



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2020 30 stp
Fakultet for realfag og teknologi

Fordrøyning av takvann – vurdering av miniregnbed som lokal overvannshåndtering

Roof water attenuation – assessment of miniature
raingardens as a local stormwater management
option

Johanne Grøndahl Klausen
Vann- og miljøteknikk

*Det beste du kan gjøre når det regner,
er å la det regne.*

Henry W. Longfellow (1807 – 1882)

Forord

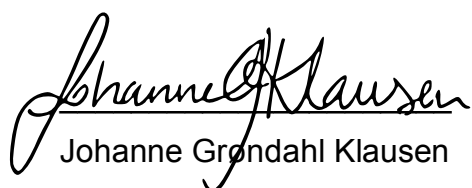
Avslutningen av min femårige masterutdanning i Vann- og miljøteknikk ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet markeres ved avlevering av denne masteroppgaven. Gjennom denne oppgaven har jeg fått fordype meg i mitt interessefelt; bedre håndtering av overvann som bidrag til et grønnere bybilde.

I oppgaven undersøker og optimaliserer jeg *miniregnbed* som et nytt system for lokal håndtering av nedbør fra tak. En viktig inspirasjon i arbeidet har vært å se hvordan overvann kan redefineres fra problem til ressurs. Arbeidet er gjort i samarbeid med Vann- og avløpsetaten i Oslo kommune (VAV) og Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE).

Tusen takk til min hovedveileder Vegard Nilsen for gode, pedagogiske råd og den beste støtte og oppfølging underveis. Dette har vært av stor betydning for både oppgaven og for min egen selvtillit som fagperson. Fra VAV vil jeg takke veileder Bent C. Braskerud for idé til oppgave og inspirerende veiledning. Fra NVE vil jeg takke veileder Anne K. Fleig for et målrettet perspektiv og for realistiske og tydeliggjørende råd. Takk til Knut Møen for hjelp til å rigge og forstå miniregnbedet gjennom de hydrauliske forsøkene. Takk til Graeme Whittington for god hjelp til gjennomføring av forsøk. Fra NIVA vil jeg takke Line Johanne Barkved og Isabel Seifert-Dähnn for lån av vannføringssplitter.

Til slutt vil jeg takke min kjære familie, Steinar, Elisabet og Kasper, og Kristian. Tusen takk for at dere alltid har trua.

Oslo, mai 2020


Johanne Grøndahl Klausen

Sammendrag

Klimaendringer fører til mer ekstremvær som tørke og ekstremnedbør. I naturen infiltreres nedbør gjennom jordoverflaten og ledes til grunnvann, elver og bekker. I urbane områder er den naturlige jordoverflaten dekket av tette flater som hustak og gater som forhindrer nedbøren fra å sive ned i bakken. Dette forstyrrer den naturlige vannbalansen. Kombinasjonen av klimaendringer og fortetting i byer fører til at mer nedbør faller på en større andel tette overflater og ved store nedbørhendelser kan kommunens avløpsnett fylles opp av overvann. Dersom nettets kapasitet overskrides, kan kloakkvann slippes urensset ut i naturen.

De tradisjonelle løsningene for overvannshåndtering går gjerne ut på å lede vannet inn i rør under overflaten. Som grønnere alternativ til den konvensjonelle metoden, er det utviklet løsninger som håndterer overvann åpent og lokalt der nedbøren faller, og som bidrar til et grønnere bybilde. Denne masteroppgaven tar for seg et nytt system for lokal håndtering av nedbør fra tak, kalt *miniregnbed*. Systemet har som hensikt å holde tilbake takvann ved små og store nedbørhendelser. Målet med oppgaven er å undersøke miniregnbedets fordrøyningsvirkning, foreslå forbedringer og utarbeide et tabellverk for bruk i praksis.

Miniregnbedet er undersøkt ved å gjennomføre forsøk i laboratorium og ved å bygge en modell av systemet i modelleringsprogrammet Storm Water Management Model (SWMM). Det er kjørt simuleringer av utvalgte nedbørhendelser i modellen for å undersøke systemets fordrøyningsvirkning. Miniregnbedets design og dimensjoner er til slutt optimalisert med den hensikt å redusere avrenning fra tak ytterligere.

Resultatene fra simuleringer i SWMM viser at miniregnbedet håndterer ulike regnhendelser svært forskjellig. Miniregnbedet har størst fordrøyningsvirkning ved korte og intense nedbørepisoder, der maksimalavrenningen fra taket reduseres og dempes opptil 87 prosent. Ved lengre og mindre intense nedbørhendelser er reduksjonen av maksimalavrenning betydelig lavere, med laveste reduksjon av spissavrenning helt ned mot 0,8 prosent. Miniregnbedet har i disse tilfellene fortsatt

en dempende virkning på et stort volum takvann, med effektivt fordrøyningsvolum opptil 2,9 ganger så stort som miniregnbedets tilgjengelige volum for fordrøyning.

