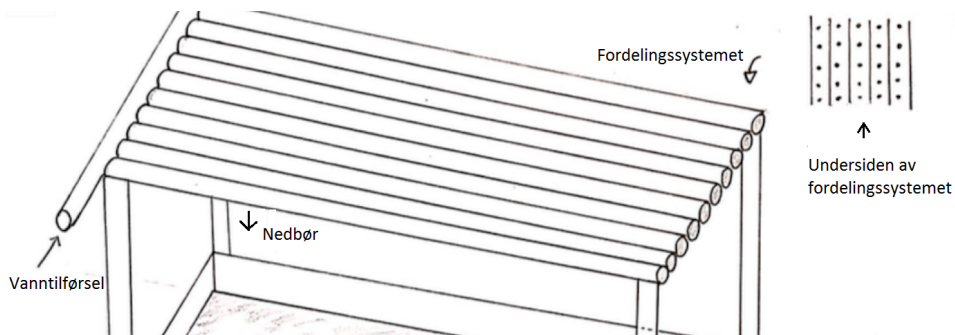
Den største ulempen med peristaltpumper, nevnt i delkapittel 2.3.2, er at den ofte kan skape pulserende væskestrømninger. For å minske pulseringen var det mulig å velge «*Twin Channel Low Pulse Pumpheads*» som vises i figur 3.2. Det monteres to valser parallelt i pumpehuset, hvor begge valsene vil kjøre og bevege seg samtidig, men vekselvis suge inn og dytte ut vann. Pulseringen antas å bli så liten at den er ubetydelig for modellregnet som skal simuleres. En fordel med peristaltpumper er at de har en tilnærmet konstant pumpekurve, dvs. at for en gitt pumpehastighet er ikke vannføringen så følsom for motstanden i den hydrauliske kretsen det pumpes gjennom. Pumpa har digital kommunikasjon og det ble laget et dataprogram for styring av pumpa i LabView.

3.1.3 Fordelingssystem

Primært sett er det dyser som er blitt tatt i bruk for å fordele simulert nedbør. Ifølge J. B. Humphry mfl. (2002) foretrekkes som oftest dyser ovenfor dråpeformere fordi de er mer mobile og klarer å håndtere større nedbørintensiteter og areal. Vanligvis blir dyser ofte plassert høyt over nedbørfeltet. Det kan skape problemer hvis simulatoren blir plassert innendørs, både pga. plassmangel og vannsprut. I tilfeller hvor man trenger mer enn én dyse får man ofte utfordringer med nedbørens uniformitet fordi dysene vil regne over hverandres områder, og dermed forårsake at visse områder på feltarealet vil få dobbelt opp med nedbør. Dyser krever et høyt trykk for å fungere, og det vil derfor være vanskelig å simulere lave nedbørintensiteter. Dyser er derfor ikke et godt alternativ

for små nedbørfelt eller for å kunne simulere modellregn.

Det ble derfor bestemt at fordelingssystemet for nedbøren skulle utformes med rør, som vist i figur 3.3. Rørene skulle opprinnelig ha en underside med flere hull som plasseres uniformt for å kunne distribuere nedbøren. Ved bruk av et rørsystem er det lettere å få nedbøren uniformt fordelt over nedbørfeltet, i tillegg til at man får bedre kontroll over nedbørintensitetene.



Figur 3.3: Fordelingssystemet tidlig i planleggingsfasen.

Tap i tilførselsrør

Det er ønskelig med lite tap i røret som går fra pumpeutløpet til fordelingsrørene over nedbørfeltet. Minimalt tap i tilførselsrøret vil gi lite motstand i den hydrauliske kretsen og det fører til mer nøyaktig levering av vannføring. For å finne friksjonstapet i tilførselsrøret ble Darcy-Weisbach formelen benyttet, vist i 3.2 (Chin, 2013). Hovedsakelig ble formelen brukt som framstilt i 3.3.

$$h_f = \frac{fL V^2}{D 2g} \quad (3.2)$$

hvor:

- h_f Friksjonstap [L]
- f Friksjonsfaktor [-]
- L Rørlengde [L]
- D Rørdiameter [L]
- V Gjennomsnittelig strømningshastighet [L/T]
- g Gravitasjonskonstant [L/T²]

$$\frac{h_f}{L} = \frac{8fQ^2}{D^5\pi^2g} \quad (3.3)$$

Tap per lengdeenhet ble beregnet for tilførselsrøret. Røret er lagd av plast og fra delkapittel 3.1.2 er det hydrauliske området kjent. Vannføringene som ble tatt med i analysen rangerte fra 20 ml/s til 200 ml/s med stegvis økning på 20 ml/s. Diameterne ble satt vilkårlig, og rangerte fra 20 mm til 80 mm med stegvis økning på 10 mm. Hastighetene kunne beregnes ved bruk av kontinuitetslikning, vist i formel 3.4 (Chin, 2013).

$$Q = VA \quad (3.4)$$

hvor:

- Q Volumstrømning [L^3/T]
- V Strømningshastighet [L/T]
- A Tverrsnittsareal [L^2]

Ved å kjenne både viskositeten ν til vann og vannets strømningshastighet var det mulig å beregne Reynoldstallet Re for de ulike diameterne ved ulik vannføring. Dette ble gjort ved bruk av formel 3.5 (Chin, 2013). Ved å kjenne den relative ruheten k_s til plastrør kunne man da beregne friksjonsfaktoren f vist i formel 3.6 for laminære strømninger eller 3.7 for turbulente strømninger (Chin, 2013).

$$Re = \frac{DV}{\nu} \quad (3.5)$$

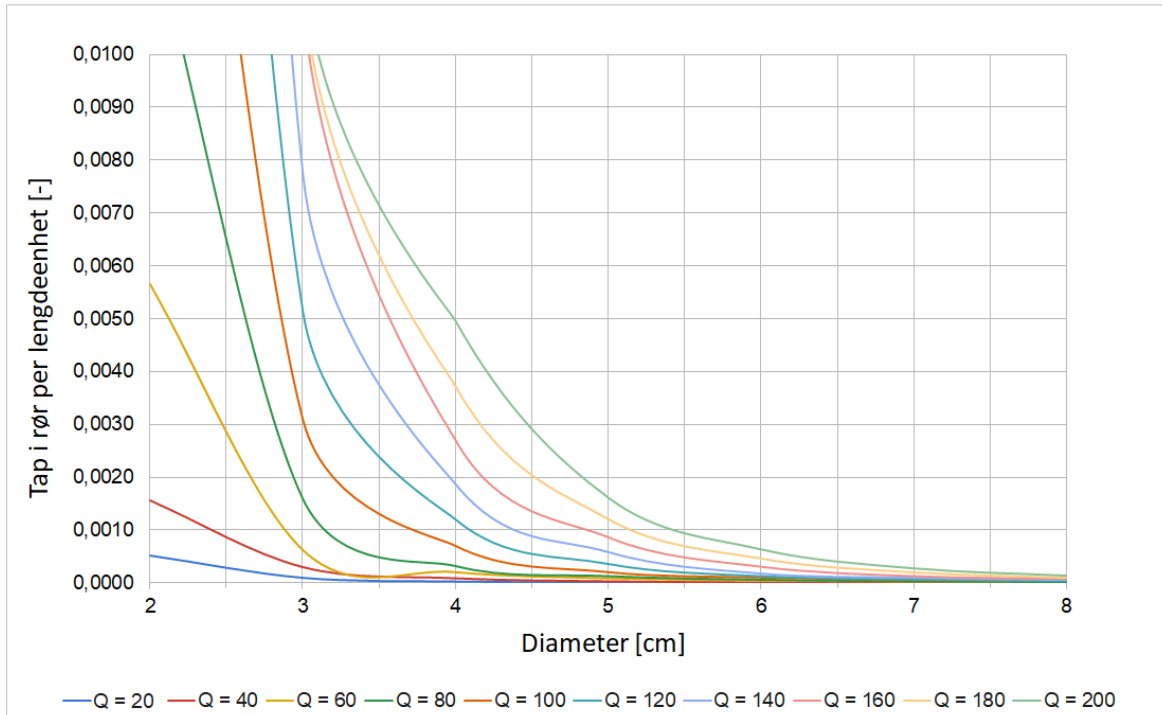
$$f = \frac{64}{Re} \quad (3.6)$$

$$f = \frac{0,25}{[\log(\frac{k_s}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}})]^2} \quad (3.7)$$

hvor:

- Re Reynoldstall [-]
- D Rørdiameter [L]
- V Vannets strømningshastighet [L/T]
- ν Viskositet [L^2/T]
- f Friksjonsfaktor [-]
- k_s Relativ ruhet [L]

Det ble antatt at tap per lengdeenhet under 1 ‰ var akseptabelt. Figur 3.4 demonstrerer sammenhengen mellom rørdiameter og tap som oppstår per lengdeenhet ved ulike vannføringer. Grafen tilsier at tilførselsrøret må ha en indre diameter lik eller større enn 5,5 cm for at tapet skal ligge på under 1 ‰.

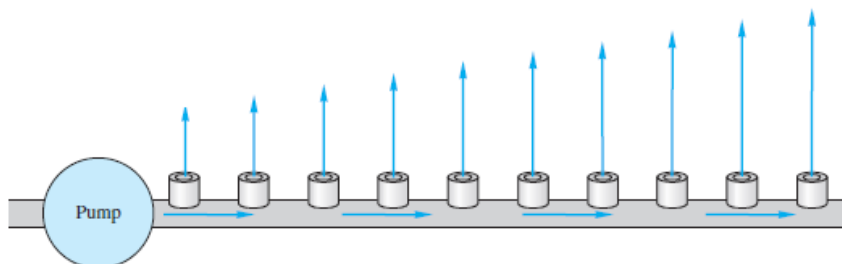


Figur 3.4: Tap per lengdeenhet ved ulike diametere for ulike vannføringer i tilførselsrør. Vannføring er gitt i ml/s.

Ved å velge en indre diameter på større enn 5,5 cm vil friksjonstapet være minimalt og det utgjørende tapet i tilførselsrøret vil skyldes singulærtap. Singulærtap vil oppstå i rørbend og i manifolden som knytter tilførselsrøret til fordelingsrørene, som kan ses i figur 3.3. Det vil ikke være mulig å unngå singulærtap i fordelingsystemet.

Tap i fordelingsrør

Det er også viktig å vite hvor mye tap som oppstår i fordelingsrørene. Etterhvert som vann tas ut av fordelingsrørene for å fordele nedbøren over feltet vil vannføringen synke. Dermed vil også hastigheten i rørene synke når man nærmer seg endene i fordelingsrørene. Fra en Bernoulli-betraktning vet man at ved lavere hastighet er det høyere trykk. I et friksjonsløst system vil derfor vannføringen kunne bli større gjennom hullene nærmest enden i fordelingsystemet, som man kan se i figur 3.5. Et friksjonstap i røret vil virke i motsatt retning.



Figur 3.5: Fordeling av vannføring i et friksjonløst rør (White, 2016).

Begge effektene vil minimeres ved å ha stor diameter i fordelingsrørene. Friksjonstapet blir mindre ved større diametere og variasjonen i trykk som følge av hastighetsendring vil minimeres ved større diametere.

Beregningsprosedyren for å finne tap per lengdeenhet i fordelingsrørene var nesten lik som prosedyren for tilførselsrøret. Forskjellen var at man måtte ta hensyn til at vannføringen skulle fordele seg på et visst antall rør i fordelingsystemet. Derfor rangerte vannføringen seg annerledes ved endring i antall rør og rørdiameter. Resultatene vises i tabell 3.1.

Tabell 3.1: Tap per lengdeenhet ved ulikt antall rør og ulike rørdiametere for fordelingsrør.

Antall rør, n [-]	Rørdiameter, D [cm]	$Q_{\min} - Q_{\max}$ [mL/s]	Største tap per lengdeenhet, h_f/L [-]	Tap på under 1 promille
50	2	0,4-4	0,000104	Ja
33	3	0,0606-6,06	0,0000311	Ja
25	4	0,8-8	0,00001298	Ja
20	5	1-10	0,00000665	Ja

Tabell 3.1 viser at friksjonstapene som oppstår i fordelingsrørene er så små at hvis man kun ser på friksjonstap så har valg av diameter liten betydning. Det er likevel ikke ønskelig med liten diameter ettersom variasjonen i trykk som følge av hastighetsendring i røret vil minske ved større diametere. Det er også andre faktorer som spiller inn ved valg av diameter, slik som tapet som oppstår i de små hullene som skal fordele nedbøren.

Hulldimensjoner

Som nevnt skulle fordelingsystemet opprinnelig bestå av fordelingsrør med hull på undersiden. Hullene ville fungert som nedbørens utløp. For å kunne simulere f.eks. kasseregn er det nødvendig å ha konstant nedbørintensitet med momentan start og stopp. Derfor er det nødvendig med fullstendig kontroll av vannføringen ut av de små hullene som skal fordele nedbøren. For å sikre at nedbøren blir uniform må vannføringen ut i fra hullene begynne på samme tidspunkt over hele fordelingsystemet. Hulldiameteren må derfor ikke være så stor at røret ikke klarer å fylles opp før det begynner å renne ut av hullene, men heller ikke så små at det krever ekstremt høye trykk for å oppnå den maksimale nedbørintensiteten. Tapet gjennom hullene må derfor være så stort at vannet holdes tilbake til alle fordelingsrørene er fylt opp. Ved bruk av blendeformelen 3.8 var det mulig å beregne den nødvendige hulldiameteren.

$$Q_{hull} = C_d A_0 \sqrt{2gh} \quad (3.8)$$

hvor:

Q_{hull}	Volumstrømning ut per hull [L ³ /T]
C_d	Vannføringskoeffisient [-]
A_0	Tverrsnittsareal på hull [L ²]
g	Gravitasjonskonstant [L/T ²]
h	Trykkehøyde [L]

Vannføringskoeffisienten er delvis et uttrykk for tap. Hullene på undersiden av fordelingsrørene kommer til å bli svært små, og den vanlige antakelsen om en vannføringskoeffisient C_d på 0,6 er mest sannsynlig feil. Ved veldig små hulldiameterer kan f.eks. overflatespenning ha en betydelig påvirkning på vannføringskoeffisienten. Det ble derfor nødvendig å gjennomføre forsøk for å kunne beregne den faktiske vannføringskoeffisienten gjennom ett hull med en kjent diameter og ved kjent trykk.

Forsøket ble gjennomført ved å stikke et hull gjennom bunnen av en balje med en nål som hadde kjent ytre diameter. Trykket kunne kontrolleres ved å fylle vann i baljen til en kjent høyde. Videre var det da mulig å måle volumstrømning ut av hullet ved bruk av en målesylinder og stoppeklokke. Ved bruk av formel 3.8 ble C_d beregnet, og man kunne uttrykke en sammenheng mellom trykk, vannføringskoeffisient og vannføring. Resultatene vises i tabell 3.2.

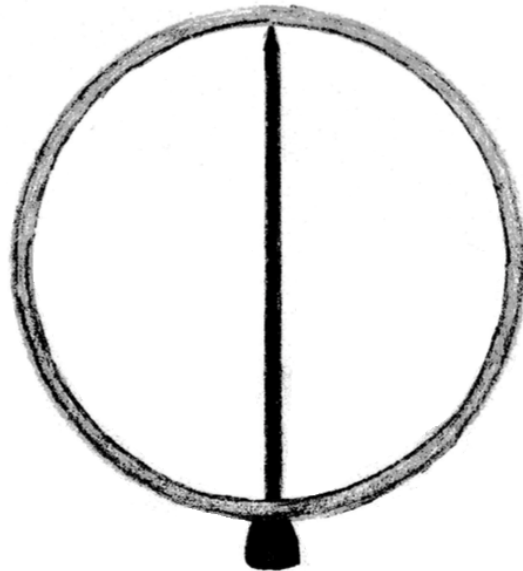
Tabell 3.2: Energitap gjennom hull med diameter 0,6 mm i fordelingsrør.

Hulldimensjon 0,6 mm				
Trykk [cmVS]	Q, gjennomsnitt [ml/s]	Areal [mm ²]	Hastighetshøyde [m]	Vannføringskoeffisient, C_d [-]
3	0,0324	0,283	0,767	0,1493
5	0,0428	0,283	0,990	0,1528
10	0,0997	0,283	1,400	0,2517

Både observasjoner i forsøket og tabell 3.2 viser at selv ved et veldig lavt trykk på 3 cmVS, ble det fortsatt ikke nok tap i hullet til at vannet ble holdt tilbake. For å oppnå lavere trykk enn 3 cmVS kreves det veldig små fordelingsrør, noe som heller ikke er ønskelig med tanke på trykkdifferansen i røret som er beskrevet tidligere. En bedre løsning måtte derfor utarbeides.

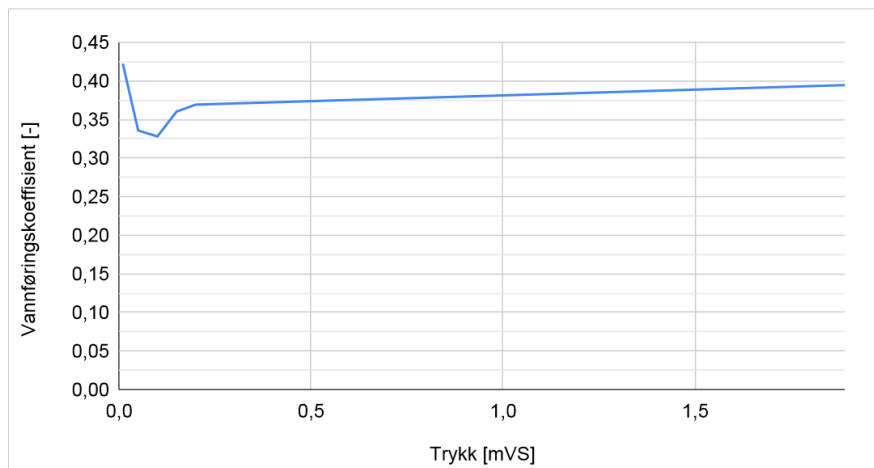
Kanyler

Kanyler fremfor hull i fordelingssystemet vil være en bedre måte å kontrollere nedbøren på. Kanyler kan føres gjennom bunnen av rørene og kanylespissen bør ligge så nærme toppen av røret som mulig, som vist i figur 3.6. Ved en slik plassering vil det være mulig å fylle opp alle fordelingsrørene før det begynner å renne ut. Det vil også være mulig å ha en stor diameter på fordelingsrørene som minimerer tap og trykkdifferanse.

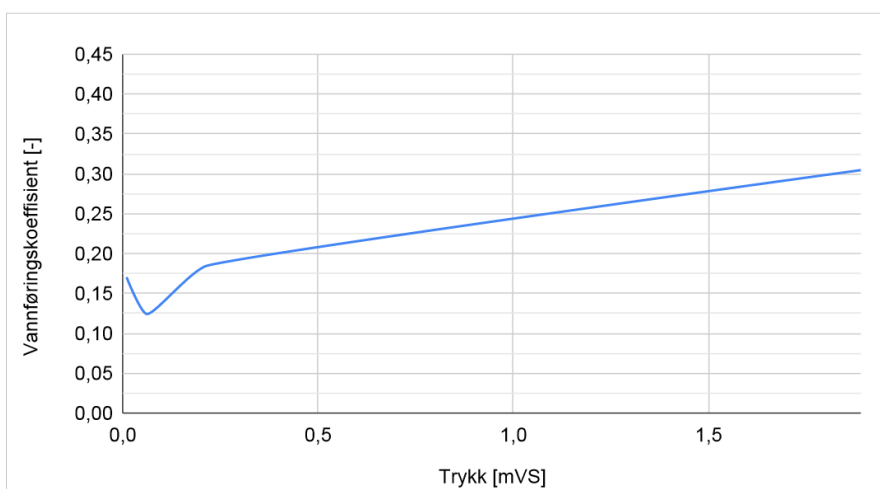
**Figur 3.6:** Illustrasjon av kanyle i fordelingsrør.

Kanylen hadde en lengde på 38 mm. For å oppnå en minimal avstand mellom kanylespissen og den indre rørveggen ble det benyttet rør med ytre diameter 40 mm og 1,9 mm veggtykkelse. På denne måten vil kanylen ha en avstand på 0,1 mm fra kanylespiss til taket i røret. Det ble antatt at det var nok med en avstand på 5 cm i både bredde og lengde mellom hver kanyle i fordelingsrørene, for å få en uniform fordeling av nedbøren. Det blir totalt 800 kanyler i fordelingsystemet.

Det var nødvendig å finne ut om det var mulig å kontrollere de laveste nedbørintensitetene gjennom kanylene. Det var derfor nødvendig å gjøre forsøk på vannføringskoeffisient, vannføring og trykk. Forsøkene ble gjennomført på samme måte som ved hullsystemet, bare med en kanyle. Sammenhengen mellom vannføringskoeffisient C_d og trykkehøyde for kanylene vises i figur 3.7 og 3.8. Ytterligere verdier fra forsøkene vises i vedlegg A.