Utviklingen av nye systemer for håndtering av overvann er viktig for å møte behovene til en voksende by. Det er ikke alle løsninger som egner seg for installasjon i eksisterende bebyggelse og i slike tilfeller kan miniregnbed være et særlig nyttig tiltak. Oslo kommune har definert et behov for fordrøyning av overvann i utbygde områder i sin *Handlingsplan for overvannshåndtering*. Miniregnbed kan plasseres på overflaten og systemets ytre dimensjoner kan tilpasses lokale behov. Det kan altså dimensjoneres slik at det passer inn i utbygde områder, som på et fortau, langs en vei eller i en bakgård.

Dersom miniregnbed benyttes i lokal overvannshåndtering, vil det bidra til å redusere mengden overvann i avløpssystemet. Dette kan frigjøre kapasitet og redusere mengden urensset kloakk som slippes ut i naturen ved store nedbørhendelser. Dette er i tråd med FNs bærekraftmål 6.3 som sikter mot å halvere utslipp av urensset avløpsvann innen 2030.

Summary

Climate change leads to more extreme weather. Droughts and extreme rainfall will become increasingly common. In nature, rainfall infiltrates the surface of the soil and makes its way to groundwater, rivers and streams. In urban areas, much of the natural soil surface is covered. Dense surfaces such as roofs and streets prevent rainfall from seeping into the ground. This disturbs the natural water balance. The combination of climate change and urbanization leads to more rain falling on a larger proportion of impervious surfaces. In the event of large rainfalls, sewer systems can be replenished by stormwater. If the capacity of the sewer system is exceeded, untreated sewage can end up being discharged into nature.

Traditional solutions for stormwater management tend to divert water from the surface into pipes below the ground. Greener alternatives to the conventional method have been developed. They are designed to manage stormwater locally and out in the open. Putting them into use will both reduce the stress on the stormwater systems and create a greener cityscape. This master thesis describes a new system for local management of rainfall from roofs, called *miniature raingarden*. The system aims to first withhold roof water from small and large rainfall events, before gradually releasing it at a much slower rate. This thesis seeks to investigate the attenuation effect of the miniature raingarden, propose improvements, and create a table for sizing and use in practice.

The miniature raingarden has been examined by conducting experiments in a hydraulic laboratory combined with building a model of the system in the modeling program Storm Water Management Model (SWMM). Simulations of selected rainfall events have been run in the model to investigate the attenuation effect of the system. Thereafter, the design and dimensions of the miniature raingarden has been optimized with the intention of further reducing runoff from roofs.

The results show that the miniature raingarden handles various rainfall events differently. The greatest attenuation effect is for short and intense events, which presented a maximum reduction of peak runoff of up to 87 percent. For longer and

less intensive events, the reduction rate is considerably lower, with the lowest reduction down to 0,8 percent. In these cases, the miniature raingarden still has an attenuation effect on a large volume of roof water, with effective attenuation volume up to 2,9 times the volume of the miniature raingarden.

Developing new stormwater management systems is essential for growing cities. Continued population growth combined with more extreme rainfall will cause further strain on already struggling wastewater systems. Not all solutions are suitable for installation in densely built urban areas. In such cases, miniature raingardens can be a particularly useful measure. Oslo municipality's Plan of Action for Stormwater Management has defined a need for attenuation of stormwater in already developed areas. Miniature raingardens can be placed on the surface relatively easy and comparatively cheaper to other solutions. The system's external dimensions can be adapted to local needs. It can be dimensioned to fit into urban areas, such as on a sidewalk or along a road.

If miniature raingardens are used in local stormwater management, it will reduce the amount of stormwater in the sewage systems during rainfall events. This can free up capacity and reduce the amount of untreated wastewater that is released into nature during rainfall events. This is in line with the UN Sustainability Goal 6.3, which aims to cut the emissions of untreated wastewater in half by 2030.

Innholdsfortegnelse

Forord	I
Sammendrag	II
Summary	IV
Innholdsfortegnelse	VI
Figuroversikt	IX
Tabelloversikt	X
Forkortelser	XI
Symboler	XII
1 Introduksjon.....	1
1.1 Målbeskrivelse	2
1.2 Klimaendringer og urbanisering	2
1.3 Ledningsnett for vann og avløp	4
1.3.1 Ledningsnettets oppbygning	4
1.3.2 Tradisjonell overvannshåndtering	5
1.4 Frakobling av taknedløp	5
1.4.1 Miljøprosjekt Tåsen som eksempel.....	6
1.4.2 Ikke et representativt utvalg	6
1.4.3 Håndtering av takvann på overflaten	7
1.5 Lokal overvannsdiskonering og tretrinnsstrategien	7
1.5.1 Regnbed	9
1.5.2 Grønt tak.....	9
1.5.3 Regntønne.....	10
1.6 Miniregnbed som alternativt tiltak for lokal overvannshåndtering	11
1.6.1 Miniregnbedets oppbygning	11
1.6.2 Vannføringssplitter	15
1.7 Storm Water Management Model	16
1.7.1 Hydrologisk routing.....	17
1.7.2 Vannføring gjennom blende	19
1.8 V_E – effektivt fordrøyningsvolum	20
2 Metode	22
2.1 Modellering i SWMM	22
2.1.1 Modellering av fordrøyningskamre.....	23
2.1.2 Modellering av blomsterkasse	25
2.1.3 Kinematisk eller dynamisk bølge	27
2.1.4 Minimum Nodal Surface Area	28
2.2 Hydrauliske tester i fordrøyningskamre	29
2.2.1 Fremgangsmåte	29