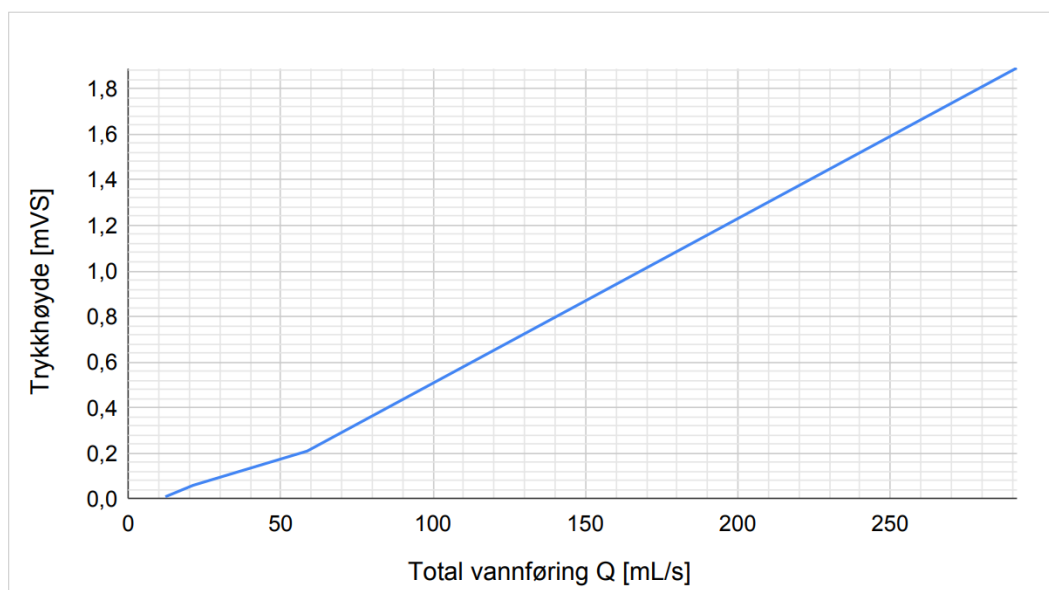
Figur 3.7: Sammenhengen mellom vannføringskoeffisient C_d og trykkehøyden h ved en indre kanylediameter på 0,8 mm.



Figur 3.8: Sammenhengen mellom vannføringskoeffisient C_d og trykkehøyden h ved en indre kanylediameter på 0,5 mm.

Ved en indre diameter på 0,8 mm oppsto det ikke nok tap gjennom kanylen slik at rørene vil ikke rekke å fylle seg opp før det begynner å renne ut. Ved en indre diameter på 0,5 mm var dette derimot mulig, derav ble denne kanylediameteren valgt og utfordringene ved å opprettholde uniformt nedbør ble fjernet. Med kjent vannføringskoeffisient, diameter og vannføring var det også mulig å beregne trykket i systemet med bruk av blendeformelen 3.8. Beregningene viste at med en indre kanylediameter på 0,5 mm ble ikke trykket for høyt i systemet.

Det er tenkt at kanylene skal bli festet kun ved å presses gjennom pilothull i fordelingsrørene og derfor var det usikkert om kanylene kunne bli festet så godt i rørene at de ikke ble presset ut ved de største trykkene. Kraften som oppstår på kanylene ved det høyeste trykket i fordelingsystemet ble beregnet. For å finne det høyeste trykket var det nødvendig å demonstrere sammenhengen mellom vannføringskoeffisient C_d og vannføring tilført i fordelingsystemet.



Figur 3.9: Sammenheng mellom trykk og vannføring ved en indre kanylediameter på 0,5 mm.

Fra figur 3.9 kan man se at ved 200 ml/s, som er den høyeste vannføringen som skal tilføres simulatoren, vil trykket ligge på ca. 1,23 mVS. Da kan kraften på kanylen bli beregnet med formel 3.9 (SNL, 2019).

$$F = pA \quad (3.9)$$

F Kraft [ML/T²]
 p Trykk [M/LT²]
 A Areal [L²]

Ved et trykk på 1,23 mVS og en kanyle med indre diameter på 0,5 mm og en ytre diameter på 0,8 mm, vil kraften på kanylen bli ca. 0,0038 N. Denne kraften er så liten at kanylen burde klare å sitte fast i røret selv ved maksimalt trykk.

Det som ikke ble tatt hensyn til under antagelsen om 800 kanyler, var at ved å plassere ut 20 rør på 1 m bredde, hvor alle kanylene er plassert i senterlinjen av røret, ville en liten andel av nedbørfeltets ytre kanter ikke få tilført nedbør. Det vil si at *nedbørens* størrelse ikke hadde blitt 2 m². Det ble derfor bestemt at det skulle benyttes 21 fordelingsrør, og dermed 840 kanyler. Dette fører til at senterlinjen på de to ytterste rørene hadde akkurat 1 m avstand mellom seg, og nedbørens areal ble 2 m². Denne endringen hadde minimal betydning på analysene som allerede hadde blitt gjort.

3.1.4 Avrenningsmåler

Ved å bruke det samme spekteret av nedbørintensiteter som i delkapittel 3.1.1, samt kjenne til nedbørfeltets areal A var det mulig å regne seg fram til den maksimale avrenningen fra nedbørfeltet ved bruk av formel 3.10 (Chin, 2013). Formelen ga en maksimal avrenning på 100 ml/s. For å kunne kjøre trekantregn, ble som nevnt nedbørintensiteten doblet. Derav ble også beregnet maksimal avrenning doblet til 200 ml/s.

$$Q = i_e A \quad (3.10)$$

hvor:

Q Volumstrømning [L³/T]
 i_e Midlere nedbørintensitet [L/T]
 A Nedbørfeltets areal [L²]

Ved å måle avrenningen fra simulatorens nedbørfelt som vannføring over tid, kan man lage et utløpshydrogram. Det ble siktet mot en oppløsning på minimum 5 ml/s i innstilt pumpevannføring. Det er derfor ønskelig med samme oppløsning på vannføringsmåleren. Flere målemetoder ble vurdert.

Ut i fra konsentrasjonstidsberegningene i delkapittel 3.1.1, viste det seg at ingen av de beregnede konsentrasjonstidene oversteg fire minutter. For å etablere en kapasitetbe-

grensning til avrenningsmåleren, ble det derfor benyttet volumberegninger av et kasse-regn kjørt med maksimal intensitet i fire minutter. Dette resulterte i et volum på 24 L, derav ble dette satt som det maksimale volumet som vil kreves til en simulering.

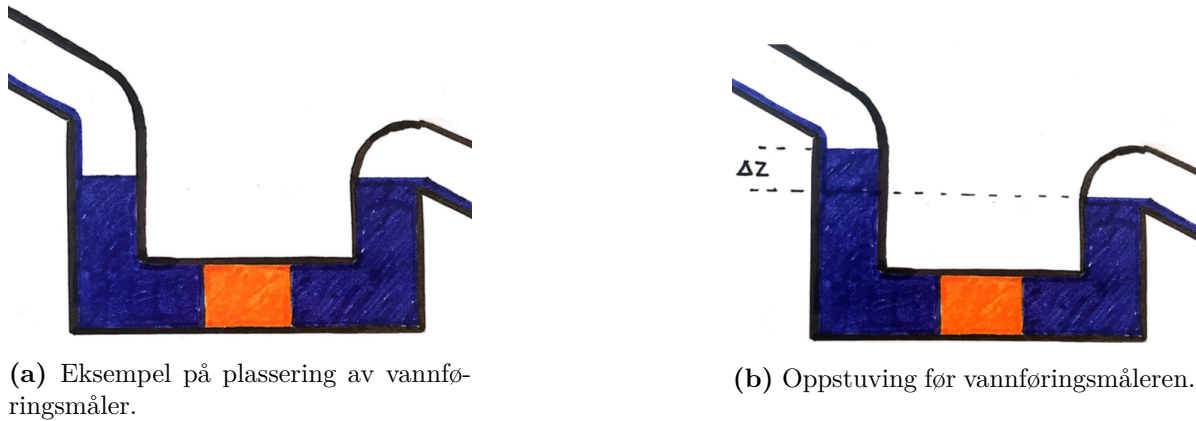
Ultralyd i fylt rør

ITAS er en leverandør av feltbasert målesystemer og produkter innenfor blant annet meteorologi, klima og miljø, samt innsamling og lagring av data fra disse målesystemene (Itas, [udatert](#)). ITAS anbefalte Ultrasonic Flow Meter UF25B som er vist i figur 3.10. Det er en vannføringsmåler basert på ultralyd med transittid. Det er flere fordeler med en slik vannføringsmåler. Måleren er utformet for å minimere tap og kan måle vannføringer fra 3,33 ml/s til 416,67 ml/s med en oppløsning på 0,0167 ml/s. Det betyr at måleren kan måle vannføring innenfor det spektret som det er behov for, og med høy oppløsning.



Figur 3.10: Ultrasonic Flow Meter UF25B.

Ultrasonic Flow Meter UF25B krever at røret går fullt for å kunne måle riktig vannføring (VA Miljø Blad, [2018c](#)). Avrenningen fra simulatoren kan samles opp i et rør og utformes slikt at røret alltid vil gå fullt, som vist i figur 3.11a. Nedsenkningen må være fylt opp med vann før en simulering kjøres, slik at en hver tilførsel av vann vil flytte unna det som er der. Det kan oppstå en oppstuvning av vann selv om måleren er utformet for å minimere tap. Oppstuvningen er illustrert i figur 3.11b og skyldes tap i systemet. En oppstuvning vil skape et forsinket bilde av avrenningen, noe som ikke er ønskelig.



Figur 3.11: Ultrasonic Flow Meter UF25B: Plassering og oppstuvning

V-overløp

Som nevnt i delkapittel 2.4.2 er V-overløp en vanlig målemetode for vannføring i åpne renner. Vannføringen er kjent når høyden før terskelen er kjent (VA Miljø Blad, 2018d). V-overløp er foretrukket framfor rektangulært overløp når lavere vannføringer skal måles og vannføringer skal bli målt med høy nøyaktighet (Chin, 2013). Ved å bruke V-overløp som avrenningsmåler kan det oppstå utfordringer i forbindelse med en uønsket fordrøyningseffekt oppstrøms overløpet.

Hvis V-overløp skal benyttes til å måle vannføring trengs det en nivåmåler, f.eks. ultralyd eller trykksensor, som kontinuerlig kan måle vannstanden før overløpet. Ved å velge en vinkel på 20° i overløpet vil høydeforskjellen mellom minste og største vannføring før overløpet bli så stor som mulig. Hvis vannføringen skal måles med en oppløsning på 5 ml/s vil det kreve måling av en veldig liten høydeforskjell i vannstanden før overløpet. Eksempelvis vil høyden gitt ved maksimal vannføring på 200 ml/s være 5,85 cm og høyden gitt ved en vannføring på 195 ml/s være 5,79 cm. Det vil kreve en utrolig nøyaktig nivåmåler for å registrere forskjellen.

Nivåmåler

For å kontinuerlig måle nivået i en tank kan man f.eks. benytte ultralyd, radar, trykkmåler eller kapasitiv stang, som ble nevnt i kapittel 2.4.3. Det finnes et stort marked av leverandører og alternativer av ulike nivåmålere. Oppsamlingstanken kan optimaliseres ved å utformes slik at tanken er best tilpasset måleren for å oppnå høyest mulig nøyaktighet. De fleste nivåmålere har analog kommunikasjon.

Vippekar

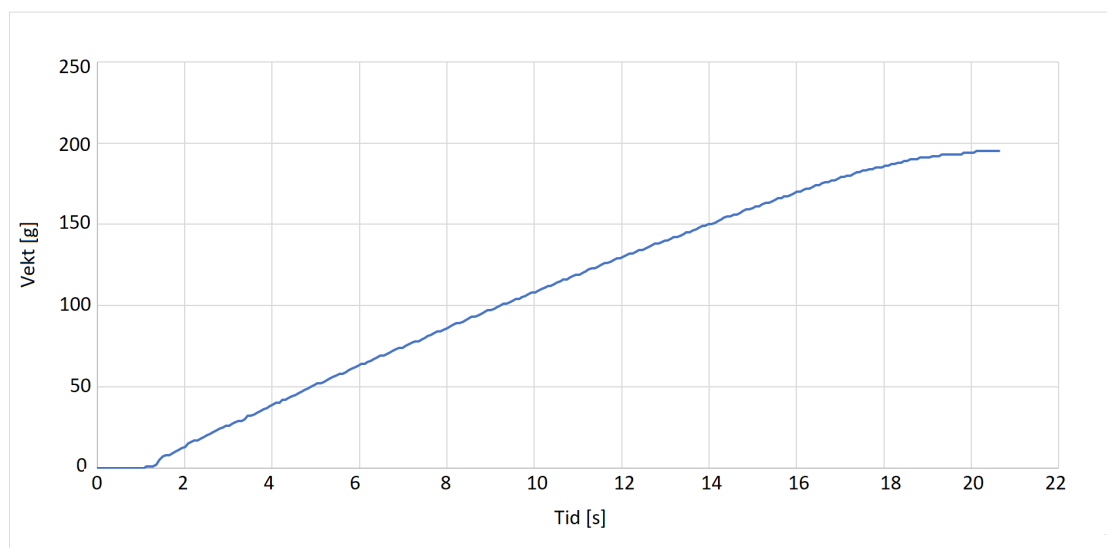
Vippekar er hovedsakelig brukt til å måle nedbørintensitet. Hvis et vippekar skal bli brukt til å måle avrenning må det trolig bli spesiallagd for dette formålet. Det er behov for et vippekar i en størrelse som vil gi god oppløsning ved de lave vannføringene og fortsatt kunne håndtere den største vannføringen. Ved å bruke vippekar trengs det i tillegg utstyr til å registrere og lagre informasjon hver gang karet tipper.

Vekt

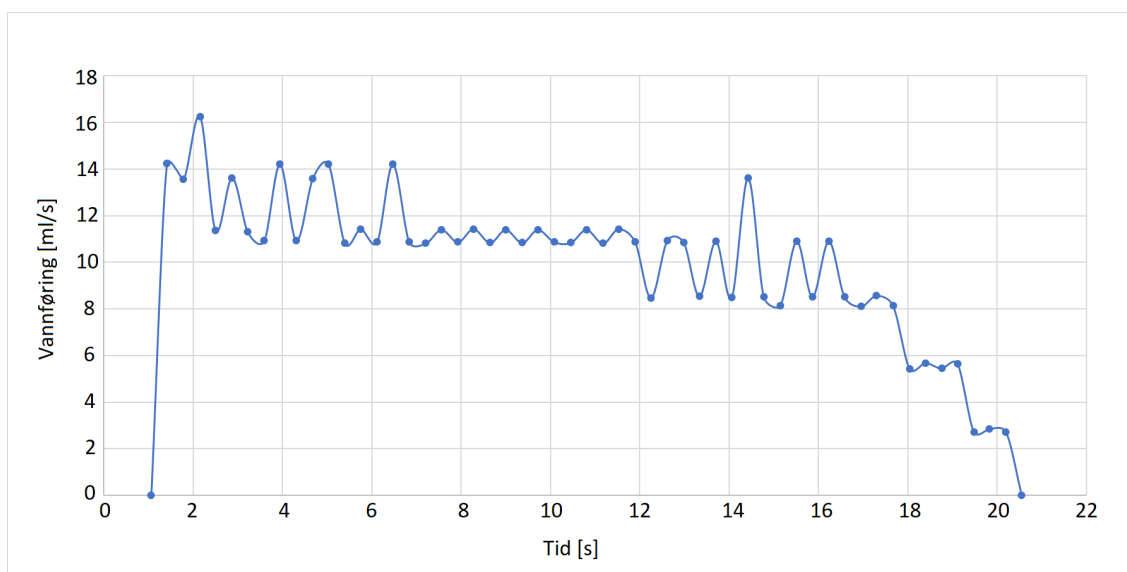
Som nevnt i delkapittel 2.4.3 kan vannføringen ut fra simulatoren beregnes ved å samle opp avrenningen og måle endring i vekt over tid. Ved god nok oppløsning vil man få tilnærmet lik momentanvannføring. Avrenningen inn i oppsamlingskaret kan gi en impulseffekt fordi det oppstår en kraft når vannstrålen treffer kontrollvolumet på vekten. Kraften oppstår fordi vannet som lander i karet må bremses. Det er usikkert hvor store forstyrrelser impulsen vil gi, eller om det er andre faktorer som vil påvirke nøyaktigheten til vekten. En Kern ITB 35K1IP ble lånt og brukt til å teste om det vil fungere å bruke vekt til måling av avrenning. Vekten hadde en maksvekt på 35 kg og en oppløsning på 1 g. Det ble kjørt ett forsøk med lav vannføring og ett forsøk med høy vannføring.

I forsøket med lav vannføring ble vannføringen inn i karet fremstilt ved å bruke en beholder med hull i bunn. Beholderen ble fylt opp med 200 ml for å sikre at vannføringen ut av beholderen ble tilnærmet lik i alle testene. Beholderen ble plassert i kjente høyder over karet, hvor vannet falt ned i et oppsamlingskar som var plassert på vekten. For forenkling ble tettheten ρ til vannet satt til 1000kg/m^3 slik at én liter tilsvarer ett kilogram. Vekten logget flere ganger i sekundet, som vist i figur 3.12. For forenkling av ble det hentet ut verdier fra hver 5. måling ved fremstilling av hydrogrammet som er vist i figur 3.13. Hydrogrammet ble laget ved å dele endring i vekt på endring i tid for hver 5. måling og satt opp som en funksjon av tiden. Vannføringen kan også bestemmes ut i fra stigningstallet til grafen i 3.12, da stigningstallet gir momentan vannføring i det gjeldende tidspunktet.

Når vann faller fritt ut i fra et lite hull i bunnen av en beholder, vil den eneste variabelen som påvirker hastigheten være høyden på vannet i beholderen. Denne høyden vil synke med tiden etterhvert som vannet renner ut av hullet, og vannføringen vil derfor også synke. På grafen i figur 3.13 synker vannføringen med tiden og det stemmer godt overens med teorien.



Figur 3.12: Stigning på vekt i vannet som samles opp i oppsamlingskaret. Generert fra test 3_1 i tabell 3.3.



Figur 3.13: Utløpshydrogram med vekt som avrenningsmåler. Generert fra test 3_1 i tabell 3.3.

Tabell 3.3: Forsøk gjennomført på vekt ved lav vannføring.

Test nr.	Høyde over karbunn [cm]	Vekt i kar ved start [kg]	Endring i vekt [kg]	Areal under graf [kg]	Prosentvis feil [%]
1_1	10	0	0,196	0,1963	0,15
1_2	10	5,16	0,194	0,193	0,52
2_1	32,5	0	0,193	0,1948	0,93
2_2	32,5	5,16	0,196	0,1959	0,05
3_1	48,4	0	0,195	0,2000	2,56
3_2	48,5	5,16	0,195	0,1948	0,10
4_1	76,5	0	0,196	0,1992	1,63
4_2	76,5	5,16	0,197	0,2002	1,62

Arealet under utløpshydrogrammet vil være total oppsamlet vekt, og beregnes med midtpunktmetoden i dataprogrammet MatLab. Ved å sammenligne *areal under graf* med *endring i vekt* fra startpunkt til slutt punkt vil det bekrefte om vannføring kan måles nøyaktig med vekt. Det er liten prosentvis feil for alle testene, som tyder på at dette kan være en god måte å måle vannføringen på. Det er ikke tydelige forskjeller mellom testene som startet med vekt i karet i forhold til testene som startet med tomt kar.

I testene gjort med høy vannføring ble en pumpe benyttet til å levere en vannføring på 211 ml/s. Det er litt over det som er beregnet maksimal avrenning ut av simulatoren. Målingene ble behandlet likt som ved forsøket på lav vannføring, og resultatene framstilles i tabell 3.4.

Tabell 3.4: Forsøk gjennomført på vekt ved høy vannføring.

Test nr.	Høyde over karbunn [cm]	Vekt i kar ved start [kg]	Endring i vekt [kg]	Areal under graf [kg]	Prosentvis feil [%]
1_1	10	0	4,124	3,955	4,10
1_2	10	5	4,027	4,1105	2,07
2_1	100	0	3,993	3,8885	2,62
2_2	100	5	4,242	4,1715	1,66

Hvis man kan tillate å trekke konklusjoner basert på så få tester, ser man at forsøket fra tabell 3.4 gir høyere prosentvis feil enn i tabell 3.3. Det virker dermed som om unøyaktigheten i målingene blir større ved høye vannføringer.

Valg av avrenningsmåler

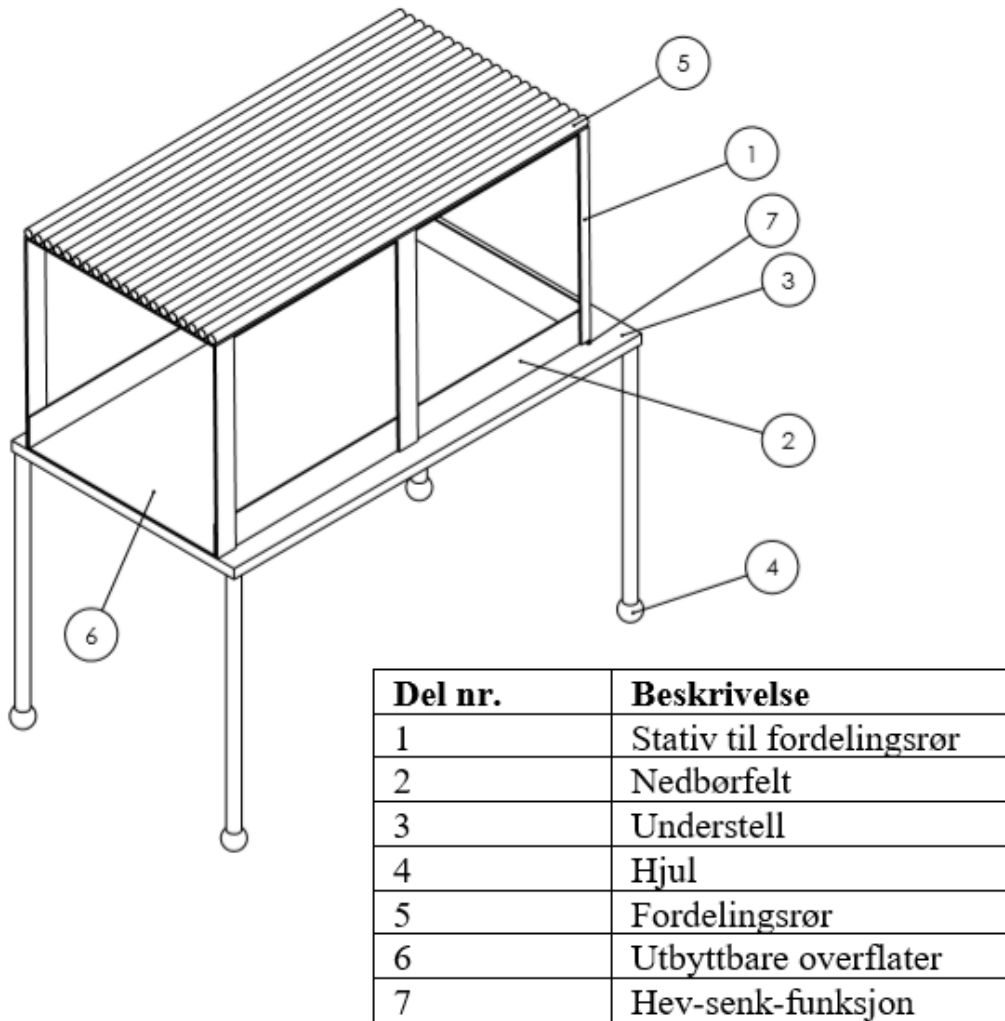
Det hydrauliske området på avrenningen og ønske om stor oppløsning minsket utvalget av vannføringsmålere betraktelig. Faktorer som pris og tilgjengelighet hadde en betydning i valg av måleutstyr. Simulatoren lages for bruk til undervisning, så utstyret bør være brukervennlig.

Ved å bruke Ultrasonic Flow Meter UF25B eller et V-overløp som vannføringsmåler kan det oppstå en fordrøyningseffekt som ikke er ønskelig. Utrekningene på V-overløpet viser at det er ekstremt liten høydeforskjell som må måles hvis man skal ha en oppløsning på 5 ml/s. Ved V-overløp kreves det både et overløp og en nivåmåler som kan måle høyden før overløpet. Det kreves mindre utstyr å velge kun nivåmåler i tank som målemetode, men selv ved optimalisering av oppsamlingstanken var det ikke mulig å finne måleutstyr som hadde god nok oppløsning. De fleste nivåmålere kommuniserer analogt og krever derfor ekstra utstyr som kan omforme det analoge signalet til et digitalt signal. Et digitalt signal kan leses med datamaskin slik at informasjon fra undersøkelsene kan lagres og brukes.

Vippekar ble også vurdert som en måte å måle avrenning på, men sannsynligvis vil det være umulig å bygge et vippekar i en størrelse som vil gi høy nok oppløsning ved de lave vannføringene og fortsatt kunne håndtere den største vannføringen på 200 ml/s. I tillegg krever det ekstra utstyr til registrering og logging når karet vipper.

Ut i fra forsøkene med vekt ble det bekreftet at vektmåling fungerer til å måle avrenning i det bestemte hydrauliske området med høy oppløsning. Vekten kommuniserer digitalt, som gjør den enkel å bruke. Vekten har høy tidsoppløsning, med mulighet til å måle flere ganger i sekundet. Leveringstiden var kort og valget falt derfor på vekt som avrenningsmåler. Vekten som ble brukt til testene er ikke lenger i produksjon, men Kern IFB 30K-3 er en plattformvekt som vil fungere likt som vekten som ble brukt i forsøkene. Vekten har en maksvekt på 30 kg og en oppløsning på 1 g.

3.1.5 Arbeidstegning av nedbør-avløpssimulator



Figur 3.14: Planleggingskisse av nedbør-avløpssimulator.

Det er viktig å presisere at arbeidstegningen vist i figur 3.14 ble laget tidlig i prosessen, og var ment for å gi verkstedet et overordnet blikk om hva som var ønskelig for nedbør-avløpssimulatoren. Det ble gjort noen akseptable endringer under konstruksjonen av simulatoren.

3.2 Kvalitetstesting av simulatoren

Kapittelet omtaler forsøkene som ble gjennomført på simulatoren. Forsøkene ble gjennomført for å undersøke om det har blitt gjort gode og realistiske valg ved utforming av nedbør-avløpssimulatorene.

3.2.1 Sammenheng mellom pumpehastighet og nedbørintensitet

Det var ikke en selvfølge at levert vannføring økte proporsjonalt med pumpehastigheten. Det ble derfor nødvendig å måle vannføringen ut fra pumpe ved ulike pumpehastigheter. Ved bruk av vekt og en oppsamlingstank er det mulig å finne gjennomsnittsvannføringen ved å veie akkumulert vannmengde etter 30 sekunder. Ved å sette tettheten ρ til 1000 kg/m³, ble antall kilogram lik antall liter. Oppsamlet vannmengde i liter ble dermed delt på varigheten, og resultatet viste gjennomsnittsvannføringen for den gitte pumpehastigheten. Pumpehastighetene som ble benyttet i forsøkene rangerte fra 15 RPM til 265 RPM med en trinnvis økning på 15 RPM. Siden 265 RPM var den maksimale pumpehastigheten tilsvarte det også den maksimale vannføringen. For hver pumpehastighet ble det gjennomført tre målinger som alle hadde samme varighet.

Det ble videre undersøkt om pumpe tilførte lik vannføring gjennom fordelingsystemet og ut til nedbørfeltet som den gjorde direkte ut fra pumpe. Det antas at tap gjennom rør og kanyler vil gi en hydraulisk motstand i fordelingsystemet som gjør at vannføringen gjennom fordelingsystemet kan avvike fra vannføringen direkte fra pumpe. Ved et slikt avvik er det nødvendig å illustrere sammenhengen mellom den teoretiske vannføringen og den faktiske vannføringen som tilføres feltet for å unngå feil i videre beregninger.

3.2.2 Databehandling av avrenningsmåler

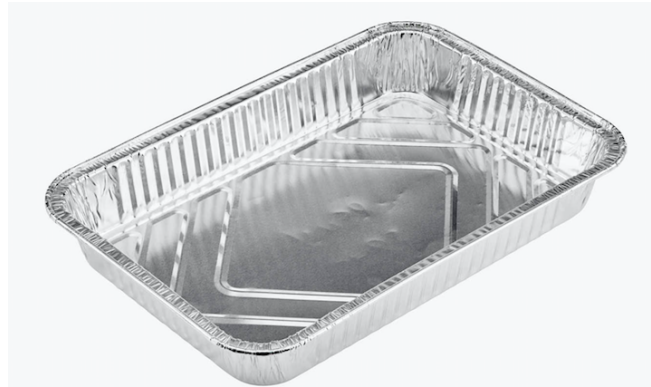
Ut i fra forsøkene gjort med vekt vet man at det produserte utløpshydrogrammet vil vise store svingninger i avrenningen. Det er ønskelig å finne ut av hvorfor disse svingningene oppstår og hvordan de kan behandles slik at man kan generere «glatte» utløpshydrogram. Ved å røre i en konstant mengde vann på vekten, vil man kunne se om svingningene på utløpshydrogrammet er forårsaket av bevegelser i vannet i oppsamlingskaret. I et slikt tilfelle vil det være relevant å vite om målingene blir mer eller mindre nøyaktig ved ulike vannføringer.

Man kan sammenligne gjennomsnittet av svingningene på utløpshydrogrammet med nedbørintensiteten når likevektsvannføring er oppnådd. Det er relevant å vite om gjennomsnittet av svingningene i utløpshydrogrammet ligger konstant over, under eller likt

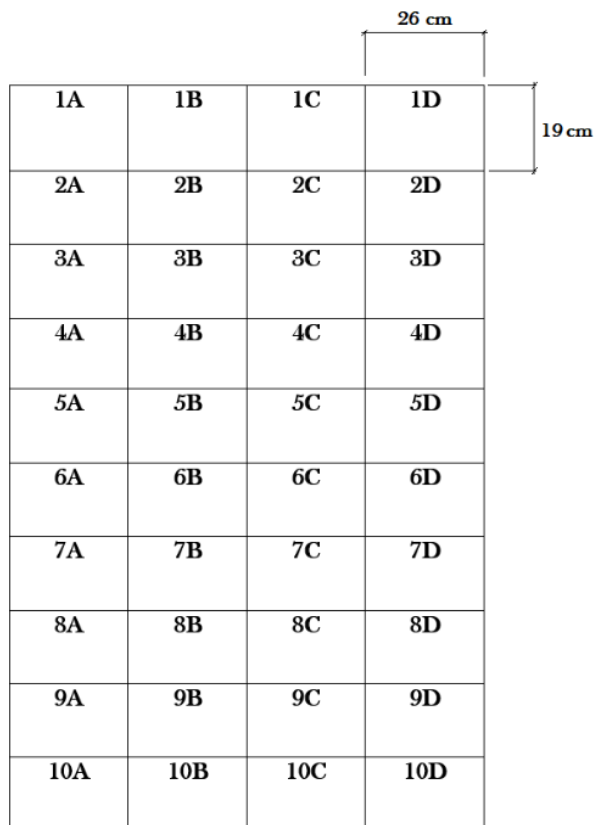
som faktisk vannføring. Hvis gjennomsnittet ligger konstant over kan det tyde på at målingene er påvirket av impuls kraften som oppstår når avrenningen treffer oppsamlingskaret og blir bremsset.

3.2.3 Uniformitetstest

For å undersøke om nedbøren falt uniformt over nedbørfeltet ble det plassert ut aluminiumsformer, og kjørt simuleringer av kasseregn med ulike intensiteter. For å undersøke uniformiteten i hele det hydrauliske spekteret ble det simulert fem nedbørintensiteter. Intensitetene tilsvarer følgende 6, 29, 53, 77 og 100 % i pumpehastighet. To forsøk ble gjennomført for hver intensitet og varigheten på alle intensitetene ble satt til to minutter. Aluminiumsformene, vist i figur 3.15, hadde en størrelse på 19x26 cm, og det ble plassert ut 40 former. Figur 3.16 gir en indikasjon på plasseringen og størrelsen på formene. Det presiseres at figuren ikke viser mellomrom mellom formene, men at formene ble plassert uniformt i nedbørfeltet. I teorien skulle plasseringen av formene føre til at hver form kunne dekke 6x4 kanyler, dvs. 6 kanyler i bredden og 4 kanyler i lengden. Samlet sett tilsvarte formene et totalt areal på 19 760 cm² og nedbørfeltets størrelse er på 20 000 cm². Aluminiumsformenes areal dekker derfor 98,8 % av nedbørfeltet.



Figur 3.15: Aluminiumsform brukt i uniformitetstest.



1A	1B	1C	1D
2A	2B	2C	2D
3A	3B	3C	3D
4A	4B	4C	4D
5A	5B	5C	5D
6A	6B	6C	6D
7A	7B	7C	7D
8A	8B	8C	8D
9A	9B	9C	9D
10A	10B	10C	10D

Figur 3.16: Plassering av aluminiumsformer i nedbørfeltet for uniformitetstest.

Som vist i figur 3.16 ble hver aluminiumsform markert med et tall og en bokstav. Vekten av våt aluminiumsform ble målt før forsøkene startet. Etter en simulert nedbørhendelse ble vekten av aluminiumsformene med oppsamlet nedbør målt. Videre ble det undersøkt om det samlet seg lik mengde nedbør i alle formene ved samme intensitet. Standardavviket og uniformitetskoeffisienten ble deretter beregnet for ytterligere undersøkelser av regnets uniformitet.

3.2.4 Konsentrasjonstid- og ruhetsanalyser

Som beskrevet i delkapittel 2.2.4 vil konsentrasjonstiden for nedbørfeltet være oppnådd når likevektsvannføringen trer inn. For å finne konsentrasjonstiden for simulatorens nedbørfeltet, er det derfor nødvendig å kjøre simuleringer lenge nok slik at likevektsvannføring oppstår.

Det var ønskelig å finne ruheten n til gress- og grusoverflaten. Simuleringer ved ulike intensiteter ble kjørt. Helningen S_0 på nedbørfeltet ble satt til 50 %. Pumpehastighetene som ble simulert var 4, 24, 49, 75 og 98 %. Grunnen til at disse hastighetene ble benyttet, var fordi de skulle i teorien tilsvare hhv. 10, 50, 100, 150 og 200 ml/s. Det ble kjørt to simuleringer per intensitet. Utløpshydrogrammene ble produsert på samme måte

som beskrevet under *Vekt* i delkapittel 3.1.4, hvor man beregner vannføringen gjennom endring i vekt delt på endring i tid og setter det som en funksjon av tiden.

Ved å illustrere nedbørintensitetene som innløpshyetogram og de målte avrenningsvannføringene som utløpshydrogram, blir konsentrasjonstiden observert der utløpshydrogrammet stabiliserer seg og oppnår likevektsvannføring. Dermed blir konsentrasjonstiden en kjent parameter og ut ifra den kinematiske bølgeformelen 3.1, er det mulig å beregne overflatenes ruhet n med formel 3.11.

$$n = \left(\frac{t_c i_e^{\frac{2}{5}}}{6,99} \right)^{\frac{5}{3}} \frac{\sqrt{S_0}}{L} \quad (3.11)$$

Antagelsen om at ruheten for en viss type overflate er konstant uansett nedbørintensitet eller overflatehelning er kun en tilnærming. Det ble derfor gjort videre undersøkelser på hvordan nedbørfeltets helning påvirker ruheten. Nedbørfeltet med grus ble satt ned til en helning på 20 ‰, og de samme forsøkene som ved helning 50 ‰ ble gjennomført.

3.2.5 Modellregn og oppsett i LabView

LabView står for *Laboratory Virtual Instrument Engineering* og er et dataprogram hovedsakelig brukt av ingeniører for applikasjoner som behøver testing, måling og kontroll og hvor man får hurtig tilgang til maskinvare og datainnsikt (National Instruments, *udatert*). LabView er et grafisk programmeringsspråk som gjør det lett å visualisere hvert aspekt knyttet til programmet (Moriarty mfl., 2003).

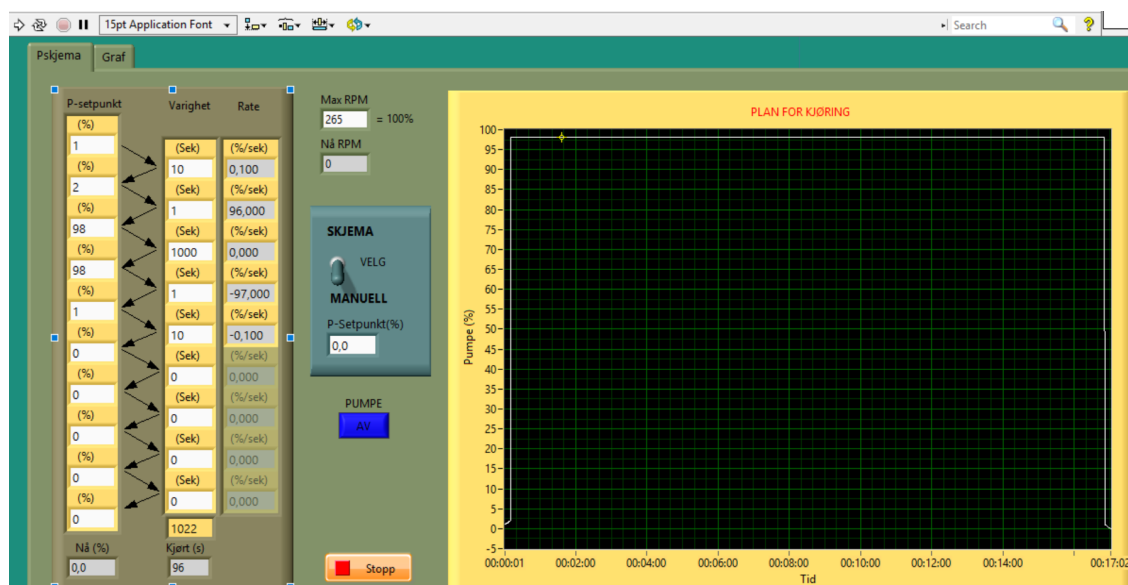
Simulatoren skal simulere kasseregner, trekantregner og symmetriske blokkhyetogram og demonstrere forskjellen i avrenningsforløpet ved simuleringer av de ulike modellregnerne. Simulatoren kan også representere hvordan fordrøyningsmagasiner kan holde tilbake avrenning. Dette ble illustrert ved å plassere ut 10 aluminiumsformer tilfeldig i nedbørfeltet og kjøre en konstant intensitet over en gitt tid. Ved å kjøre den samme nedbørhendelsen uten aluminiumsformer kan de to produserte utløpshydrogrammene sammenlignes og representere effekten av fordrøyningsmagasiner i et nedbørfelt.

Dataprogrammet LabView ble benyttet for kontinuerlig måling av vekt og for å styre pumpa, slik at det var mulig å få levert den ønskelige intensiteten. Bakgrunnsinformasjon om dataprogrammet er nøyere beskrevet i 3.2.5. Figurene som vises i figur 3.17, 3.18 og 3.19 viser oppsettet i LabView for hhv. et kasseregner, et trekantregner og et symmetrisk blokkhyetogram. Boksen som vises til venstre i figurene kalles et pumpe-skjema, eller «p-skjema». Verdien som blir innsatt i p-skjemaet bestemmer hvilken prosent pumpa skal kjøres på og hvor lenge den skal kjøre. Eksempelvis sier den første delen av p-skjemaet i figur 3.17 at pumpa skal gå fra 1 ‰ til 2 ‰ på 10 sekunder. Oppsettet i

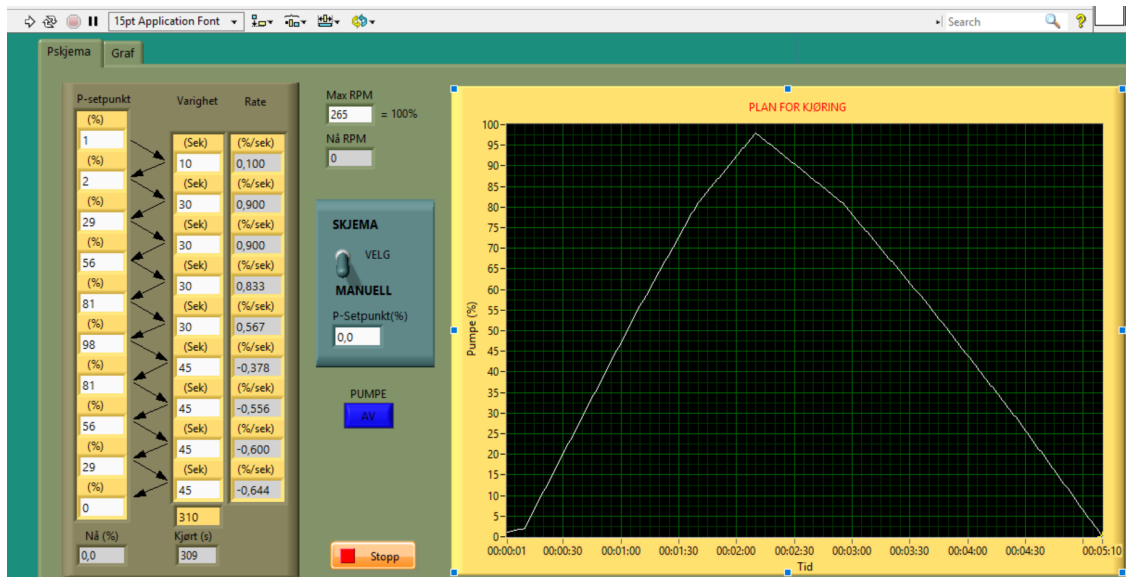
skjemaet vises i grafen kalt «Plan for kjøring». For å kjøre pumpen på en konstant intensitet brukes funksjonen «Manuell». Da vil start og stopp bestemmes ut i fra når en trykker på «AV» knappen, og intensiteten bestemmes ut i fra hvilken verdi som blir innsatt under «P-Setpunkt(%)». Når programmet kjøres, vil både nedbørhendelsen og avrenningen logges.

Responstiden til pumpa er treg ved oppstart gjennom LabView. Denne tregheten ligger i elektronikken og er kun gjeldende ved oppstart. Det er ingen treghet ved overganger mellom pumpehastigheter. Tregheten ble korrigerert ved å starte simuleringene med å la pumpa gå fra 1 % til 2 % på 10 sekunder. Dette var så små pumpehastigheter at det hadde ingen betydning for simuleringen. Simuleringen anses å begynne etter korrigeringen. Et unntak fra korreksjonen var simuleringen av det symmetriske blokkhyetogrammet. Det var kun ti punkter tilgjengelig for innsetting av pumpehastigheten og varighet, og det ble derfor nødvendig å bruke alle ti punktene for å kunne simulere hyetogrammet.

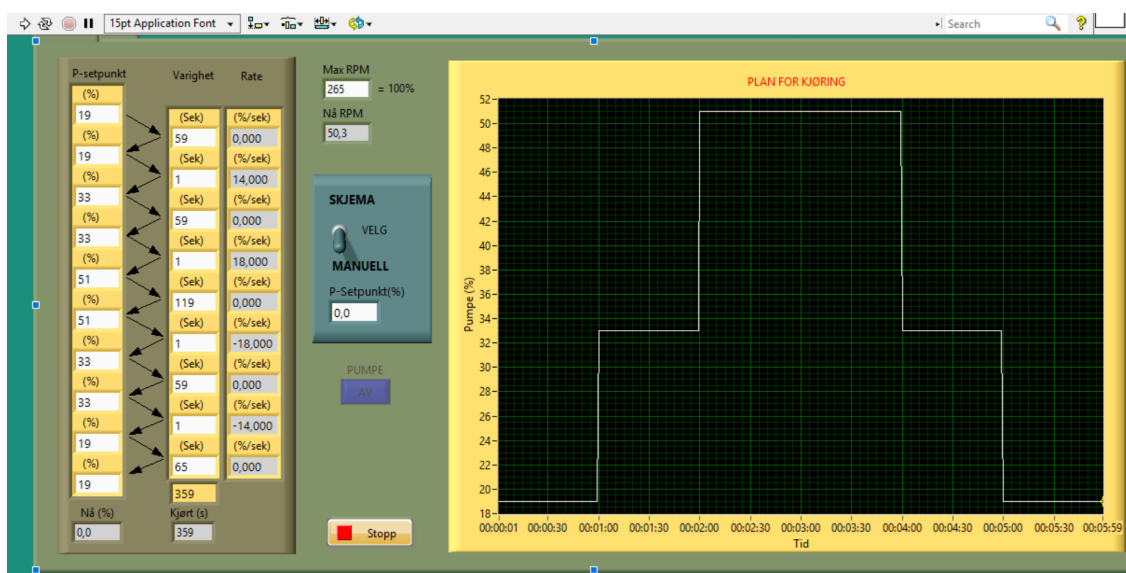
Trekantregnet i figur 3.18 viser en ikke-lineær økning og nedgang. Dette skyldes at nedbørintensiteten ikke er proporsjonal med pumpehastigheten som er videre forklart i delkapittel 5.2. Den faktiske leverte intensiteten ut av fordelingssystemet vil være lineær.