2.2.2 Feilkilder	31
2.3 Kalibrering av utløpskoeffisient	31
2.3.1 Antagelser og forenklinger	31
2.3.2 Fremgangsmåte for kalibrering	32
2.3.3 Feilkilder	34
2.4 Infiltrasjonstester i blomsterkasse	34
2.4.1 Fremgangsmåte infiltrasjonstester	35
2.5 Vannføringstest med vannføringsplitter	37
2.5.1 Fremgangsmåte	38
2.5.2 Feilkilder	39
2.6 Manuell modellering av vannføringsplitter	39
2.6.1 Fremgangsmåte	40
2.6.2 Trekantregn	40
2.7 Simulering av nedbørhendelser	42
2.7.1 Valg av nedbørhendelser	42
2.7.2 Forenklinger og antagelser	43
2.8 Optimalisering.....	44
2.8.1 Hva er god nok fordrøyningssevne?	44
2.8.2 Fremgangsmåte for optimalisering	44
3 Resultater.....	46
3.1 Kalibrerte utløpskoeffisienter.....	46
3.2 Infiltrasjonsevne i blomsterkasse	48
3.3 Terskelverdi i vannføringsplitter	49
3.4 Modellens håndtering av simulerte nedbørhendelser	50
3.4.1 Korte nedbørhendelser	50
3.4.2 Nedbørhendelser med middels varighet.....	52
3.4.3 Lengre nedbørhendelser.....	53
3.4.4 Samlet oversikt for alle simuleringer	54
3.5 Optimalisert modell.....	58
4 Diskusjon	62
4.1 Modellering	62
4.1.1 Valg av programvare	62
4.1.2 Modellforenklinger	63
4.1.3 Utløpskoeffisient.....	66
4.2 Feilkilder fra forsøk	69
4.2.1 Følsomhetsanalyse	70
4.3 Infiltrasjonstester i blomsterkasse	74
4.4 Vurdering av miniregnbedets fordrøyningsvirkning	75
4.5 Optimalisering.....	78

4.5.1 Form	79
4.5.2 Utseende	79
5 Konklusjon	80
Referanser	82
Vedlegg 1	i
Vedlegg 2	iii
Vedlegg 3	iv
Vedlegg 4	viii

Figuroversikt

Figur 1.1: Tretrinnsstrategien for overvannshåndtering	8
Figur 1.2: Oppbygningen av et regnbed.	9
Figur 1.3: Oppbygning av grønne tak.....	10
Figur 1.4: Illustrasjon av regntønne.....	11
Figur 1.5: Miniregnbed ved Sogn hagekoloni	12
Figur 1.6: Illustrasjon av blomsterkasse.....	13
Figur 1.7: Illustrasjon av fordrøyningskamre sett ovenfra	14
Figur 1.8: Illustrasjon av fordrøyningskamrene sett fra siden	14
Figur 1.9: Illustrasjon av indre kammervegger.....	15
Figur 1.10: Vannføringssplitter Regendieb Pro.....	16
Figur 1.11: Parametere i hydrologisk routing	17
Figur 1.12: Vanddybde Z som en funksjon av $2S\Delta t + 0$	18
Figur 1.13: Utløpskoeffisienter.....	20
Figur 2.1: Kammervegg før og etter forenkling	23
Figur 2.2: Skjermdump av fordrøyningskamre i SWMM.....	24
Figur 2.3: Blende mellom fordrøyningskamre	25
Figur 2.4: Skjermdump av bioretensjonscelle	26
Figur 2.5: Skjermdump av fordrøyningskamre og blomsterkasse i SWMM.....	27
Figur 2.6: Skjermdump av Minimum Nodal Surface Area	28
Figur 2.7: Utstyrsoppsett i fordrøyningskamre	30
Figur 2.8: Forenklet fordrøyningskammer sett ovenfra.....	31
Figur 2.9: Vannføringskurve før kalibrering.....	32
Figur 2.10: Forenklet kammervegg	33
Figur 2.11: Blomsterkassens plassering i miniregnbedet.....	35
Figur 2.12: Forsøk i blomsterkasse	36
Figur 2.13: Vannføringssplitter med dimensjoner	37
Figur 2.14: Forsøk med vannføringssplitter	38
Figur 2.15: Eksempler på strømningsregimer.....	39
Figur 2.16: Utforming av trekantregn	41
Figur 3.1: Resultater fra Forsøk 2	46
Figur 3.2: Resultat av kalibrering.....	47
Figur 3.3: Infiltrasjonshastighet i blomsterkasse.....	49
Figur 3.4: Innløps- og utløpshydrogram (gjentaksintervall 2 år, varighet 2 min)	51
Figur 3.5: Innløps- og utløpshydrogram (gjentaksintervall 20 år, varighet 2 min)	51
Figur 3.6: Innløps- og utløpshydrogram (gjentaksintervall 2 år, varighet 20 min)	52
Figur 3.7: Innløps- og utløpshydrogram (gjentaksintervall 5 år, varighet 15 min)	52
Figur 3.8: Innløps- og utløpshydrogram (gjentaksintervall 10 år, varighet 45 min)	53
Figur 3.9: Innløps- og utløpshydrogram (gjentaksintervall 20 år, varighet 45 min)	54
Figur 3.10: Forhold mellom $t_{p,avrenning}$ og $t_{p,nedbør}$	56
Figur 3.11: Forhold mellom $Q_{maks,avrenning}$ og $Q_{maks,nedbør}$	57
Figur 3.12: Forhold mellom V_E og $V_{nedbør}$	58
Figur 4.1: Endelig modell før forenklinger.....	63
Figur 4.2: Endelig modell etter forenklinger	64
Figur 4.3: Utløpshydrogram før og etter forenkling av blender	65