Figur 3.17: Oppsett for et kasseregnet i LabView.



Figur 3.18: Oppsett for et trekantregn i LabView.



Figur 3.19: Oppsett for et symmetrisk blokkhyetogram i LabView.

3.2.6 Modellregn og avrenning i SWMM

SWMM står for *Storm Water Management Model* og er en programvare som ble utviklet i 1971 av United States Environmental Protection Agency (US EPA), og har siden undergått mange oppgraderinger (EPA, 2016). Programmet ble utviklet for å fungere som et støtteapparat som kan predikere mengde og kvalitet på avrenning under både store og små flomhendelser (EPA, 2016). Spesielt i urbane områder, hvor avrenningen ofte kan være uforutsigbar, er dette svært viktig. SWMM er et nyttig verktøy ved analysering, planlegging og design av fremtidige flomhendelser i både urbane og landlige nedbørfelt (Akan og Houghtalen, 2003).

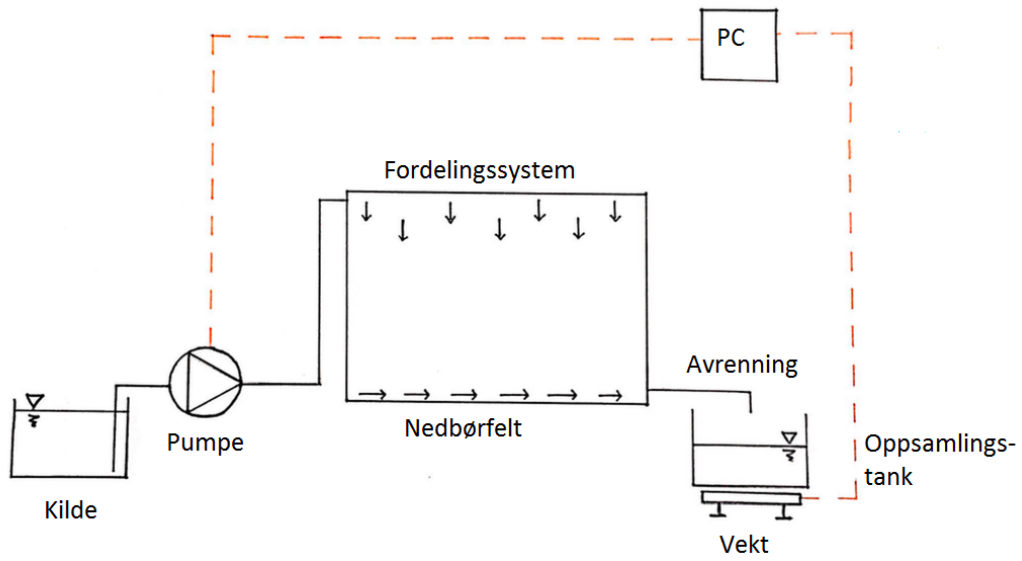
Ved å simulere samme nedbørhendelser og nedbørfeltparametere i både simulatoren og SWMM, kan man sammenligne avrenningsforløpene. Det er interessant å se om avrenningen blir tilnærmet like. Parameterne som må stilles inn i SWMM er feltarealet, strømningsbredden, felthelning, andel tette flater, Mannings ruhetskoeffisient n , andel gropmaganisering og infiltrasjonsparametere. Feltarealet, strømningsbredden og felthelning var kjente verdier fra nedbør-avløpssimulatorene. Siden simulatoren ikke demonstrerer infiltrasjon, vil alle overflatene være tette. Andel tette flater ble derfor satt til 100 %, og infiltrasjonsparametere vil ikke inkluderes i avrenningsberegningene. Før hver simulering vil nedbørfeltet bli fuktet slik at gropmagasinering vil bli lik null. Ruheten ble beregnet gjennom testene i delkapittel [3.2.4](#).

4. Resultater

I dette kapitlet vil resultatene fra analysene på nedbør-avløpssimulatoren funksjonalitet presenteres. Mens metodekapitlet presenterer resultater fra forsøk som ble gjennomført for å utforme simulatoren, fremstiller dette kapitlet den ferdigstilte utformingen og resultater fra forsøk som ble gjennomført på selve simulatoren. Dvs. at kapitlet vil vektlegge resultater fra forsøk på pumpens funksjonalitet, nedbørdannelse, avrenningsforløp ved ulike nedbør- og feltkarakteristikk og bruk av vekt som avrenningsmåler. Avslutningsvis er det også blitt modellert like nedbørhendelser i SWMM for å kunne sammenligne nedbør-avløpssimulatoren med et anerkjent modelleringsprogram for overflateavrenning.

4.1 Ferdigstilt nedbør-avløpssimulator

Delkapitlet presenterer nedbør-avløpssimulatoren endelige utforming. Figur 4.1 viser flytskjema til den ferdigstilte nedbør-avløpssimulatoren. Flytskjemaet illustrerer at en pumpe vil tilføre vann til fordelingssystemet som videre distribuerer nedbør over nedbørfeltet. Nedbøren renner av på utvalgte overflater i nedbørfeltet og ender i en oppsamlingstank. Oppsamlingstanken er plassert på en vekt som måler avrenning. Både pumpa og vekten er koblet til en datamaskin som styrer vanntilførsel og logger avrenningsmålinger. Som nevnt i kapittel 3.1.3 er det bestemt at nedbørfeltets størrelse er 2 m². Nedbørfeltets størrelse defineres av grensene til kanylene. Størrelsen på trauret er 1,05 * 2,15 m med et «nebb» ved utløpet som har helning 15 ° og en åpning på 60 cm. Et bilde av nedbør-avløpssimulatoren er framstilt i figur 4.2. Ytterligere bilder framstilt i vedlegg C.



Figur 4.1: Flytskjema for ferdigstilt nedbør-avløpssimulator.



Figur 4.2: Ferdigstilt nedbør-avløpssimulator.

4.1.1 LabView-verdier

Figur 4.3 viser et direkte utdrag av loggede verdier fra en simulering gjennom LabView. Én linje på figur 4.3 vil tilsi *dato*, *klokkeslett*, *vekt* i kilogram og *pumpehastighet* i prosent. Vekten gir én måling i sekundet. Målingene blir videre benyttet til å generere utløpshydrogram ved ulike nedbørhendelser, overflater og felthelninger.

```
04.05.20 10:32:49;1,009;98,0
04.05.20 10:32:50;1,189;98,0
04.05.20 10:32:51;1,365;98,0
04.05.20 10:32:52;1,548;98,0
04.05.20 10:32:53;1,723;98,0
04.05.20 10:32:54;1,903;98,0
04.05.20 10:32:55;2,083;98,0
04.05.20 10:32:56;2,264;98,0
04.05.20 10:32:57;2,437;98,0
04.05.20 10:32:58;2,619;98,0
04.05.20 10:32:59;2,801;98,0
04.05.20 10:33:00;2,980;98,0
04.05.20 10:33:01;3,162;98,0
04.05.20 10:33:02;3,334;98,0
04.05.20 10:33:03;3,521;98,0
04.05.20 10:33:04;3,704;98,0
04.05.20 10:33:05;3,887;98,0
04.05.20 10:33:06;4,048;98,0
04.05.20 10:33:07;4,242;98,0
04.05.20 10:33:08;4,423;98,0
04.05.20 10:33:09;4,603;98,0
04.05.20 10:33:10;4,783;98,0
```

Figur 4.3: Eksempel på loggede verdier fra LabView.

4.2 Sammenheng mellom pumpehastighet og nedbørintensitet

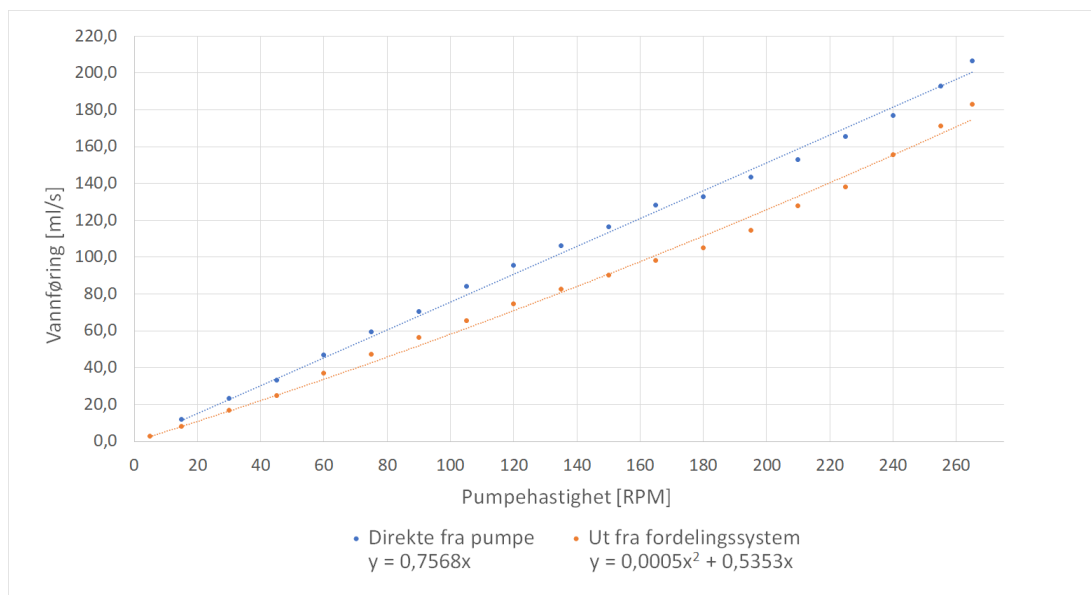
Figur 4.4 viser resultatene fra forsøkene som ble gjennomført på pumpehastighet og tilhørende vannføring. Disse forsøkene er beskrevet i delkapittel 3.2.1 og ble gjort fordi det ikke var en selvfølge at nedbørintensiteten økte proporsjonalt med pumpehastigheten. Legg merke til at vannføringen direkte fra pumpa er illustrert som en lineær regresjonslinje og vannføringen ut fra fordelingssystemet er illustrert som en andregradspolynomisk regresjonslinje. Disse regresjonslinjene var opprinnelig de som ble antatt å passe best med målingene av vannføring.

Siden grafene avviker fra hverandre, tyder det på at det oppstår et tap i simulatoren. Ved videre analyser var det grafen vist i figur 4.4 som ble benyttet for å lese av hvilken nedbørintensitet som faktisk opptrer ved ulike pumpehastigheter. Formlene som tilhører

regresjonslinjene er representert nederst i figuren. Målingene som ble gjort for å illustrere grafene er representert i tabell 4.1.

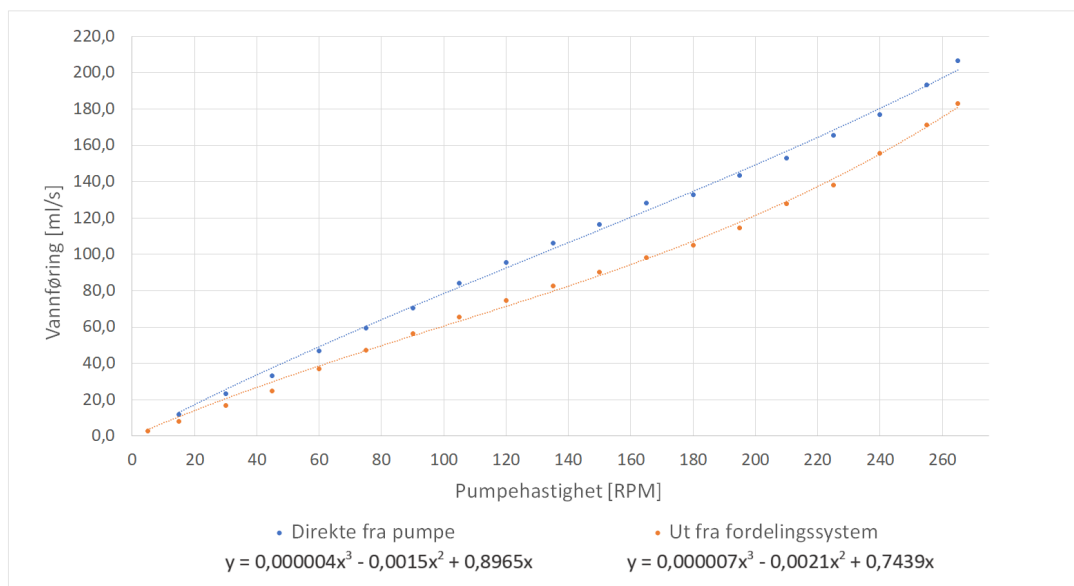
Tabell 4.1: Pumpehastighet og tilhørende vannføring.

Pumpehastighet [RPM]	Pumpehastighet [%]	Vannføring Q direkte fra pumpe [ml/s]	Vannføring Q ut fra fordelingssystem [ml/s]
15	5,66	11,9	8,3
30	11,32	23,3	17,0
45	16,98	33,2	24,9
60	22,64	46,9	37,1
75	28,30	59,6	47,4
90	33,96	70,7	56,5
105	39,62	84,1	65,7
120	45,28	95,5	74,7
135	50,94	106,3	82,8
150	56,60	116,5	90,4
165	62,26	128,4	98,1
180	67,92	132,9	105,2
195	73,58	143,4	114,8
210	79,25	153,0	127,9
225	84,91	165,5	138,1
240	90,57	177,1	155,7
255	96,23	193,1	171,4
265	100	206,7	183,1



Figur 4.4: Sammenheng mellom pumpehastighet og vannføring.

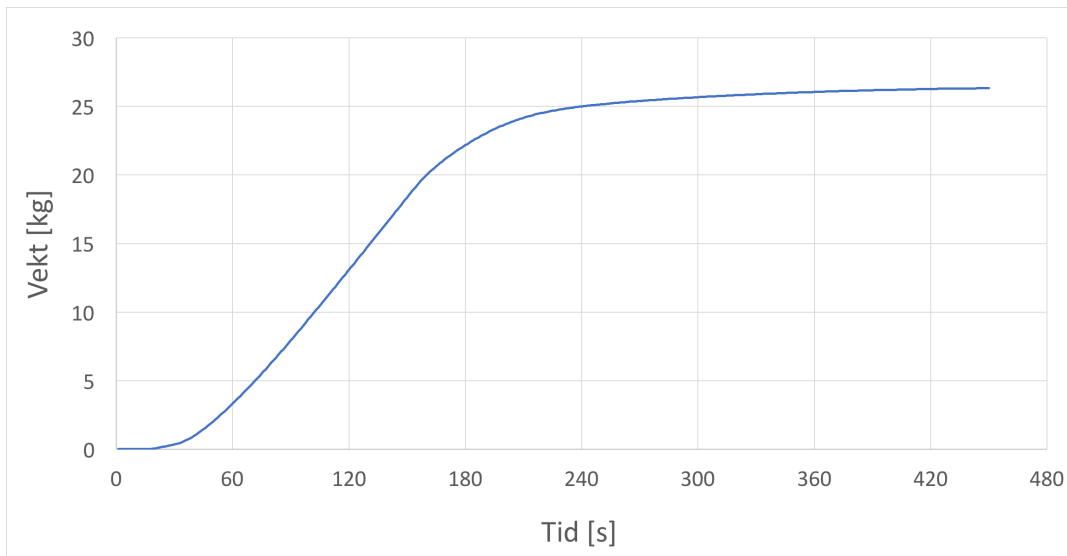
Ved nærmere ettertanke virker det imidlertid som om begge grafene skulle vært tredjegradspolynomer ettersom målepunktene ser ut til å ligge langs en kurve som er konveks og konkav langs ulike deler av grafen. Dette kan vises i figur 4.5 og illustreres kun fordi det kan være nyttig ved videre utvikling av nedbør-avløpssimulatoren.



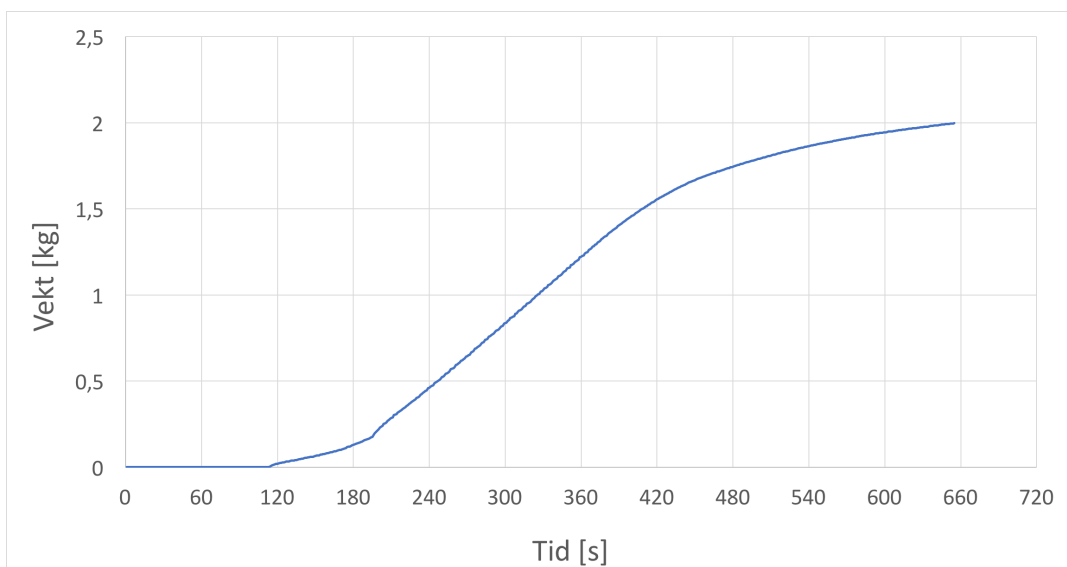
Figur 4.5: Sammenheng mellom pumpehastighet og vannføring med bruk av tredjegradspolynom.

4.3 Databehandling av avrenningsmålinger

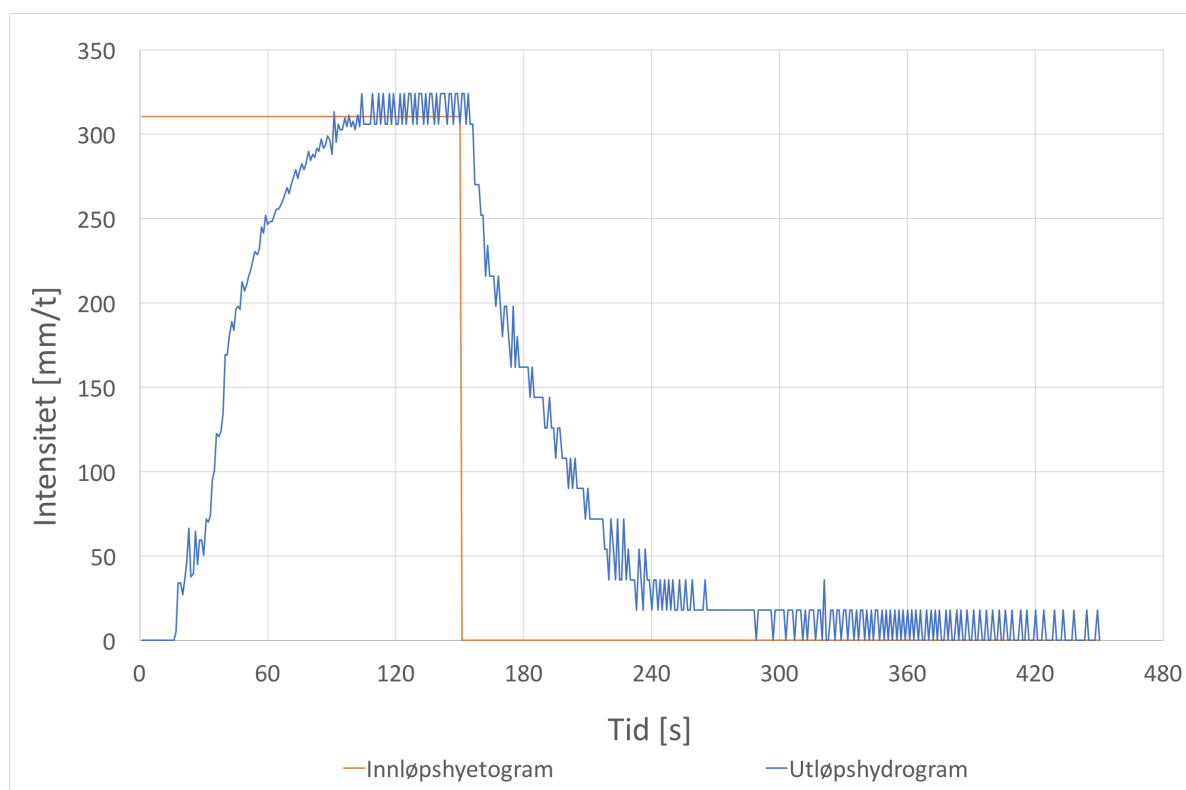
Figur 4.6 og 4.7 viser hvordan vekten av avrenningen ble målt over tid ved to ulike nedbørintensiteter på samme nedbørfelt. Figurene 4.8 og 4.9 viser innløpshyetogrammet og utløpshydrogrammet til det samme nedbørfeltet, der utløpshydrogrammet er produsert fra vektmålingene ved å beregne endring i vekt delt på endring i tid, satt opp som en funksjon av tiden. Det er forklart nærmere i delkapittel 3.1.4. Det er verdt å merke seg at disse figurene er utdrag fra de mange forsøkene som ble gjennomført.