Figur 4.4: Utløpshydrogram før og etter forenkling av kamre.....	66
Figur 4.5: Utløpshydrogram før og etter kalibrering (1).....	67
Figur 4.6: Utløpshydrogram før og etter kalibrering (2).....	67
Figur 4.7: Utløpshydrogram før og etter kalibrering (3).....	68
Figur 4.8: Utløpshydrogram før og etter kalibrering (4).....	68
Figur 4.9: Utløpshydrogram ved variasjon av utløpskoeffisient (1).....	70
Figur 4.10: Prosentvis endring ved variasjon av utløpskoeffisient (1).....	71
Figur 4.11: Utløpshydrogram ved variasjon av utløpskoeffisient (2).....	71
Figur 4.12: Prosentvis endring ved variasjon av utløpskoeffisient (2).....	72
Figur 4.13: Utløpshydrogram ved variasjon av utløpskoeffisient (3).....	73
Figur 4.14: Prosentvis endring ved variasjon av utløpskoeffisient (3).....	73
Figur V.1: Resultater fra Forsøk 1	ii
Figur V.2: Resultater fra infiltrasjonstester.....	iii
Figur V.3: Hullmønster A og F	iv
Figur V.4: Hullmønster B, C, G og H.....	v
Figur V.5: Hullmønster D, E, I og J.....	v
Figur V.6: Utløp og overløp	vi
Figur V.7: Fordrøyningskamre sett ovenfra med dimensjoner	vi
Figur V.8: Fordrøyningskamre sett fra siden med dimensjoner	vii
Figur V.9: IVF-kurve fra Blindern målestasjon	viii

Tabelloversikt

Tabell 2.1: Jordegenskaper	27
Tabell 2.2: Jordegenskaper for Oslokompost	35
Tabell 2.3: Utvalgte nedbørhendelser	42
Tabell 2.4: Maksimalt tillatt påslipp.....	45
Tabell 3.1: Kalibrerte utløpskoeffisienter.....	48
Tabell 3.2: Resultater fra tester med vannføringssplitter.....	49
Tabell 3.3: Resultater fra simuleringer av nedbørhendelser	55
Tabell 3.4: Forslag til dimensjonering (1).....	60
Tabell 3.5: Forslag til dimensjonering (2).....	61

Forkortelser

BK – blomsterkasse (nedbørfelt)