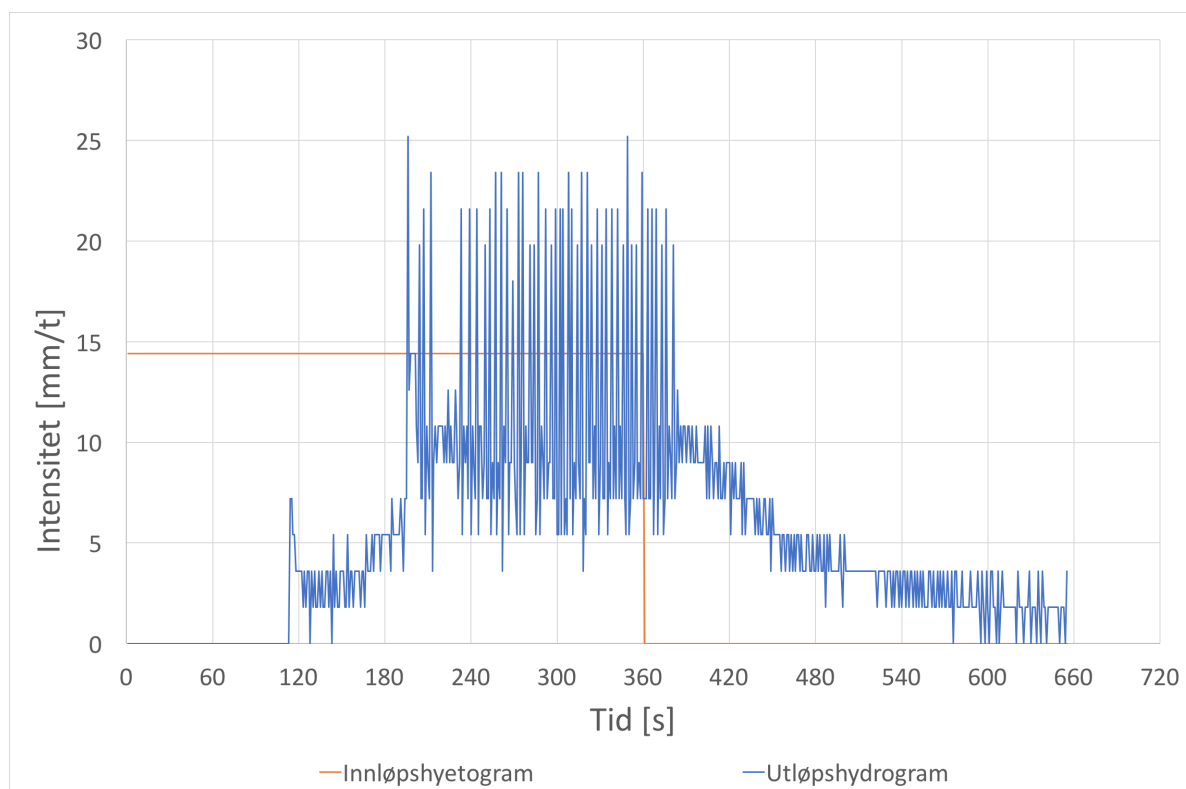
Figur 4.6: Vektmåling i oppsamlingskar fra simulert kasseregn på gress med hellning 50 ‰ og en nedbørintensitet på 310,5 mm/t. Grafen ble videre omgjort til utløpshydrogram vist i figur 4.8.



Figur 4.7: Vektmåling i oppsamlingskar fra simulert kasseregn på gress med hellning 50 ‰ og en nedbørintensitet på 14,4 mm/t. Grafen ble videre omgjort til utløpshydrogram vist i figur 4.9.



Figur 4.8: Simulert kasseregner på gress med helning 50 ‰ og en nedbørintensitet på 310,5 mm/t. Omgjort fra grafen som vises i figur 4.6.



Figur 4.9: Simulert kasseregner på gress med helning 50 ‰ med en nedbørintensitet på 14,4 mm/t. Omgjort fra grafen som vises i figur 4.7.

Det ble gjennomført to tester på hver nedbørintensitet for de ulike overflatene. Som antatt ble det store svingninger i avrenningsmålingene og det er ønskelig å undersøke om man kan behandle resultatene slik at et glatt utløpshydrogram kan fremstilles. Svingningene er spesielt synlig i figur 4.9. Det er interessant å undersøke om gjennomsnittet av svingningene er lik den faktiske nedbørintensiteten. Differansen er representert som prosentvis feil, og vises i tabellene 4.2 til 4.5. Den prosentvise feilen kan gi en indikasjon på hvordan vekten fungerer som avrenningsmåler ved ulike nedbørintensiteter. Her er det verdt å merke seg at den prosentvise feilen er større ved de lave nedbørintensitetene.

Tabell 4.2: Differansen mellom nedbørintensitet og gjennomsnittet av svingningene i avrenningen på gress med 50 % helning.

Gress med 50% helning				
Nedbør- intensitet [mm/t]	Gj.snitt av svingninger fra test 1 [mm/t]	Gj.snitt av svingninger fra test 2 [mm/t]	Gj.snitt av test 1 og 2 [mm/t]	Prosentvis feil [%]
310,5	315,4	313,3	314,4	1,25
223,2	216,2	217,2	216,7	2,90
139,5	148,0	147,9	147,9	6,04
68,4	74,5	74,2	74,4	8,72
14,4	12,8	11,4	12,1	16,1

Tabell 4.3: Differansen mellom nedbørintensitet og gjennomsnittet av svingningene i avrenningen på stål med 50 % helning.

Stål med 50% helning				
Nedbør- intensitet [mm/t]	Gj.snitt av svingninger fra test 1 [mm/t]	Gj.snitt av svingninger fra test 2 [mm/t]	Gj.snitt av test 1 og 2 [mm/t]	Prosentvis feil [%]
310,5	310,5	325,1	317,8	2,35
223,2	223,2	217,5	220,3	1,28
139,5	139,5	148,3	143,9	3,14
68,4	68,4	73,0	70,7	3,39
14,4	14,4	11,8	13,1	9,15

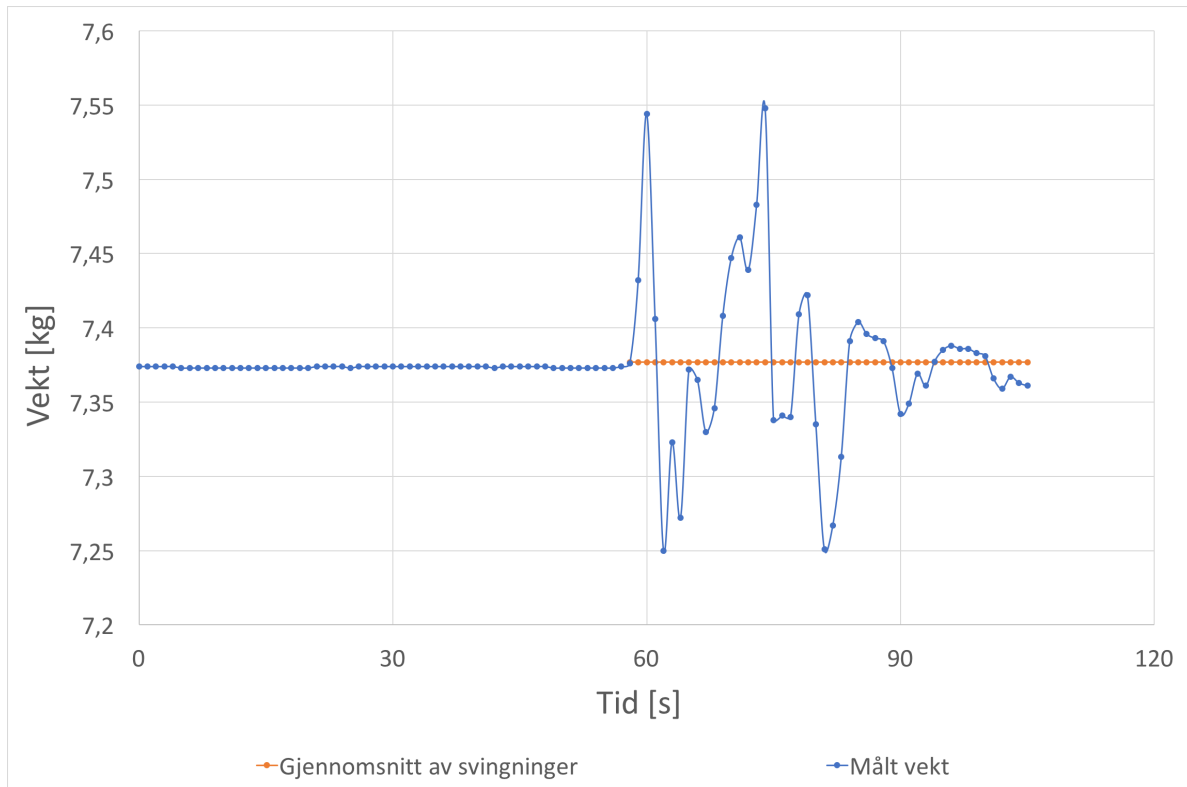
Tabell 4.4: Differansen mellom nedbørintensitet og gjennomsnittet av svingningene i avrenningen på grus med 50 ‰ helning.

Grus med 50‰ helning				
Nedbør- intensitet [mm/t]	Gj.snitt av svingninger fra test 1 [mm/t]	Gj.snitt av svingninger fra test 2 [mm/t]	Gj.snitt av test 1 og 2 [mm/t]	Prosentvis feil [%]
310,5	310,5	309,5	310,0	0,16
223,2	223,2	203,6	213,4	4,38
139,5	139,5	140,9	140,2	0,49
68,4	68,4	70,0	69,2	1,20
14,4	14,4	10,3	12,3	14,4

Tabell 4.5: Differansen mellom nedbørintensitet og gjennomsnittet av svingningene i avrenningen på grus med 20 ‰ helning.

Grus med 20‰ helning				
Nedbør- intensitet [mm/t]	Gj.snitt av svingninger fra test 1 [mm/t]	Gj.snitt av svingninger fra test 2 [mm/t]	Gj.snitt av test 1 og 2 [mm/t]	Prosentvis feil [%]
310,5	310,5	309,4	310,0	0,17
223,2	223,2	196,7	210,0	5,93
139,5	139,5	140,3	139,9	0,30
68,4	68,4	67,5	67,9	0,68
14,4	14,4	11,4	12,9	10,3

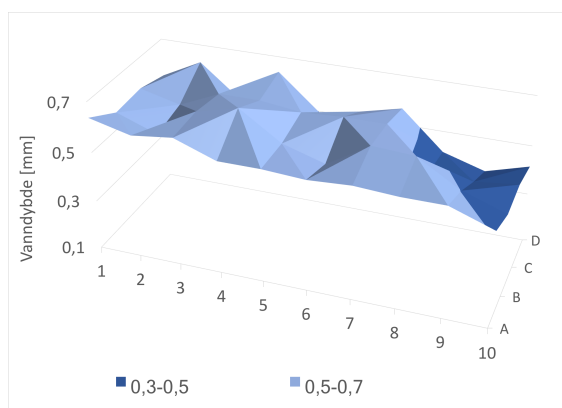
Det er interessant å vite hvorfor svingningene oppstår. Figur 4.10 viser derfor hvor mye svingninger det kan oppstå ved å røre i oppsamlingskaret. Sammenlignet med bevegelsene som oppstår under en avrenningshendelse vil den manuelle røringen være en del kraftigere. Figur 4.10 er derfor kun en representasjon av hvordan bevegelser i oppsamlingskaret påvirker målingene, og vil ikke gi nøyaktig fremstilling av hvordan svingningene i de faktiske avrenningsmålingene vil opptre. Gjennomsnittet av svingningene i figur 4.10 er tatt fra da svingningene begynte, 58 sekunder inn i målingen, til målingens slutt.



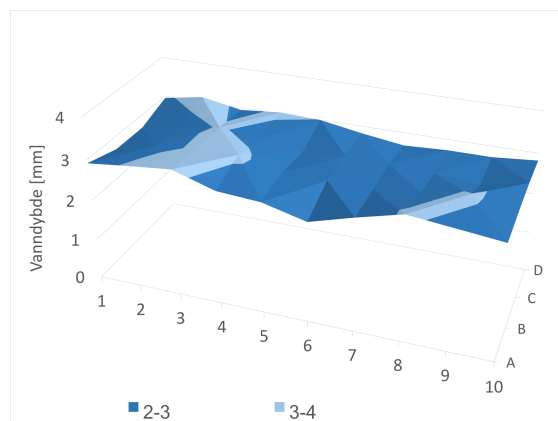
Figur 4.10: Hvordan bevegelser i oppsamlingskaret påvirker vektmålingen.

4.4 Nedbørens uniformitet

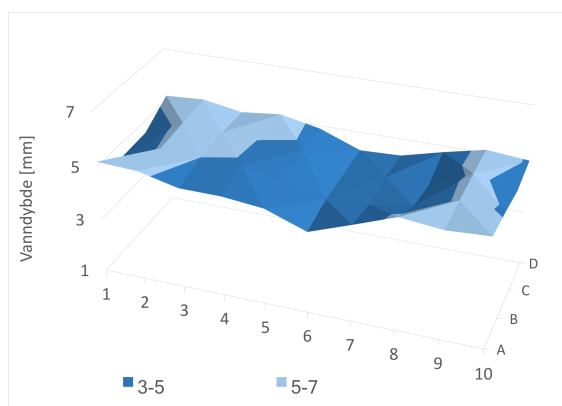
Gjennom uniformitetstesten, beskrevet i delkapittel 3.2.3, er det mulig å illustrere hvordan nedbøren faller i feltet. Målte vektverdier ble omgjort til nedbørddybde i feltet og er visuelt fremstilt i figur 4.11. Fem ulike nedbørintensiteter ble simulert like lenge og derfor er vanndybden ulik ved de forskjellige nedbørintensitetene. For å kunne sammenligne fordelingen av nedbør på tvers av nedbørintensitetene, demonstrerer figur 4.12 forholdstallet mellom hver målt vektverdi og vektgjennomsnittet ved hver nedbørintensitet. Figur 4.11 viser ingen systematisk fordeling av vanndybde i nedbørfeltet. Forholdstallet ved hver pumpehastighet i figur 4.12 ligger svært nærme én, og tyder på at differansene i vanndybden er svært små.



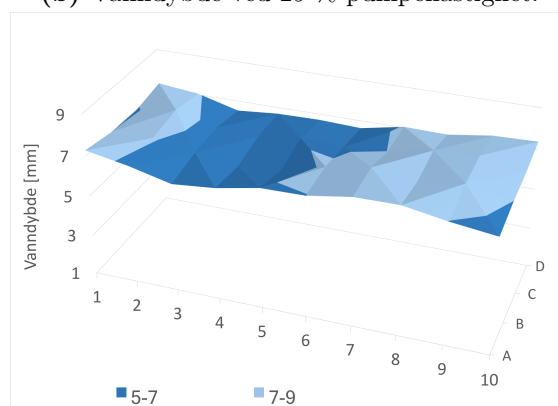
(a) Vanndybde ved 6 % pumpehastighet.



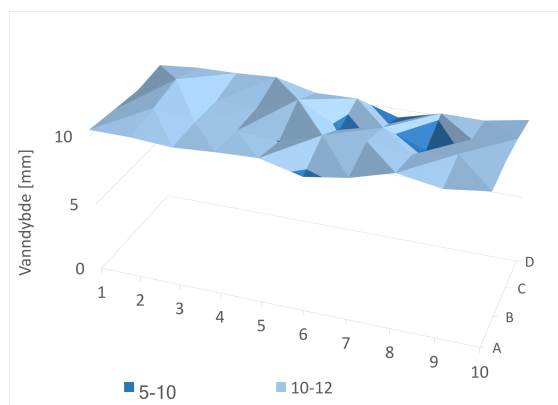
(b) Vanndybde ved 29 % pumpehastighet.



(c) Vanndybde ved 53 % pumpehastighet.

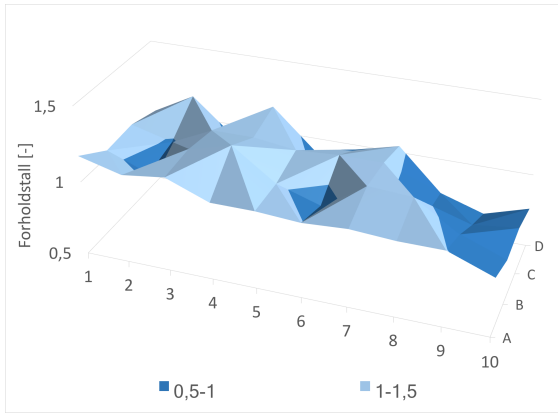


(d) Vanndybde ved 77 % pumpehastighet.

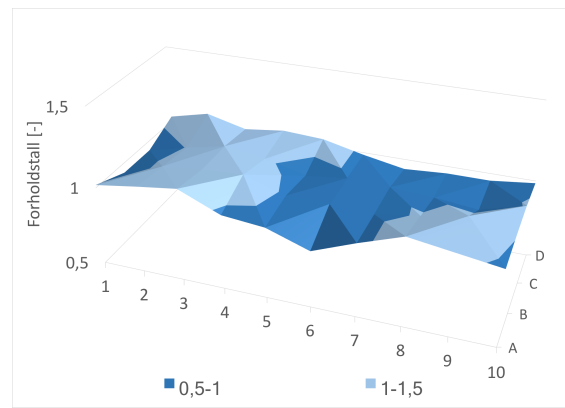


(e) Vanndybde ved 100 % pumpehastighet.

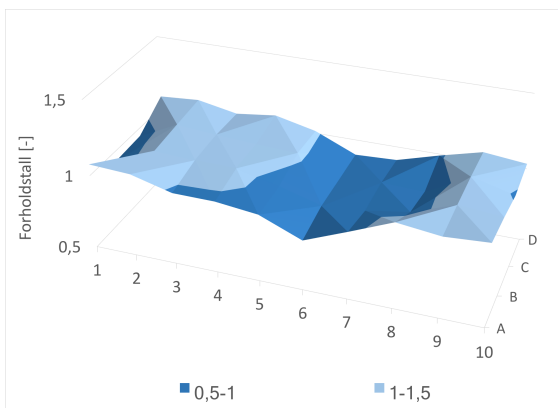
Figur 4.11: Uniformiteten representert som vanndybder i nedbørfeltet ved ulike pumpehastigheter.



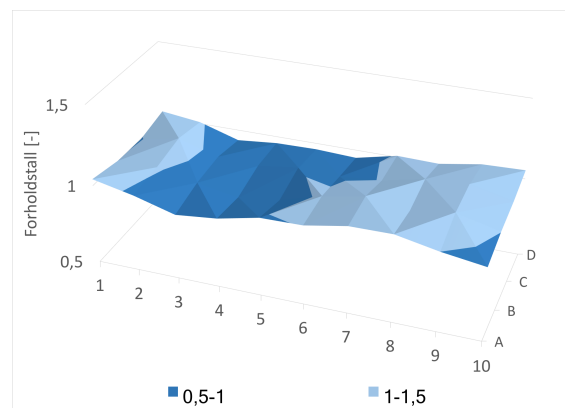
(a) Forholdstall ved 6 % pumpehastighet.



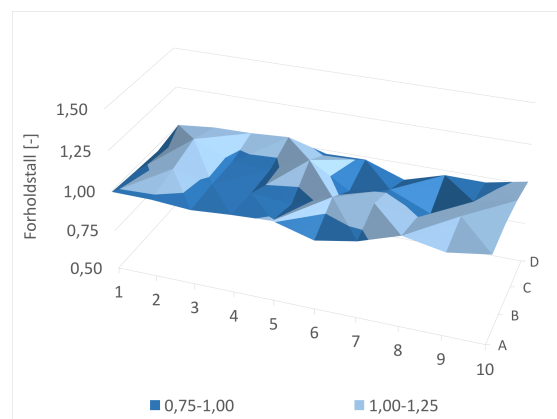
(b) Forholdstall ved 29 % pumpehastighet.



(c) Forholdstall ved 53 % pumpehastighet.



(d) Forholdstall ved 77 % pumpehastighet.



(e) Forholdstall ved 100 % pumpehastighet.

Figur 4.12: Uniformiteten representert som forholdstall mellom hver målt vektverdi og vektgjennomsnitt ved ulike pumpehastigheter. Ved forholdstall 1 vil nedbøren være helt uniform.

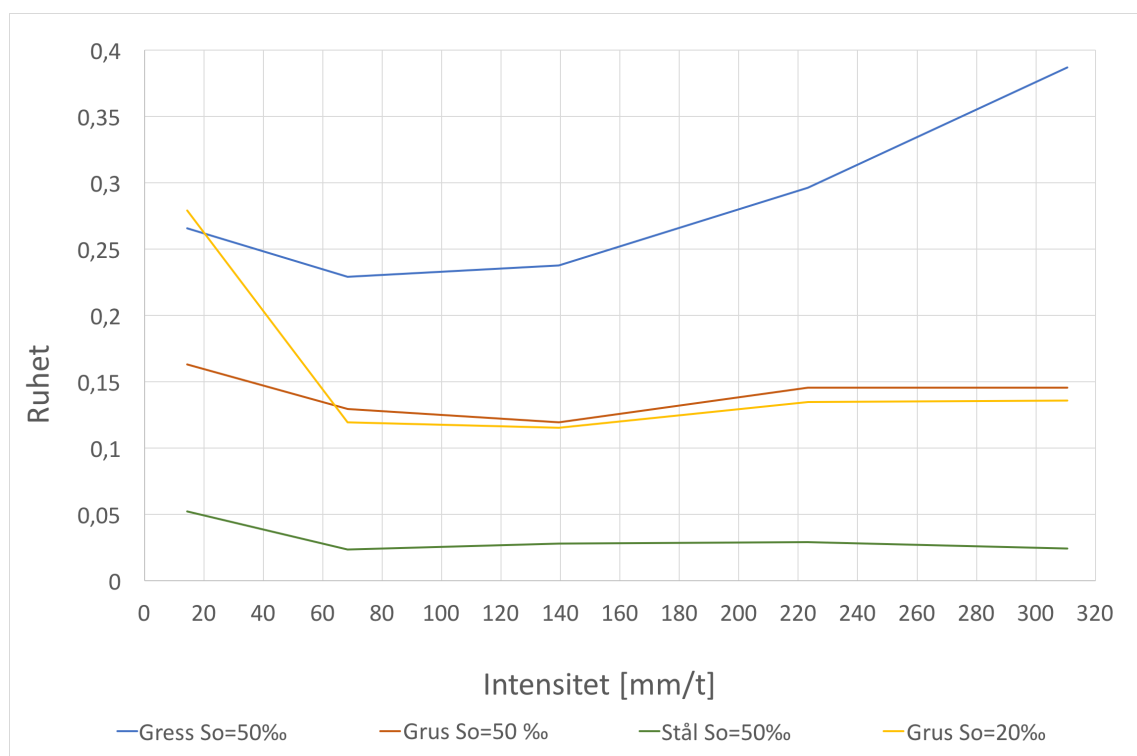
Det er spesielt viktig å oppnå uniform fordeling av nedbør i nedbør-avløpssimulatoren for å benytte seg av den kinematiske bølgeformelen vist i formel 3.1. Tabell 4.6 viser resultatet av standardavvikene for de individuelle vektobservasjonene og uniformitetskoeffisientene i nedbørfeltet ved ulike pumpehastigheter. Disse ble beregnet ved bruk av formelverket beskrevet i delkapittel 2.1.5. Lave standardavvik SD vil tilsi at de individuelle observasjonene avviker lite fra vektgjennomsnittet. Høye uniformitetskoeffisienter CU tilsier stor grad av uniform fordeling av nedbør over feltet.

Tabell 4.6: Standardavvik og uniformitetskoeffisient ved ulike pumpehastigheter.

Pumpehastighet	n	SD	CU
[RPM]	[-]	[-]	[%]
15	40	$3,6 \cdot 10^{-3}$	99,7
78	40	$7,1 \cdot 10^{-3}$	99,9
140	40	$1,6 \cdot 10^{-4}$	99,8
204	40	$1,5 \cdot 10^{-4}$	99,9
265	40	$2,5 \cdot 10^{-4}$	99,9

4.5 Konsentrasjonstid og ruhet

Opprinnelig ble det antatt at det ikke var mulig å observere en konsentrasjonstid kortere enn ett minutt. Det viste seg å ikke være tilfellet og stål ble derfor også brukt som en overflate. Resultatene for ruheten er framstilt i figur 4.13. Resultater fra målinger av konsentrasjonstid og kalibrering av ruheter er representert i tabellene 4.8 til 4.11. Figurene og tabellene viser hvordan konsentrasjonstiden og ruheten endres med tanke på hvilken helning og overflate nedbørfeltet har, samt hvilken nedbørintensitet som blir simulert. Tilsynelatende øker ruheten når nedbørintensiteten øker, med unntak ved de laveste nedbørintensitetene. Det demonstreres store forskjeller i ruhet med tanke på overflatetype.



Figur 4.13: Sammenheng mellom ruhet og nedbørintensitet ved ulike overflater og helninger.

Tabell 4.7 gir en enkel oversikt over de mest brukte pumpehastighetene, med tilhørende intensitet og vannføring. Vannføringene er lest av fra figur 4.4.

Tabell 4.7: Oversikt over mye brukte verdier under forsøk.

Pumpehastighet [%]	Pumpehastighet [RPM]	Intensitet [mm/t]	Vannføring [ml/s]
98	259,7	310,5	172,5
75	198,8	223,2	124,0
49	129,9	139,5	77,5
24	63,6	68,4	38,0
4	10,6	14,4	8,0

Det ble gjennomført to tester på hver nedbørintensitet. Resultatene i tabell 4.8 til 4.11 viser konsentrasjonstidene fra begge testene og det beregnede gjennomsnittet. I alle tabellene ser det ut til at konsentrasjonstiden blir lengre når nedbørintensiteten synker, med unntak i tabell 4.8. I denne tabellen virker som om konsentrasjonstidene ikke varierer ved de tre høyeste nedbørintensitetene. Tabell 4.12 viser gjennomsnittsruheten og ruhetsområde for hvert nedbørfelt med ulike felthelninger.

Tabell 4.8: Konsentrasjonstid og ruhet for gress med 50 ‰ helning.

Gress med 50 ‰ helning				
Nedbør- intensitet [mm/t]	Konsentrasjons- tid, tc	Konsentrasjons- tid, tc	Konsentrasjons- tid, tc	Ruhet [-]
	Test 1 [s]	Test 2 [s]	Gjennomsnitt [s]	
310,5	91	87	89	0,387
223,2	91	82	86,5	0,296
139,5	90	93	91,5	0,238
68,4	123	115	119	0,229
14,4	253	232	242,5	0,266

Tabell 4.9: Konsentrasjonstid og ruhet for stål med 50 ‰ helning.

Stål med 50 ‰ helning				
Nedbør- intensitet [mm/t]	Konsentrasjons- tid, tc	Konsentrasjons- tid, tc	Konsentrasjons- tid, tc	Ruhet [-]
	Test 1 [s]	Test 2 [s]	Gjennomsnitt [s]	
310,5	18	16	17	0,025
223,2	17	26	21,5	0,029
139,5	24	27	25,5	0,028
68,4	30	31	30,5	0,024
14,4	83	100	91,5	0,052

Tabell 4.10: Konsentrasjonstid og ruhet for grus med 50 ‰ helning.

Grus med 50 ‰ helning				
Nedbør- intensitet [mm/t]	Konsentrasjons- tid, tc	Konsentrasjons- tid, tc	Konsentrasjons- tid, tc	Ruhet [-]
	Test 1 [s]	Test 2 [s]	Gjennomsnitt [s]	
310,5	48	51	49,5	0,146
223,2	53	60	56,5	0,146
139,5	60	61	60,5	0,119
68,4	92	77	84,5	0,129
14,4	164	198	181	0,163

Tabell 4.11: Konsentrasjonstid og ruhet for grus med 20 ‰ helning.

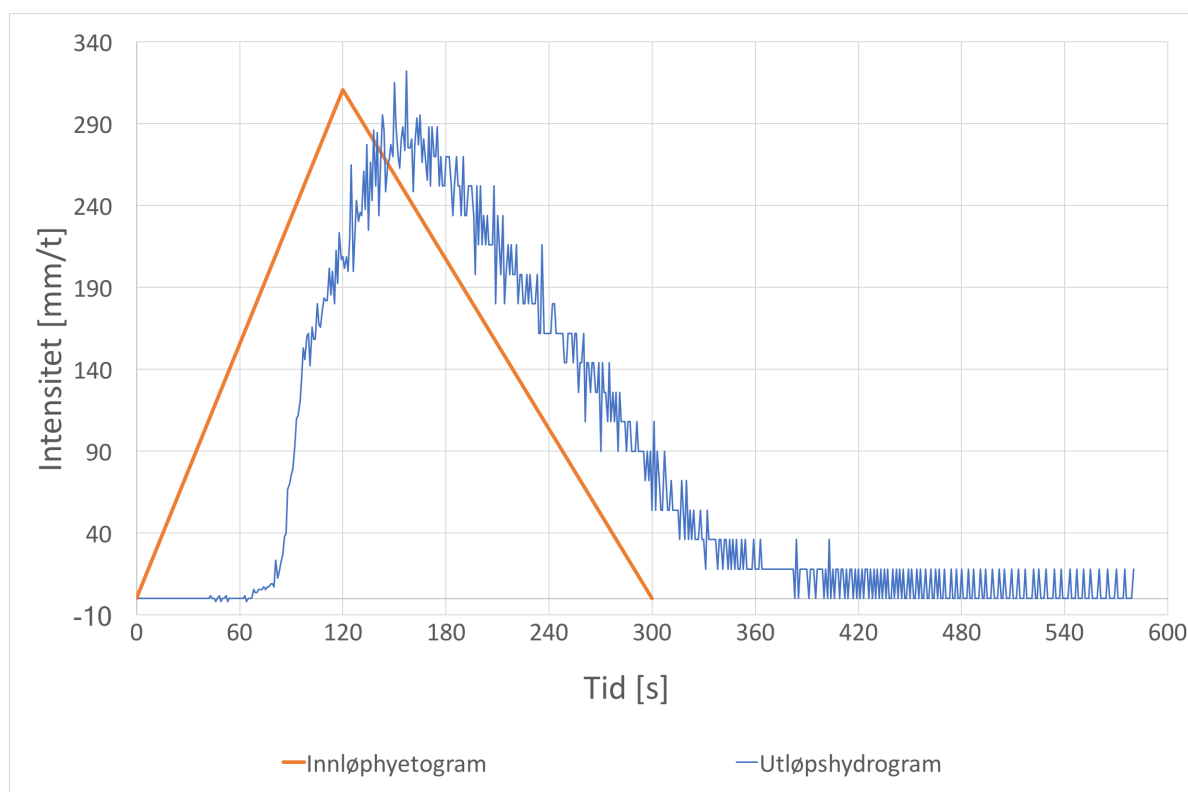
Grus med 20 ‰ helning				
Nedbør- intensitet [mm/t]	Konsentrasjons- tid, t_c	Konsentrasjons- tid, t_c	Konsentrasjons- tid, t_c	Ruhet [-]
	Test 1 [s]	Test 2 [s]	Gjennomsnitt [s]	
310,5	62	63	62,5	0,136
223,2	73	69	71	0,135
139,5	79	77	78	0,115
68,4	116	96	106	0,119
14,4	338	320	329	0,279

Tabell 4.12: Ruhet til ulike nedbørfelt.

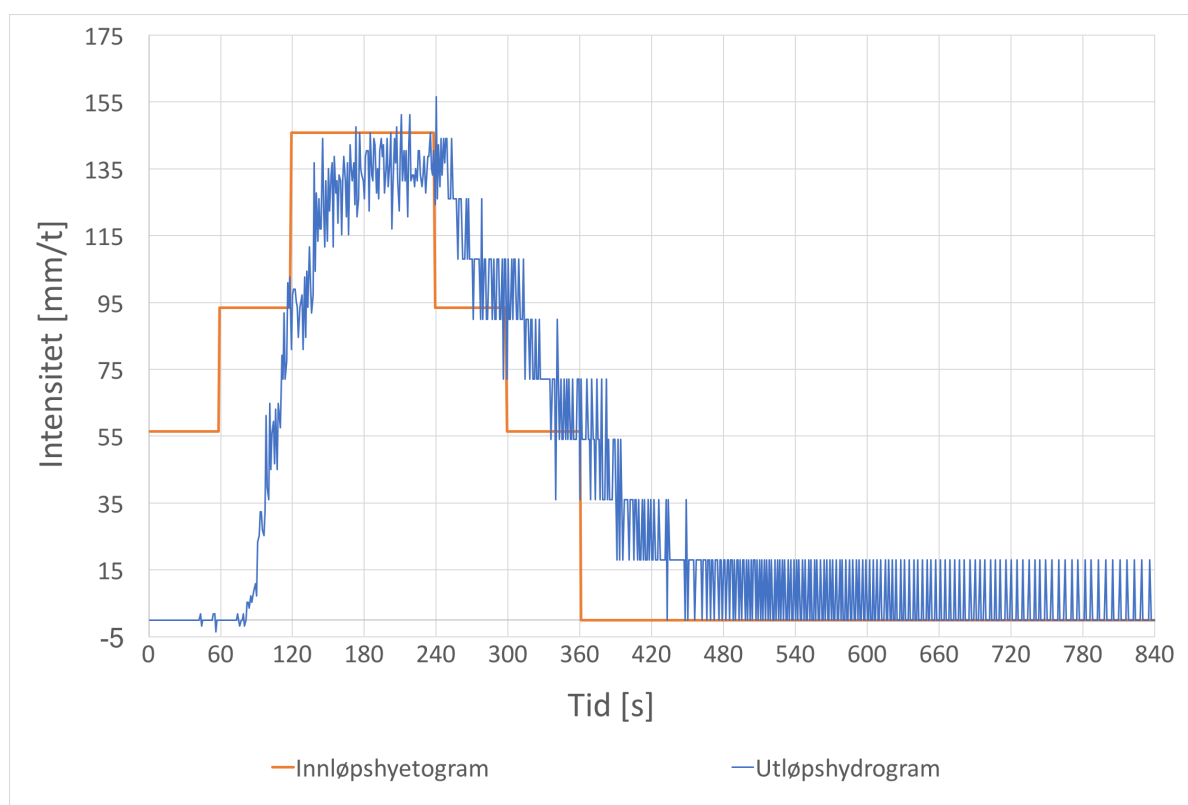
Nedbørfelt [-]	Gjennomsnittsruhet [-]	Område [-]
Gress 50 ‰	0,2832	0,229-0,387
Grus 50 ‰	0,1406	0,119-0,163
Stål 50 ‰	0,0316	0,024-0,052
Grus 20 ‰	0,1568	0,115-0,279

4.6 Modellregn og avrenning i nedbør-avløpssimulator

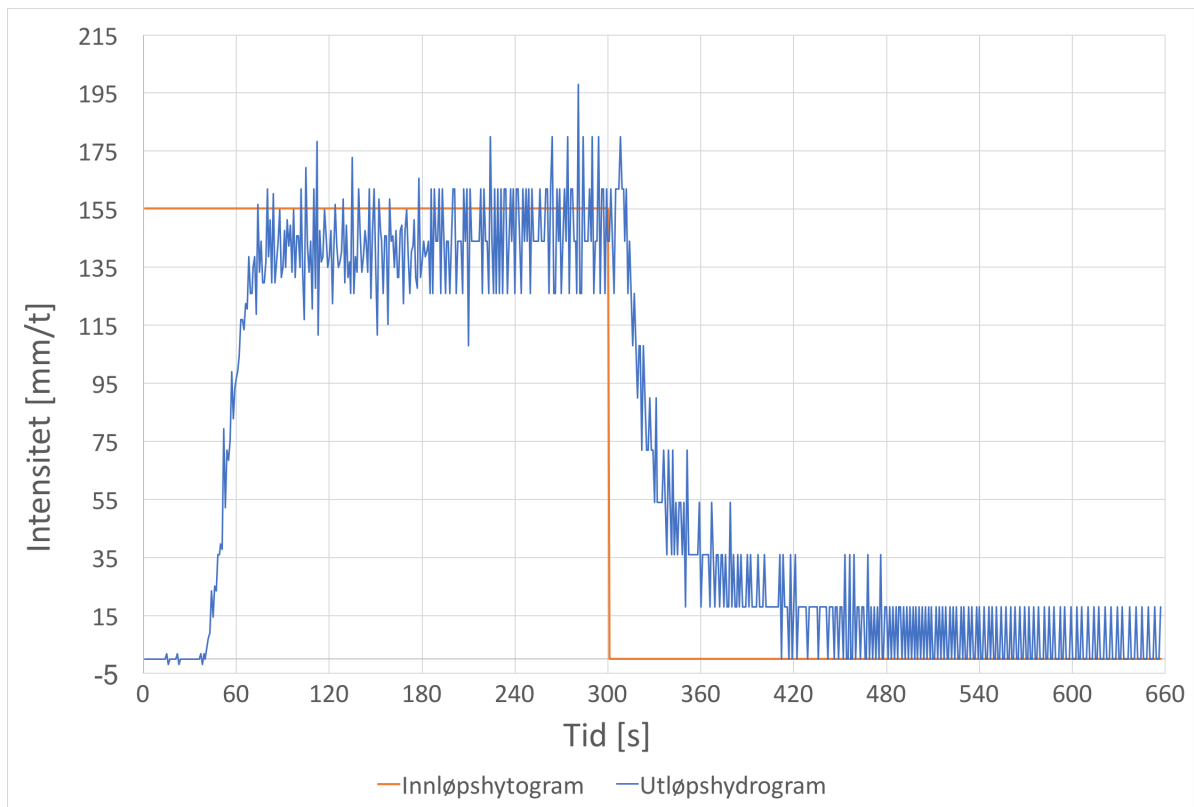
Figur 4.14 og 4.15 demonstrerer innløpshyetogrammet og utløpshydrogrammet til et trekantregn og et symmetrisk blokkhyetogram. Tilhørende kasseregn til disse modellregnene er vist i figur 4.16 og 4.17. Det er verdt å merke seg at trekantregnet i figur 4.14 har en lineær økning og nedgang siden den illustreres som nedbørintensitet, i motsetning til figur 3.18 som illustreres som pumpehastighet. Resultatene demonstrerer at avrenningsforløpene opptrer annerledes ved ulike modellregn, men samme tilført nedbørvolum. Det er verdt å legge merke til at alle utløpshydrogram som simuleres viser en treghet i starten av avrenningsforløpet. I teorien skulle avrenningen ha startet tidligere.



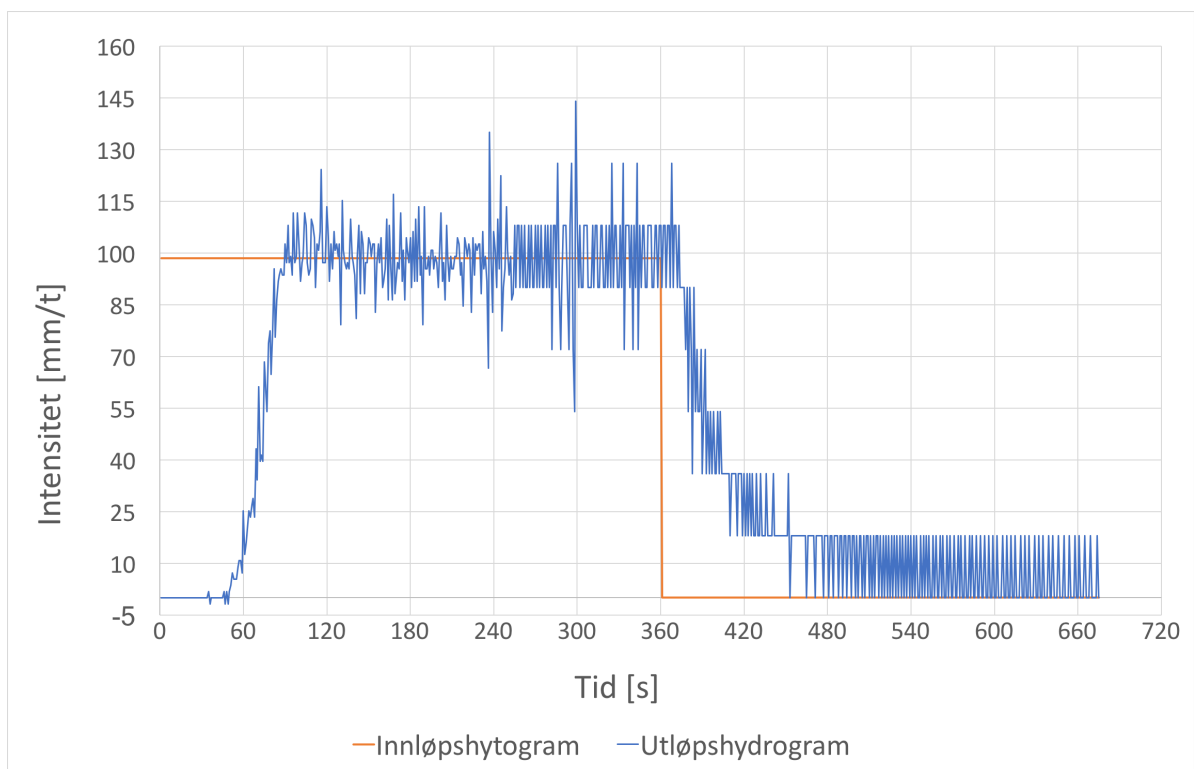
Figur 4.14: Simulert trekantregn på grus med 20 ‰ helning.



Figur 4.15: Simulert symmetrisk blokkhyetogram på grus med 20 ‰ helning.

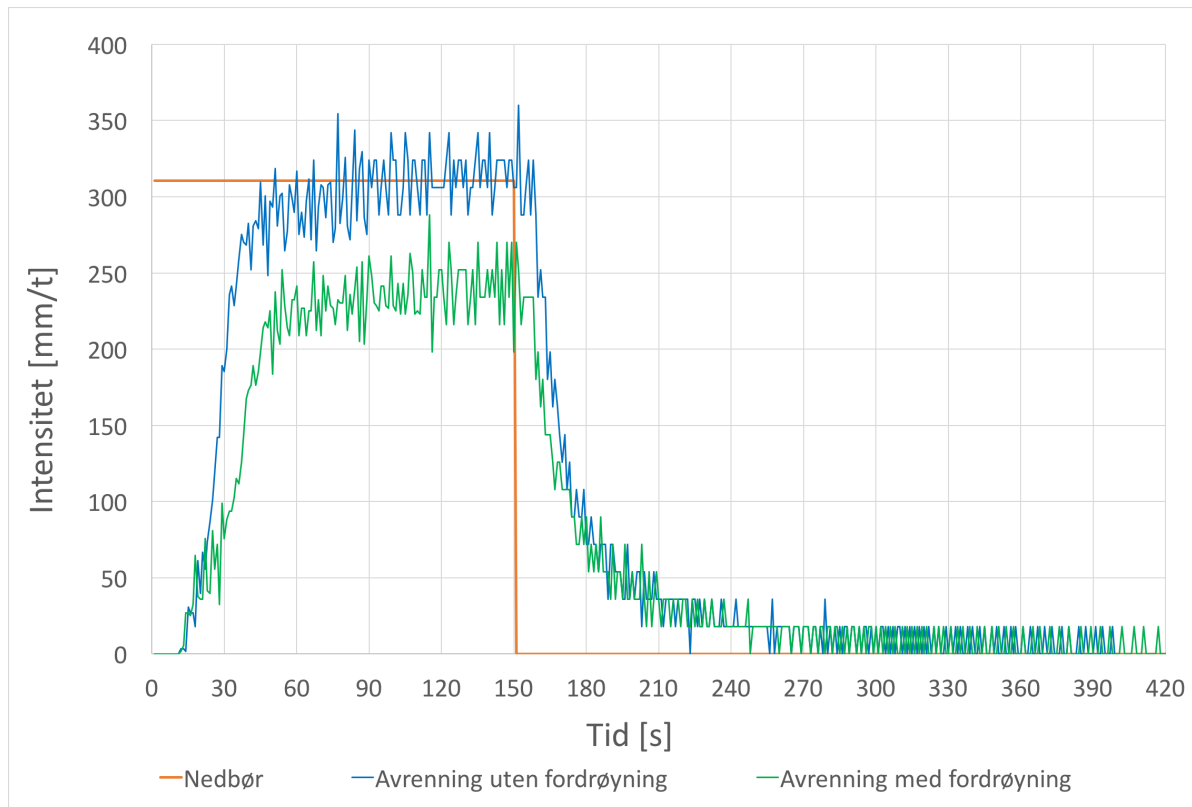


Figur 4.16: Simulert kasseregner som er basert på samme nedbørstatistikk som trekantregnet i figur 4.14, med lik overflate og helning.