DSB – Direktoratet for
samfunnssikkerhet og beredskap

EPA – United States Environmental
Protection Agency

FN – De forente nasjoner

H# – blende nr. #

IVF – Intensitet, varighet, frekvens

K# – kammer nr. #

LOD – Lokal overvannsdiskonering

NIB – Ned i bakken

NMBU – Norges miljø- og
biovitenskapelige universitet

NVE – Norges vassdrags- og
energidirektorat

Oslo VAV – Vann og avløpsetaten i
Oslo kommune

RG – regnmåler

SSB – Statistisk sentralbyrå

SWMM – Storm Water Management
Model

UT – utløpsnode

Symboler

A – strømningsareal, [L ²]	Q_{kammer} – vannføring ut av vannføringsplitterens nedre utløp, [L ³ /T]
A_{forenklet} – areal av forenklet blende, [L ²]	Q_{maks,avrenning} – spissavrenning fra miniregnbedet, [L ³ /T]
A_K – kammerareal, [L ²]	Q_{maks,nedbør} – spissavrenning i nedbørhendelse, [L ³ /T]
A_{oppriinnelig} – areal av oppriinnelig blende, [L ²]	Q_{nedbør} – vannføring ut av taknedløp, [L ³ /T]
A_{tak} – takareal, [L ²]	Q_{snitt} – gjennomsnittlig vannføring, [L ³ /T]
C_d – utløpskoeffisient for blende, []	Q_{terskel} – terskelverdi i vannføringsplitter for åpning av nedre utløp, [L ³ /T]
C_{d,b} – utløpskoeffisient for avrundet blende, []	Q_{ut} – vannføring ut av kammer, [L ³ /T]
C_{d,s} – utløpskoeffisient for skarpkantet blende, []	S – lagringsvolum, [L ³]
C_{d,vektet} – vektet utløpskoeffisient, []	t – tid, [T]
D_{forenklet} – diameter i forenklet blende, [L]	t_p – tidspunkt for spissavrenning, [T]
D_{oppriinnelig} – diameter i oppriinnelig blende, [L]	t_{terskel} – tidspunkt for når terskelverdi nås i nedbørhendelse, [T]
d_b – diameter for halvsirkel, [L]	V₀ – volum som forlater systemet før Q _{avrenning} = Q _{nedbør} , [L ³]
d_s – omkrets for halvsirkel, [L]	V_E – effektivt fordrøyningsvolum, [L ³]
FC – feltkapasitetsfraksjon, []	V_f – tilført nedbørvolum etter Q _{avrenning} = Q _{nedbør} , [L ³]
g – tyngdeakselerasjon, [L/T ²]	V_{nedbør} – nedbørvolum, [L ³]
h – høyde, [L]	V_s – tilgjengelig volum for fordrøyning, [L ³]
I(t) – innløpshydrogram, [L ³ /T]	v – vannhastighet gjennom blende, [L/T]
K – mettet hydraulisk konduktivitet, [L/T]	WP – visnepunktfraksjon, []
O(t) – utløpshydrogram, [L ³ /T]	z – vannstand, [L]
Q – vannføring gjennom blende, [L ³ /T]	Ψ – sugehøyde, [L]
Q_{avrenning} – vannføring ut av miniregnbed, [L ³ /T]	Φ – porøsitetsfraksjon, []
Q_{blomst} – vannføring ut av vannføringsplitterens øvre utløp, [L ³ /T]	

1 Introduksjon

Overvann er vann fra nedbør og snøsmelting, som renner av på overflaten. I naturen blir nedbør infiltrert i grunnen og ledet til elver og bekker som en del av den naturlige vannbalansen. I urbane områder blir denne balansen forstyrret av at grunnen er dekket av ikke-permeable overflater. Det fører til at vann fra nedbør og snøsmelting renner av på overflaten som overvann (Hendriks, 2010).

Ved større nedbørhendelser blir overvannet et problem når de ikke-permeable overflatene som asfalt og hustak forhindrer infiltrasjon og fordrøyning i grunnen. Det kan forårsake oversvømmelser i gater og kjellere og kan medføre skader på infrastruktur og bebyggelse. Ved store nedbørhendelser kan kommunens avløpsnett fylles opp av overvann og føre til at kapasiteten overskrides. Det kan medføre utslipp av urensset kloakkvann til naturen (Ødegaard, 2014).

Den konvensjonelle metoden for håndtering av overvann går ut på å lede vannet bort fra overflaten gjennom rør under bakken. Metoden er kostbar og lite fleksibel dersom det oppstår behov for utvidelser i ettertid. Urbanisering og klimaendringer fører til økt avrenning i urbane områder, og dette kan kreve oppgradering av overvannssystemer i byer. En voksende trend i bransjen dreier seg derfor om å håndtere overvann lokalt gjennom en strategi kalt *lokal overvannsdiskonering* (LOD). Strategien går ut på å håndtere overvann som en ressurs og utvikle løsninger på overvannsproblematikk som utnytter vannet lokalt gjennom infiltrasjon og fordrøyning (Lindholm, et al., 2008).

Nye systemer for overvannshåndtering utvikles stadig og denne masteroppgaven tar for seg et nytt system kalt *miniregnbed*. Systemet er utviklet for håndtering av overvann fra tak gjennom infiltrasjon og fordrøyning. Avrenning fra tak kan være særlig problematisk dersom taknedløp er koblet på kommunens ledningsnett for avløp. Det vil føre til en reduksjon av ledningsnettets ledige kapasitet.

1.1 Målbeskrivelse

Oslo kommune har under tiltak 7 i sin *Handlingsplan for overvannshåndtering* definert et behov for sikring av lokal fordrøyning i utbygde områder (Oslo kommune, 2019). Kommunen gjennomfører undersøkelser av miniregnbed for å undersøke om dette er et system som kan møte kommunens behov og byens klima. Denne masteroppgaven skrives i samarbeid med Vann- og avløpsetaten i Oslo kommune (Oslo VAV) og Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) som en del av arbeidet med å undersøke konseptet miniregnbed.

Målbeskrivelsen for gradsoppgaven er todelt:

1. *Undersøke fordrøyningsvirkningen til et miniregnbed.*
2. *Foreslå forbedringer og utarbeide tabellverk for dimensjonering av miniregnbed som et tiltak for lokal håndtering av takvann.*

Avrenning fra tak i tettbygde områder kan være problematisk og dersom miniregnbed kan redusere mengden overvann i avløpssystemet, vil dette trolig redusere mengden urensset spillvann som slippes ut i naturen. Dette vil være i tråd med De forente nasjoners (FN) bærekraftsmål seks; rent vann og gode sanitærforhold, og bærekraftsmål elleve; bærekraftige byer og samfunn (De forente nasjoner, 2015). Særlig relevant er det for delmål 6.3 som sikter mot å halvere utslippene av urensset avløpsvann. Ved å håndtere og forsinke overvann fra tak lokalt, vil det redusere belastningen på avløpssystemer og bidra til at mindre urensset avløpsvann slippes ut.

1.2 Klimaendringer og urbanisering

De tradisjonelle løsningene for overvannshåndtering i Norge ble planlagt og anlagt i en tid som forutså andre nedbørscenarier for fremtiden. Dagens estimater for landets klima beskriver en fremtid med mer ekstremvær, høyere temperaturer og et stigende havnivå. Parallelt med klimaendringene opplever byer og tettsteder en ytterligere urbanisering (NOU 2015:16). Kombinasjonen av mer intense nedbørhendelser og flere tette overflater fører til at større nedbørsmengder ikke har mulighet til å infiltrere ned i grunnen, og dermed renner av på overflaten som overvann.

Klimaet er i endring og mengden klimagassutslipp avgjør i hvilken grad. Norsk klimaservicesenter anslår i sin rapport «Klima i Norge 2100» (Norsk klimaservicesenter, 2015) at antall dager med kraftig nedbør per år kan øke mellom 50 og 90 prosent innen slutten av dette århundret. Det fremgår av rapporten at middelnedbøren i Norge fra 1900 til 2015 allerede har økt omkring 18 prosent. Fra Norsk Vanns rapport «Veiledning i klimatilpasset overvannshåndtering» (Lindholm, et al., 2008) fremgår det at avrenning på overflaten kan øke opptil 60 prosent som følge av endringer i temperatur og atmosfærisk sirkulasjonsmønster over Norge, og at en økning på 40 prosent i regnintensitet kan gi en økning på 100 prosent i flomvolum (Lindholm, et al., 2008).

Flere og mer intense nedbørshendelser i løpet av et år fører til at løsmasser oftere er mettet med vann. Ved neste nedbørhendelse vil grunnen ha en redusert infiltrasjonskapasitet, og det vil raskere oppstå avrenning på overflaten. Høyere lufttemperaturer fører til at lufta blir i stand til å holde på et større vannvolum, og høyere luftfuktighet fører til at det oftere vil oppstå lokale, intense nedbørepisoder. Denne typen nedbør kalles *konvektiv nedbør* og slike nedbørhendelser inntreffer når bakken varmes opp og lokale, vertikale luftstrømmer oppstår. Fuktig luft føres opp med luftstrømmene til atmosfæren, før den kjøles ned og kondenserer til nedbør (Ødegaard, 2014).

Urbaniseringen og fortettingen av Norges byer ventes å fortsette i tiden fremover. Statistisk sentralbyrå (SSB) estimerer at Oslos befolkning kommer til å stige med 17 prosent innen 2040 (SSB, 2020). En studie utgitt av The American Meteorological Society har tatt for seg urbaniseringens virkning på større nedbørhendelser (Yang, et al., 2014). Resultatene viser at overflatetemperaturen i urbane områder kan være opptil fem grader høyere enn overflatetemperatur i nærliggende områder. Mørke, ikke-permeable overflater i byer absorberer varme, framfor å reflektere den, slik lysere overflater gjør. Dette skaper gunstige forhold for konvektiv nedbør (Yang, et al., 2014). I følge Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB) er det denne typen nedbør som forårsaker flest flomskader og som er mest utfordrende å forutse (DSB, 2016).

Avrenning vil altså øke ytterligere når effekten av klimaendringer kombineres med urbanisering. I naturen blir nedbør og smeltevann håndtert lokalt gjennom infiltrasjon og fordrøyning i naturlige forsenkninger. Når urbanisering fører til en økning i ikke-permeable overflater som hustak og veier, vil større mengder nedbør måtte håndteres som overvann. Det blir mindre infiltrasjon og fordamping, raskere avrenning, og overvann vil samles opp i gater, kjellere og i avløpsnett. Det er sannsynlig at overvannsproblematikken blir forverret ytterligere slik estimatene for klimaendringer og urbanisering ser ut i dag.

1.3 Ledningsnett for vann og avløp

1.3.1 Ledningsnettets oppbygning

Ledningsnett for vann og avløp håndterer tre typer vann: drikkevann, spillvann (avløpsvann) og overvann. Spillvann ledes til renseanlegg gjennom separatsystemet eller gjennom fellessystemet. Sistnevnte system får tilført overvann fra overflaten i tillegg til spillvannet. Overvann består gjerne av mindre konsentrerte forurensninger og trenger ikke nødvendigvis å renses. Ved store nedbørhendelser vil spillvannet fortynnes og tilføres anlegg i større mengder enn i tørrværsituasjoner. En rekke renseprosesser er ikke dimensjonert for å motta slike ujevne belastninger av fortynnet avløpsvann. Det vil kunne redusere spillvannets temperatur og alkalitet (Ødegaard, 2014).

Lave temperaturer kan føre til at prosesshastigheten i et anlegg blir redusert, mens redusert alkalitet kan føre til ukontrollerte fall i spillvannets pH-verdi gjennom de ulike renseprosessene. Tradisjonelle biologiske anlegg er ofte avhengige av kontinuerlig tilførsel av substrat. Sedimenteringsprosesser er avhengige av liten variasjon i belastningen av tilførte vannmengder, ettersom prosessens fellingseffekt påvirkes av avløpsvannets alkalitet og pH-verdi. Endringene av spillvannets karakteristikk gjennom utvanning medfører redusert effektivitet for renseprosesser, og det kan føre til dårligere vannkvalitet på det ferdige rensede vannet som slippes ut av renseanlegget (Ødegaard, 2014).