Figur 4.17: Simulert kasseregner som er basert på samme nedbørstatistikk som symmetrisk blokkhydrogram i figur 4.15, med lik overflate og helning.

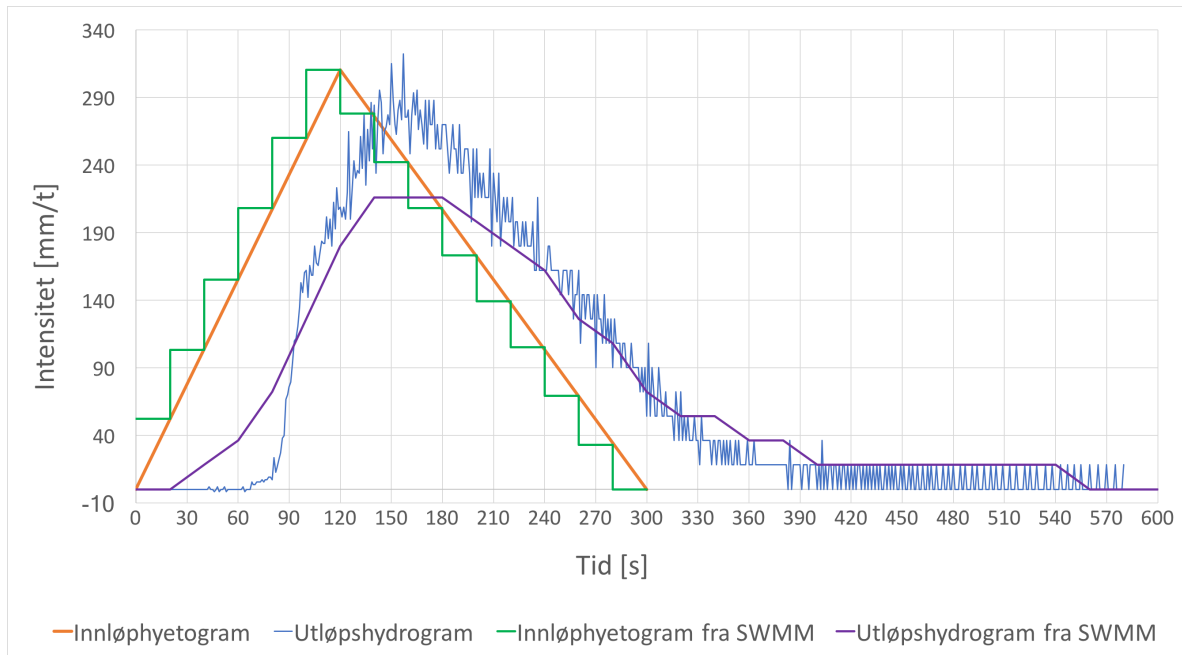
Det ble også gjennomført en test på hvordan simulatoren kan representere overvannshåndtering. Utløpshydrogrammene fra de to testene beskrevet i delkapittel 3.2.5 er demonstrert i figur 4.18. Figuren viser at det er tydelige forskjeller i utløpshydrogrammene. Den maksimale avrenningen er lavere der det er blitt innført overvannshåndtering.



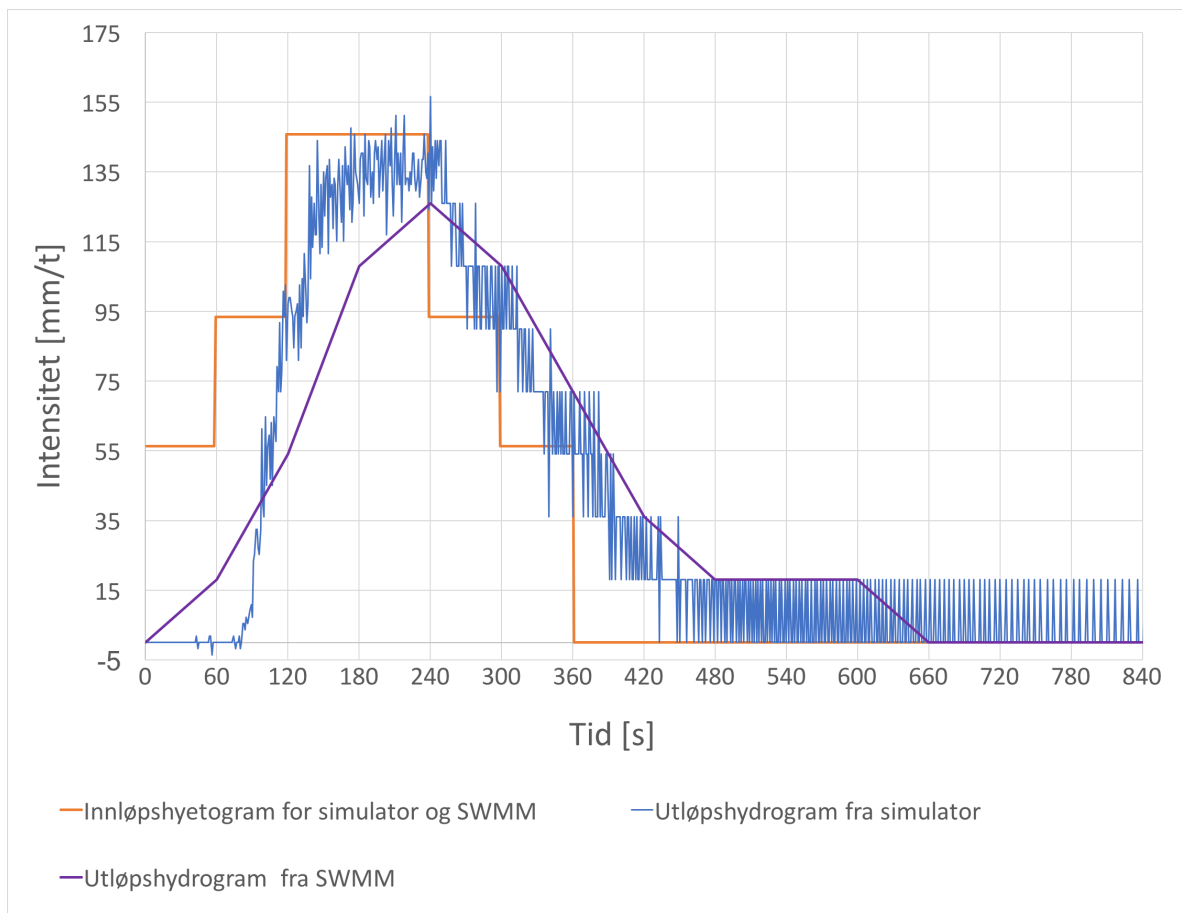
Figur 4.18: Simulert kasseregnet med og uten fordrøyningsmagasiner på grus med 50 ‰ helning

4.7 Modellregn og avrenning i SWMM

Innløpshyetogram og utløpshydrogram med samme nedbørhendelser og feltparametre ble simulert i både nedbør-avløpssimulatoren og i dataprogrammet SWMM. Disse illustreres i figur 4.19 og 4.20. Tabell 4.13 viser en oversikt over verdi og tidspunkt for de maksimale avrenningene. Resultatene viser at den maksimale avrenningen er noe høyere fra simulatoren, og starten på avrenningen opptrer senere enn i SWMM. De simulerte avrenningsforløpene er imidlertid svært like. Det er viktig å merke seg at trekantregnet har en tidsoppløsning på 20 sekunder i SWMM, mens det symmetriske blokkhyetogrammet har en tidsoppløsning på ett minutt.



Figur 4.19: Sammenligning av simulert trekantregn og avrenning i simulatoren og SWMM. Nedbørfelt med 20 ‰ helning og grus ruhet $n=0,1568$.



Figur 4.20: Sammenligning av simulert symmetrisk blokkhyetogram og avrenning i simulatoren og SWMM. Nedbørfelt med 20 ‰ helning og grus med ruhet $n=0,1568$.

Tabell 4.13: Oversikt over resultatene fra nedbør-avløpssimulator og SWMM.

	Trekantregn		Symmetrisk blokkhyetogram	
	Fra simulator	Fra SWMM	Fra simulator	Fra SWMM
Maksimal avrenning [ml/s]	155	120	77,8	70
Maksimal avrenning [mm/t]	279	216	140	126
Tid for maksimal avrenning [s]	160	140	225	240

5. Diskusjon

Kapittelet vil begrunne og diskutere resultatene som framstilles i kapittel 4. Hovedmålet i kapittelet er å gi et helhetlig bilde av simulatorens funksjoner og diskutere om alle mål som ble satt ved starten av oppgaven ble oppfylt.

5.1 Utforming av nedbør-avløpssimulatoren

NMBU ønsker en lab for å demonstrere konsepter knyttet til nedbør- og avløpsdannelser. Den produserte nedbør-avløpssimulatoren skal kunne fungere godt som et praktisk undervisningsalternativ for fremtidige studenter.

Simulatoren har en størrelse på 2 m². Det er montert på hjul slik at simulatoren er mobil. Det er viktig at simulatoren står i vater for at nedbøren skal fordeles riktig. Det hadde derfor vært ideelt med en hev- senk- funksjon på bordbenene, slik at simulatoren enkelt kan være vatret i tilfeller der den plasseres på ujevne underlag. Simulatoren er utstyrt med en hev-senk-funksjon i den øvre delen av nedbørfeltet slik at det er mulig å manuelt stille inn ønsket helning. For å gjøre innstillingen lettere og mer nøyaktig, kan det vurderes å installere en elektrisk hev-senk-funksjon.

Den simulerte nedbøren ser ut som ekte regn, hvor det i hovedsak faller som dråper. Avrenningen observeres ved utløpet av simulatoren der den renner ned i et oppsamlingskar. Videre analyser av simuleringene gjennomføres med bruk av loggede måleverdier.

I fordelingssystemet er det viktig å unngå at kanylene tettes av partikler i vannet. Kanylene ble festet ved at de ble presset gjennom pilothull i fordelingsrørene. Det kan oppstå utfordringer hvis en kanyle må byttes. Det er ikke sikkert at kanylen vil holdes på plass av press lenger og må muligens limes fast. For å minimalisere risikoen for tette kanyler, forslås det en installasjon av et filter ved vanninntaket.

5.1.1 Programvare

Programmet for styring av pumpe og måling av avrenning ble laget i LabView og virkemåten er beskrevet i delkapittel 3.2.1. Programmet fungerte godt til forsøkene som ble gjennomført i denne oppgaven, og det var oversiktlig og brukervennlig. Likevel er det rom for forbedring og optimalisering. Programmet burde ha en funksjon som automatisk omgjør pumpehastighet til nedbørintensitet. Dette kan gjøres ved hjelp av formler generert fra regresjonsanalyser, som f.eks. i figur 4.5. Det var kun ti punkter tilgjengelig for innsetting av pumpehastighet og varighet i programmet. Det er ønskelig at det innsettes flere punkter slik at simulering av ulike modellregn ikke blir begrenset av antall punkter. En optimalisering av dataprogrammet kan også gjøre det mulig å kjøre andre modellregn, slik som Chicago-metoden. Pumpens responstid for programmet viste seg å være treg i oppstarten. Dette gjelder kun i starten, og ikke ved overgangen av ulike pumpehastigheter. Det ble korrigert under forsøkene og er beskrevet i delkapittel 3.2.1. Det anbefales å finne en bedre og mer permanent løsning på denne korrigeringen.

5.2 Sammenheng mellom pumpehastighet og nedbørintensitet

Det ble benyttet en Watson-Marlow 360Du pumpe til å regulere vannføringen inn i simulatoren. Forsøk som testet sammenhengen mellom pumpehastighet og levert vannføring ble gjennomført. Resultatene fra forsøkene er representert i figur 4.4 og tabell 4.1 og viser at vannføringen som kommer direkte ut fra pumpe er tilnærmet proporsjonal med pumpehastigheten. Derimot viser resultatene at vannføringen gjennom fordelings-systemet, det som vil tilsi nedbørintensiteten, avviker fra vannføringen direkte ut fra pumpe. Det skjer hovedsakelig fordi det oppstår et tap når vannføringen presses ut av kanylene. Tapet i kanylene er svært viktig for at nedbøren skal være uniformt fordelt over nedbørfeltet og at nedbøren kan starte og stoppe momentant. I tillegg viste det seg at tilførselsrøret fra pumpe til fordelingsrørene, som er beskrevet i delkapittel 3.1.3, ble mindre enn det som var nødvendig for minimalt friksjonstap. Følgelig kan dette også ha hatt en påvirkning på tapet gjennom fordelings-systemet.

For å etablere nedbørintensitetene ut fra fordelings-systemet, ble det generert regresjonslinjer og tilhørende formler for intensiteten. Dette er framstilt i figur 4.4. Regresjonslinjen vil tilsynelatende gi en maksimal feilmargin på 9 mm/t, sett ut fra de individuelle målte nedbørintensitetene. Feilmarginen kan ha hatt en påvirkning på beregningene av ruhet og fremstilling av utløpshydrogram. Ved videre arbeid på simulatoren kan det gjøres justeringer slik at sammenhengen mellom pumpehastigheten og nedbørintensiteten er helt nøyaktig.

Figur 4.4 viser at regresjonslinjen ligger under de faktiske vannføringsobservasjonene ved lav pumpehastighet, for deretter å ligge over ved de høye pumpehastighetene. Dette er tilsynelatende trenden til vannføringen fra både pumpa og ut av fordelingssystemet. Det kan tyde på at det foreligger en systematisk feil på enten pumpa eller vekten. Ved nærmere ettertanke kan det være at tredjegradspolynomene hadde vært en bedre representasjon av faktisk vannføring. Denne sammenheng burde undersøkes ytterligere.

5.3 Databehandling av avrenningsmåler

Som nevnt i delkapittel 3.1.4 var det vekt som ble valgt som avrenningsmåler. Vekten hadde mulighet til å gi mange målinger i sekundet med oppløsning på 1 g. LabView ble likevel satt til å kun registrere én måling i sekundet for at datamaskinen skal kunne håndtere programmet. Det var heller ikke nødvendig med flere målinger i sekundet. Målingene ble logget og omgjort til utløpshydrogram. Vekten har en maksimal vektbegrensning på 30 kg. Vektbegrensningen har ingen betydning for analysene gjort i denne oppgaven, men i tilfeller der det er ønskelig å kjøre høye intensiteter over lengre perioder kan en vektkapasitet på 30 kg bli for lite.

Svingningene som oppstår i målingene, som vist i figur 4.9 og 4.8, ble opprinnelig antatt til å være et resultat av en impulseffekt når hastigheten på avrenningen ble bremsert i oppsamlingskaret. En slik impulseffekt ville vist seg ved at gjennomsnittet av svingningene, som beregnes og vises i tabell 4.2 til 4.5, ligger høyere enn nedbørintensiteten. Resultatene viser ingen trend til dette. Ut i fra figuren 4.10, kan det tyde på at svingningene er støy i målingene som er forårsaket av bevegelser i vannet når avrenningen treffer oppsamlingskaret. Dette er også en type impulseffekt. Det er en trend at gjennomsnittet av svingningene gir større utslag ved lavere nedbørintensiteter, noe som kan tyde på at vekten fungerer dårligere som avrenningsmåler ved de lave nedbørintensitetene.

Resultatene i tabell 4.2 til 4.5 viser at gjennomsnittet av svingningene er tilnærmet lik nedbørintensiteten, og man kan dermed se bort ifra svingningene. Det er da akseptabelt å behandle rådataene for å fremstille en glatt avrenningskurve, ettersom det representerer det faktiske avrenningsforløpet. En litt mer avansert algoritme kan muligens klare å se på flere antall tidssteg fra vektmålingene i figur 4.6 og 4.7 samtidig, og følgelig gi en bedre og støyfri avrenningskurve.

5.4 Nedbørens uniformitet

For å kunne bruke den kinematiske bølgeformelen 3.1, foreligger det en forutsetning om at regnet skal distribueres uniformt over nedbørfeltet. Resultatene fra undersøkelsene om uniformitet er representert i delkapittel 4.4. Resultatene fra tabell 4.6 viser at stan-

dardavviket er svært lavt og uniformitetskoeffisienten svært høy. I tillegg så viser figur 4.11 at det er ingen systematisk fordeling av nedbør i feltet, og figur 4.12 viser at differansene i vanndybde er svært små. Det tilsier at den simulerte nedbøren er tilnærmet uniformt fordelt over hele nedbørfeltet.

Siden nedbøren er uniform, vil nedbør-avløpssimulatoren ikke klare å representere hvordan en nedbørhendelse forflytter seg over et nedbørfelt. Uniformiteten i nedbøren fører dermed til at den romlige variasjonen som ofte opptrer i virkelige nedbørhendelser, ikke blir demonstrert i simulatoren. Siden nedbørfeltet er veldig lite vil det nok uansett oppstå utfordringer med å representere de romlige variasjonene i nedbør- og avløpsdannelse.

5.5 Nedbørfeltenes konsentrasjonstid og ruhet

Konsentrasjonstiden leses av utløpshydrogram når likevektsvannføring har opptrådt. Konsentrasjonstiden benyttes til beregninger av overflatens ruhet. Ruheten er framstilt i figur 4.13 og en oversikt over konsentrasjonstid og ruhet framstilles i tabell 4.8 til 4.11. Det ble først antatt at konsentrasjonstiden burde være lenger enn ett minutt. Avrenningsmåleren hadde derimot så hyppige målinger at det ble mulig å lage gode utløpshydrogram selv med kortere konsentrasjonstider. Derfor ble det også kjørt simuleringer med ståloverflate som nedbørfelt i tillegg til gress og grus. Den minste konsentrasjonstiden ble målt til 16 sekunder på ståloverflaten med 50 ‰ helning og en nedbørintensitet på 310,5 mm/t.

Svingningene på utløpshydrogrammene kan gi usikkerheter ved avlesninger av konsentrasjonstid. Feil avlesning av konsentrasjonstid fører til feil i beregninger av ruhet. Ruheten er, i tillegg til konsentrasjonstid, også avhengig av nedbørintensitet. Avlesningen av nedbørintensiteter kan ha en feilmargen på opptil 9 mm/t, som er diskutert i delkapittel 5.2. Usikkerhet knyttet til nedbørintensitet vil føre til usikkerheter i beregninger av ruhet. I tillegg kan denne feilmarginen påvirke fremstillingen av grafene, hvor det kan se ut som likevektsvannføringen enten er høyere eller lavere enn nedbørintensitet, noe som ikke er mulig.

Det er en selvfølge at resultatene viser store forskjeller i ruheten mellom stål, grus og gress. I følge den kinematiske bølgeformelen vist i formel 3.11, vil ruheten øke når konsentrasjonstiden eller nedbørintensiteten øker. Resultatene i tabell 4.8 til 4.11 viser at konsentrasjonstiden blir kortere når nedbørintensiteten øker. Ettersom figur 4.13 viser trend til at ruhetene øker ved økende nedbørintensitet vil det bety at nedbørintensiteten har størst påvirkning på ruheten.

Trenden om at ruheten øker med økt nedbørintensitet har et unntak ved de aller laveste intensitene. Her er konsentrasjonstidene betraktelig mye lengre, og ruheten er noe høyere.

Det er mulig at nye faktorer trer inn ved så lave nedbørintensiteter. F.eks. kan kapillære krefter i vannet føre til at avrenningen blir holdt tilbake og konsentrasjonstiden øker. Det betyr at ved de lave nedbørintensitetene så vil det være konsentrasjonstiden som har størst påvirkning på ruheten.

De tre største nedbørintensitene skiller seg ut i tabell 4.8 med tanke på at konsentrasjonstiden ikke varierer med nedbørintensiteten. Det kan tyde på at gresset ikke oppfører seg som det den kinematiske bølgeformelen vil tilsi, og burde undersøkes ytterligere.

Ruheten er også avhenging av nedbørfeltets helning. Resultatene i figur 4.13 viser en liten forskjell i ruhet for grusflaten ved endring i felthelning fra 50 til 20 ‰. Denne forskjellen er svært liten og tyder på at helningen har minimal effekt på ruheten.

I følge Mannings n for overflatestrømning, beskrevet i 2.2.6, skal grus ha en overflateruhet på 0,02 og gress ha en overflateruhet på 0,25. I følge tabell 4.12 har de benyttede overflatene, grus og gress, hhv. gjennomsnittsruhet på 0,1406 og gjennomsnittsruhet på 0,2832. Differansen mellom de to overflatene var derfor mindre enn ønskelig. Heldigvis kunne stål også bli benyttet som en overflate, og hadde en gjennomsnittsruhet på 0,0316. Formålet med å vise forskjellene i avrenningsforløpet avhengig av overflateruhet og nedbørintensitet ble dermed oppnådd.