Store nedbørhendelser kan også føre til utslipp av urensset spillvann direkte til naturen. Ledningsnett for spillvann har en sikkerhetsmekanisme i form av overløp

som fører overflødige vannmengder ut av ledningsnettet ved overbelastning. Hensikten er å unngå at nettet gir tilbakeslag og fyller kjellere med spillvann (Ødegaard, 2014). Ved store nedbørhendelser kan dermed urensset spillvann ledes til naturen gjennom overløpene i fellessystemet. Dette kan føre til utslipp av helseskadelige mikroorganismer, medisinrester og tungmetaller, og det kan forurense natur og rekreasjonsområder.

1.3.2 Tradisjonell overvannshåndtering

Den tradisjonelle løsningen på overvannsproblematikk har gått ut på å lede overvann bort fra overflaten i rør under bakken. Det er kostbart å oppgradere og utvide eksisterende rørsystem for håndtering av større overvannsmengder, og dette er en utfordring både i Norge og internasjonalt. Særlig ugunstig er det for nærmiljøet der det medfører gravearbeid, støy og trafikkproblemer (Braskerud & Paus, 2020). Dersom det ikke settes i gang tiltak for å bedre overvannshåndteringen, vil det føre til en rekke negative konsekvenser. Urban flom kan føre til skade på veier, eiendommer, vann- og avløpssystemets ledninger, kummer, renseanlegg, forurensning av natur m.m. (Ødegaard, 2014).

I sum er det mange elementer som legger press på ledningsnettet for vann og avløp i Oslo og andre urbane områder nasjonalt og internasjonalt. Det vil være kostbart å ikke iverksette tiltak, men den tradisjonelle metoden for overvannshåndtering er også kostbar. Det er altså mange gode grunner til å finne alternative løsninger på overvannsproblematikken.

1.4 Frakobling av taknedløp

Overvann fra tak kan by på utfordringer for ledningsnettet. Taknedløp kan være direkte koblet på kommunens ledningsnett og dermed lede nærmest rent takvann til renseanlegg for avløp. Avrenning fra tak får gjerne høyere fart som følge av takets skråvinkel og den vertikale transporten gjennom nedløpet (Lindholt, et al., 2008). Takvannet vil dermed ledes raskt til ledningsnettet og oppta nettets kapasitet. Hensikten med å lede takvann til ledningsnettet fra huseiers side er å unngå kjelleroversvømmelse og oppsamling av vann på lokal tomt. Ved styrtregn kan

derimot nettopp dette skje dersom ledningsnettets kapasitet overskrides. Da vil takvann kunne bli stående langs husets drenering og lekke inn i kjelleren.

1.4.1 Miljøprosjekt Tåsen som eksempel

Oslos taknedløp er ikke kartlagt i sin helhet, dermed finnes det ingen fullstendige tall på hvor mange nedløp som er påkoblet kommunens ledningsnett. Mindre områder er kartlagt og kan benyttes som en indikasjon på andelen påkoblede taknedløp.

Gjennom et sommervikariat hos Oslo VAV i 2019 deltok jeg i et prosjekt der taknedløp i et boligområde ble kartlagt for å undersøke hvor mange nedløp som er direkte påkoblet kommunens ledningsnett. Kartleggingen ble gjort som en del av kommunens arbeid i *Miljøprosjekt Tåsen* (Kvitsjøen, 2019).

Hensikten med prosjektarbeidet var å undersøke om frakobling av taknedløp kan øke ledningsnettets kapasitet ved nedbørhendelser. Denne løsningen er en langt mindre kostbar metode for utvidelse av kapasitet, enn anleggelse av nye, større rør. Totalt ble 1380 taknedløp kartlagt fordelt på 310 adresser. Arbeidet ble gjennomført gjennom visuell inspeksjon der nedløp uten synlig utløp til lokalt terreng ble registrert som påkoblet kommunens ledningsnett. Det ble observert at 45 prosent av undersøkte nedløp føres ned i bakken (NIB), mens resterende andel ble observert å ha utløp til åpent terreng eller annen løsning som håndterer takvann lokalt på egen tomt.

1.4.2 Ikke et representativt utvalg

Den høye andelen NIB tyder på at frakobling av taknedløp kan frigjøre en betydelig kapasitet i kommunens ledningsnett i disse områdene, men de utgjør ikke et representativt utvalg for Oslos bebyggelse. Det kan altså ikke antas at den samme andelen NIB er gjeldende for resten av byen. Prosjektområdet består hovedsakelig av eneboliger med hager, få industri- eller kontorbygg og lite asfalt. Et datagrunnlag som skal kunne fortelle om Oslos bebyggelse utover det testede området, bør bestå av et langt større datasett som er tilfeldig utvalgt og med større geografisk spredning (Løvås, 2013). I tillegg knyttes det usikkerhet til kartleggingsmetoden. At nedløp ledes under overflaten er ikke ensbetydende med at det er koblet på kommunens

ledningsnett. Nedløp kan likevel ledes til lokalt terreng eller annen lokal løsning for håndtering av takvann, uten at det er synlig i terrenget.

Dataene presenteres i denne oppgaven for å gi en pekepinn om andelen taknedløp som er påkoblet kommunens ledningsnett i Oslo. Hensikten er å vise at det er sannsynlig at det befinner seg store mengder takvann i ledningsnettet, noe som kan føre til utilstrekkelig kapasitet ved nedbørhendelser. Mangel på kapasitet kan forårsake overløpshendelser der forurensninger slippes urensset ut i naturen (Ødegaard, 2014). I stor skala vil frakobling av taknedløp kunne bidra til at spillvann som føres til renseanlegg er mer konsentrert, at belastningen er jevnere og at vannmengdene er mindre og mer håndterbare for anleggene. På den måten blir renseeffekten til renseanleggene bedre og det blir færre overløpshendelser.

1.4.3 Håndtering av takvann på overflaten

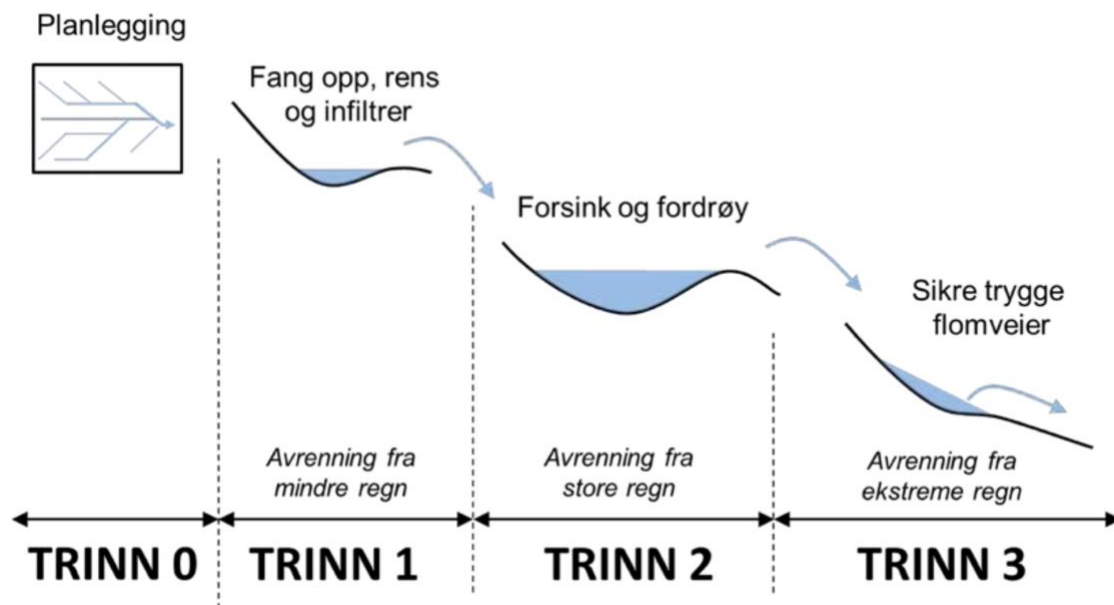
Frakobling av taknedløp vil kunne ha en positiv effekt på kapasiteten til kommunens ledningsnett og det kan være et viktig tiltak i overvannshåndtering i urbane områder og tettsteder. Ved å koble fra taknedløp vil takvann kunne håndteres på overflaten gjennom infiltrasjon i hageplen eller andre lokale overvannssystemer. Oslo kommune har sett at plenareal tilsvarende 25 prosent av aktuelt takareal vil kunne håndtere de fleste nedbørhendelser (Becker, Muthanna, & Braskerud, 2016).

Det er ikke alle bygg som har tilgjengelig grøntområde for infiltrasjon av takvann. I et typisk bymiljø vil taknedløp lede takvann ut mot gater, fortau og bakgårder, som senere ledes videre til ledningsnettet gjennom rister og sluk. Overvann på overflaten i urbane områder kan forårsake erosjon, is på fortau eller skader på bygg og infrastruktur. Det kan være til hinder for utrykningskjøretøy og vann som får høy fart i bybildet kan være til fare for fotgjengere (Ødegaard, 2014). I urbane områder uten tilgjengelig grøntområde kan det derfor være nødvendig å installere et LOD-tiltak for å håndtere overvann fra tak.

1.5 Lokal overvannsdiskonering og tretrinnsstrategien

LOD-tiltak er metoder for håndtering av overvann lokalt der nedbøren faller. Tiltakene baseres på prinsipper om infiltrasjon, fordrøyning og sikring av trygge flomveier,

samlet i en strategi kalt tretrinnsstrategien. Dette er et alternativ til den konvensjonelle metoden hvor overvann ledes bort i lukkede rør under overflaten (Lindholm, et al., 2008). Tretrinnsstrategien består av ulike trinn som har til hensikt å håndtere små, store og ekstreme nedbørshendelser gjennom åpne løsninger. Strategien er illustrert Figur 1.1.



Figur 1.1: Illustrasjon av tretrinnsstrategien for overvannshåndtering (Paus, 2018)