5.6 Modellregn

Figurene 4.14 og 4.15 viser et simulert trekantregn og symmetrisk blokkhyetogram. Figur 4.16 og 4.17 viser tilhørende kasseregner som baserer seg på samme nedbørstatistikk som hhv. trekantregnet og det symmetriske blokkhyetogrammet. Hensikten med forsøkene er å demonstrere og sammenligne avrenningsforløpene. Kasseregnene har samme volum som de tilhørende modellregnene men er konstant i tid og det resulterer i at kasseregnene vil få et annerledes utløpshydrogram. I undervisning er det ønskelig å studere forskjellen mellom avrenningsforløpene ved ulike modellregne med samme nedbørstatistikk. Resultatene viser at det kan gjøres med denne simulatoren. Som et praktisk eksempel, som også er nyttig til undervisning, ble det demonstrert hvordan overvannshåndtering kan benyttes for å holde tilbake avrenning. Dette er vist i figur 4.18.

5.7 Sammenligning med SWMM

For å sammenligne utløpshydrogrammene, ble det simulert like modellregn og nedbørfelt i nedbør-avløpssimulatoren og SWMM. Resultatene i figur 4.19 og 4.20 og tabell 4.13 viser at simulatoren og SWMM gir svært like avrenningsforløp ved både et trekantregn og et symmetrisk blokkhyetogram. Maksimal avrenning er imidlertid noe høyere

og opptrer tidligere i simulatoren enn det gjør i SWMM. Den lille forskjellen mellom simulatoren og SWMM kan skyldes tidligere nevnte unøyaktigheter, slik som feilmargin i nedbørintensitet eller feil i avlesning av konsentrasjonstid. Siden denne forskjellen er svært liten, tyder det på at den fysiske situasjonen i simulatoren stemmer godt med den avrenningsmodellen som SWMM bruker, og SWMM vil derfor være i stand til å reprodusere det samme avrenningsforløpet.

Det er viktig å legge merke til at utløpshydrogrammene fra simulatoren har en treghet i starten av avrenningen og gjelder for alle utløpshydrogram som er fremstilt. Det er usikkert hvorfor denne tregheten oppstår. Det er mulig at det finnes uforutsette gromaganiseringer i nedbørfeltet som bidrar til å forsinke starten på avrenningen, selv om hver simulering startet med fuktet nedbørfelt. Nebbet ved nedbørfeltets utløp har en kort lengde som også kan bidra til å forsinke starten, men trolig i liten grad. Tregheten i starten av avrenningsforløpet burde undersøkes ytterligere.

5.8 Videre arbeid

Det er rom for forbedring og optimalisering av nedbør-avløpssimulatoren. Først og fremst demonstrerer simulatoren kun konsepter i forbindelse med nedbør og avløpsdannelse. Simulatoren er likevel bygget slik at det skal være mulig med videre utvikling der man kan se på sammenhengen mellom nedbør, overflateavrenning og infiltrasjon. Det er også mulig å utforske om simulatoren kan brukes til studier på erosjon.

Som nevnt kan både pumpestyring og avrenningsmåling bli optimalisert. Sammenhengen mellom pumpehastighet og nedbørintensitet bør være mer nøyaktig fremstilt. En mulighet kan være å installere en vannføringsmåler på tilførselssiden for å ha full kontroll på hva pumpa gir. Det bør også vurderes å implementere mer sofistikert avrenningsberegning.

I tillegg hadde det vært nyttig å demonstrere hvordan avrenningsforløp opptrer i nedskalerte modeller av tettsteder, f.eks. med bruk av en 3D-printer for å produsere nedbørfeltene. Ytterligere demonstrasjoner av tiltak for overvannshåndtering vil også være interessant. Det bør også undersøkes om simulatoren klarer å demonstrere at maksimal avrenning opptrer når regnvarigheten er lik konsentrasjonstiden for et gitt gjentakintervall.

6. Konklusjon

I denne oppgaven har den nødvendige teorien, metoden og resultatene for å utforme og produsere en nedbør-avløpssimulator blitt presentert. For å demonstrere konsepter i forbindelse med nedbør og avløpsdannelse er det blitt gjennomført grundige analyser på simulatorens utforming og funksjon.

En peristaltisk pumpe ble benyttet til å styre nedbørintensitetene i simulatoren. Resultatene viser at ved bruk av denne pumpa er det mulig å demonstrere ulike modellregn. I oppgaven ble det simulert kasseregner, trekantregn og symmetriske blokkhyetogram, men andre modellregn kan også simuleres. I oppgaven ble det utformet et rørsystem med innsatte kanyler for å fordele nedbør over mindre områder. Simulatoren klarer derfor å framstille en uniform fordeling av nedbør over feltet, samtidig som det er mulig å kontrollere både høye og lave nedbørintensiteter. En ulempe med simulatoren er at den ikke klarer å demonstrere romlige variasjoner, noe som hadde blitt veldig utfordrende på et så lite nedbørfelt.

Det ble kjørt simuleringer på tre ulike overflater for at nedbør-avløpssimulatoren skal demonstrere hvordan avrenningsforløpet endres med hensyn på nedbørintensitet, overflatetype og helning i feltet. De tre overflatene var grus, gress og stål. Som forventet viste resultatene store forskjeller i avrenningsforløpene. Vekt som avrenningsmåler ga gode og hyppige målinger, men genererte svingninger i utløpshydrogrammene. Svingningene oppstår trolig grunnet bevegelse i oppsamlingskaret og kan ses bort ifra fordi gjennomsnittet av svingningene tilsvarer nedbørintensiteten. En avansert algoritme kan derfor utarbeides for å forbedre avrenningskurven.

Det er en usikkerhet knyttet til forholdet mellom nedbørintensiteten og pumpehastigheten. Nedbørintensiteten kan avleses med en feilmargin og kan lede til unøyaktige beregninger. I tillegg kan svingningene i målingene fra vekten føre til usikre avlesninger av konsentrasjonstid på utløpshydrogrammene. Det kan føre til ytterligere unøyaktigheter i beregninger.

I all hovedsak er det blitt konstruert en nedbør-avløpssimulator som klarer å demonstrere realistiske nedbør- og avrenningshendelser. Simulatoren er brukervennlig og fungerer som en god løsning for en mer praktisk undervisningsmetode og kan forhåpentligvis skape en økt forståelse av sammenhengen mellom nedbør og avrenning hos studenter.

Referanser

- Abudi, I., Carmi, G. og Berliner, P. (aug. 2012). Rainfall simulator for field runoff studies. *Journal of Hydrology* 454-455: 76–81. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2012.05.056](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.056).
- Akan, A. O. og Houghtalen, R. J. (2003). *Urban Hydrology, Hydraulics and Stormwater Quality*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Aksoy, H., Unal, N. E., Cokgor, S., Gedikli, A., Yoon, J., Koca, K., Inci, S. B. og Eris, E. (nov. 2012). A rainfall simulator for laboratory-scale assessment of rainfall-runoff-sediment transport processes over a two-dimensional flume. *CATENA* 98: 63–72. DOI: [10.1016/j.catena.2012.06.009](https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.06.009).
- Armfield (2015). Rainfall hydrographs. *S SERIES: APPLIED HYDRAULICS & HYDROLOGY* (10).
- Burke, A. (2018). *Advantages of Peristaltic Pumps in Metering Applications*. URL: <https://www.pumpsandsystems.com/advantages-peristaltic-pumps-metering-applications>.
- Butler, D., Digman, C., Makropoulos, C. og Davies, J. W. (2018). *Urban Drainage*. 4. utg. Florida: CRC Press Taylor & Francis Group.
- Bøyum, Å., Eidsmo, T., Lindholm, O., Noreide, T., Semb, T., Skretteberg, R. og Markhus, E. (1997). *Anvendt urbanhydrologi*. Tekn. rapp. 10: 193. URL: http://publikasjoner.nve.no/publikasjon/1997/publikasjon1997_10.pdf.
- Chin, D. A. (2013). *Water-Resources Engineering*. Red. av A. Mazumdar og P. K. Roy. 3. utg. Edinburgh: Pearson Education.
- Christian Berner (udatert). *Christian Berner*. URL: <https://www.christianberner.no/>.
- Dabbous, B. (1962). *A Study of Sprinkler Uniformity Evaluation Methods*. Masteroppgave. Utah: Utah State University. URL: <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2556&context=etd>.
- Endress+Hauser (2020). *Kapasitiv sonde med to stenger for kontinuerlig nivåmåling i væsker*. URL: https://www.e-direct.endress.com/no/nb/tostav-kapasitiv-f%C3%B8ler-liquicap-t-fmi21-for-niv%C3%A5m%C3%A5ling-i-v%C3%A6sker?fbclid=IwAR0ioSgO6oWUR3pJ2Q98s0lnJZ_E-ZoPjlzxAb9h-mlpU-QzgSPHnZi48v8.
- EPA (2016). *Storm Water Management Model (SWMM)*. URL: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/P100QR9R.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2016+Thru+2020&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=>.
- Gunt (2019). Hm 141 Hydrographs after precipitation: 1–2.
- Heber Green, W. og Ampt, G. A. (mai 1911). Studies on Soil Physics. *The Journal of Agricultural Science* 4(1): 1–24. DOI: [10.1017/S0021859600001441](https://doi.org/10.1017/S0021859600001441).

- Hendriks, M. R. (2010). *Introduction to Physical Hydrology*. 1. utg. New York: Oxford University Press: 14–47.
- Holvik, I. S. (2011). Klimaendringar og følgjer for overvassavrenning. *VANN* 46 (01): 91–99.
- Horton, R. E. (1933). The Rôle of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions, American Geophysical Union* 14 (1): 446. DOI: [10.1029/TR014i001p00446](https://doi.org/10.1029/TR014i001p00446).
- Hoås, H. (2018). *Nedbørmåling fra data i mobiltelefonnettverk: potensiale i Norge*. Masteroppgave. Ås: Norges miljø- og biovitenskapelige universitet.: 13–14. URL: <http://hdl.handle.net/11250/2594299>.
- Itas (udatert). *Om ITAS*. URL: <https://www.it-as.no/om-scanmatic/>.
- J. B. Humphry, T. C. Daniel, D. R. Edwards og A. N. Sharpley (2002). A portable rainfall simulator for plot-scale runoff studies. *Applied Engineering in Agriculture* 18 (2). DOI: [10.13031/2013.7789](https://doi.org/10.13031/2013.7789).
- LabMo (2019). *Hva er en tannhjulpumpe?* URL: <https://www.labmo.no/hva-er-en-tannhjulpumpe/>.
- Løvås, G. G. (2013). *Statistikk for universiteter og høyskoler*. 3. utg. Oslo: Universitetsforlaget.
- Marra, F. og Morin, E. (des. 2015). Use of radar QPE for the derivation of Intensity–Duration–Frequency curves in a range of climatic regimes. *Journal of Hydrology* 531. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2015.08.064](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.08.064).
- Mathisen, R. (2018). *Fortrenningspumpe*. URL: <https://ndla.no/nb/subjects/subject:28/topic:1:194200/topic:1:121943/resource:1:123159>.
- MFT (2020). *FluidTipper*. URL: <https://mft.no/fluidtipper/>.
- Moriarty, P. J., Gallagher, B. L., Mellor, C. J. og Baines, R. R. (okt. 2003). Graphical computing in the undergraduate laboratory: Teaching and interfacing with LabVIEW. *American Journal of Physics* 71 (10): 1062–1074. DOI: [10.1119/1.1582189](https://doi.org/10.1119/1.1582189).
- Na, W. og Yoo, C. (okt. 2018). Evaluation of Rainfall Temporal Distribution Models with Annual Maximum Rainfall Events in Seoul, Korea. *Water* 10 (10): 1468. DOI: [10.3390/w10101468](https://doi.org/10.3390/w10101468).
- National Instruments (udatert). *What Is LabVIEW?* URL: <https://www.ni.com/en-no/shop/labview.html>.
- Nesse, N. (2018). *Magnetventil*. URL: https://snl.no/magnetventil?fbclid=IwAR36qM6Co0xPnwL-dLqeMOMv9Pww5fDFqBKZ5CAIKN54MbFlvelbJQ5jP_Q.
- Nielsen, K. T., Moldrup, P., Thorndahl, S., Nielsen, J. E., Duus, L. B., Rasmussen, S. H., Uggerby, M. og Rasmussen, M. R. (des. 2019a). Automated rainfall simulator for variable rainfall on urban green areas. *Hydrological Processes* 33 (26): 3364–3377. DOI: [10.1002/hyp.13563](https://doi.org/10.1002/hyp.13563).
- Nielsen, K. T., Moldrup, P., Thorndahl, S., Nielsen, J. E., Uggerby, M. og Rasmussen, M. R. (aug. 2019b). Field-Scale Monitoring of Urban Green Area Rainfall-Runoff Processes. *Journal of Hydrologic Engineering* 24 (8): 04019022. DOI: [10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001795](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001795).
- Niemczynowicz, J. (1999). Urban hydrology and water management - present and future challenges. *Urban Water*. DOI: [10.1016/s1462-0758\(99\)00009-6](https://doi.org/10.1016/s1462-0758(99)00009-6).
- NKSS (2015). *Klima i Norge 2100: Kunnskapsgrunnlag for klimatilpasning oppdatert i 2015*. Tekn. rapp.: 204 s.
- NKSS (udatert). *Norsk Klimaservicesenter*. URL: <https://klimaservicesenter.no/faces/desktop/idf.xhtml>.

- Nordheim, L.-G. (2019). *Utvikling av en kost-nyttmodell basert på urban flommodellering og FKB-data*. Masteroppgave. Ås: Norges miljø- og biovitenskapelige universitet. URL: <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/handle/11250/2606004>.
- NOU (2015). *Overvann i byer og tettsteder - Som problem og ressurs*. Tekn. rapp. Norges offentlige utredninger. URL: <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/nou-2015-16/id2465332/>.
- Pappas, E., Smith, D., Huang, C., Shuster, W. og Bonta, J. (jan. 2008). Impervious surface impacts to runoff and sediment discharge under laboratory rainfall simulation. *CATENA* 72 (1): 146–152. DOI: [10.1016/j.catena.2007.05.001](https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.05.001).
- Paus, K. H., Førland, E. J., Fleig, A., Lindholm, O. og Åstebøl, S. O. (2014). *Metoder for beregning av klimafaktorer for fremtidig nedbørintensitet*. Tekn. rapp. Miljødirektoratet: 8. URL: <https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/M292/M292.pdf>.
- Ponce, V. M. (2014). *Engineering hydrology, principles and practices*. 2. utg.
- Ritter, M. E. (2006). *The Physical Environment: an Introduction to Physical Geography*. URL: https://www.earthonlinemedia.com/ebooks/tpe_3e/title_page.html.
- Rossman, L. A. (2015). Storm Water Management Model User's manual 5.1. *EPA/600/R-14/413b, National Risk Management Laboratory Office of Research and Development. United States Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio*. (September): 352. URL: <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P100N3J6.TXT>.
- SNL (2019). *Trykk - Fysikk*. URL: https://snl.no/trykk_-_fysikk.
- Stewart, M. (2019). Special purpose pumps. I: *Surface Production Operations*. Elsevier: 441–455. DOI: [10.1016/B978-0-12-809895-0.00006-5](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809895-0.00006-5).
- Tipler, P. A. og Mosca, G. (2008). *Physics For Scientist and Engineers*. New York: Sasan Finnemore Brennan: 423–424.
- VA Miljø Blad (2018a). Nivåmåling/trykkmåling. 55. URL: <http://www.va-blad.no/nivamalingtrykkmaling/>.
- VA Miljø Blad (2018b). *Utgitte blader: VA-Miljø*. URL: <http://www.va-blad.no/utgitte-blader/>.
- VA Miljø Blad (2018c). Vannføringsmåling i fylte rør. 53. URL: <http://www.va-blad.no/vannforingsmaling-i-fylte-ror/>.
- VA Miljø Blad (2018d). Vannføringsmåling i åpne renner/delfylte rør. 54. URL: <http://www.va-blad.no/vannforingsmaling-i-apne-renner-delfylte-ror/>.
- Verder (udatert). *How do peristaltic pumps work?* URL: <https://www.verderliquids.com/ch/fr/how-do-peristaltic-pumps-work/>.
- Watson-Marlow (2018). 600 series Watson-Marlow Pumps. 16: 125–130.
- White, F. M. (2016). *Fluid Mechanics*. 8. utg. New York: McGraw-Hill Education.
- Ødegaard, H. (2014). *Vann- og avløpsteknikk*. 2. utg. Norsk Vann.

Vedlegg A. Energitap i tilførselsrør

Tabell A.1: Tap pr. lengdeenhet i tilførselsrør.

Rørdiameter [cm]	Vannføring [ml/s]	Tap pr. lengdeenhet [-]	Tap på under 1 promille [-]
2	200	0,0382	Nei
3	200	0,0050	Nei
4	200	0,0012	Nei
5	200	0,0004	Ja
6	200	0,0002	Ja

Vedlegg B. Energitap i fordelingsrør

Tabell B.1: Energitap gjennom hull med dimensjon 0,6 mm i fordelingsrør ved ulike trykk.

Hulldimensjon 0,6 mm				
Trykk [cmVS]	Q, gjennomsnitt [m ³ /s]	Areal [m ²]	Hastighetshøyde [m]	Vannføringskoeffisient, C _d [-]
3	0,0324	0,283	0,767	0,1493
5	0,0428	0,283	0,990	0,1528
10	0,0997	0,283	1,400	0,2517

Tabell B.2: Energitap gjennom kanyler i fordelingsrør med indre diameter 0,5 mm i fordelingsrør ved ulike trykk.

Kanylediameter 0,5 mm				
Trykk [cmVS]	Q, gjennomsnitt [m ³ /s]	Areal [m ²]	Hastighetshøyde [m]	Vannføringskoeffisient, C _d [-]
1	0,0000000152	0,000000196	0,443	0,1746
6	0,0000000265	0,000000196	1,085	0,1245
21	0,0000000733	0,000000196	2,023	0,1838
189	0,0000003640	0,000000196	6,089	0,3047

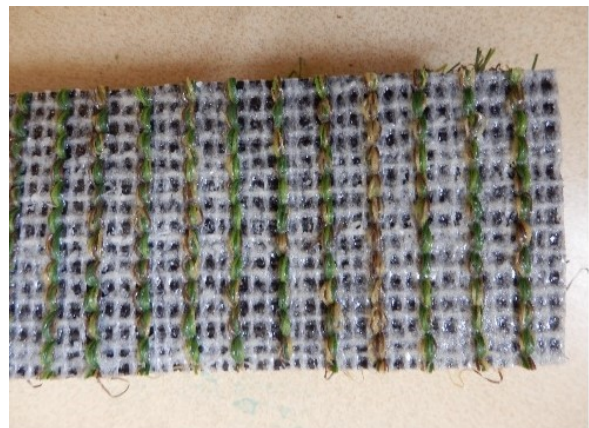
Tabell B.3: Energitap gjennom kanyler i fordelingsrør med indre diameter 0,8 mm i fordelingsrør ved ulike trykk.

Kanylediameter 0,8 mm				
Trykk [cmVS]	Q, gjennomsnitt [m ³ /s]	Areal [m ²]	Hastighetshøyde [m]	Vannføringskoeffisient, C _d [-]
1	0,0000000940	0,000000503	0,443	0,4223
5	0,0000001671	0,000000503	0,990	0,3357
10	0,0000002310	0,000000503	1,400	0,3281
15	0,0000003107	0,000000503	1,716	0,3603
20	0,0000003678	0,000000503	1,980	0,3694
189	0,0000012078	0,000000503	6,089	0,3946

Vedlegg C. Bilder av simulatoren

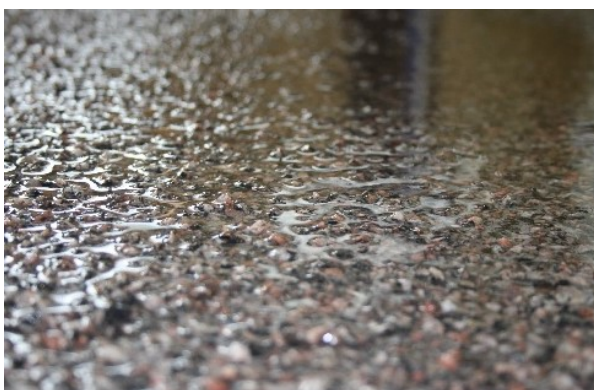


(a) Tverrsnitt av gressoverflaten.



(b) Undersiden av gressoverflaten.

Figur C.1: Detaljbilder av gressoverflaten.



(a) Nærbilde av våt grusoverflate.



(b) Nærbilde av tørr grusoverflate.

Figur C.2: Detaljbilder av grusoverflaten.



(a) Gressoverflate som nedbørfelt.



(b) Ståloverflate som nedbørfelt.

Figur C.3: Gress- og ståloverflate som nedbørfelt.

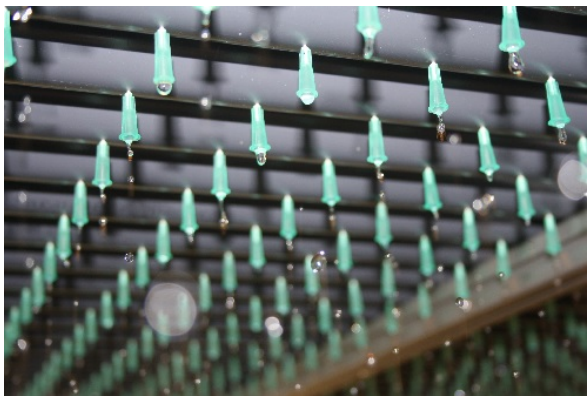


(a) Grusoverflate som nedbørfelt.



(b) Nedbør på grusoverflaten.

Figur C.4: Grusoverflate som nedbørfelt, med og uten nedbør.



(a) Dråper fra kanylene.



(b) Avrenning fra nedbørfeltet.

Figur C.5: Detaljbilder av nedbør og avrenning.



(a) Inntak og tilførselsrør.



(b) Rør inn til manifold.

Figur C.6: Rør fra pumpa og opp til fordelingssystemet.



(a) Innstillinger for ulike helninger.



(b) Oppsamlingskar og vekt.

Figur C.7: Detaljbilder av simulatoren.



Figur C.8: Fordelingssystemet sett ovenifra.



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway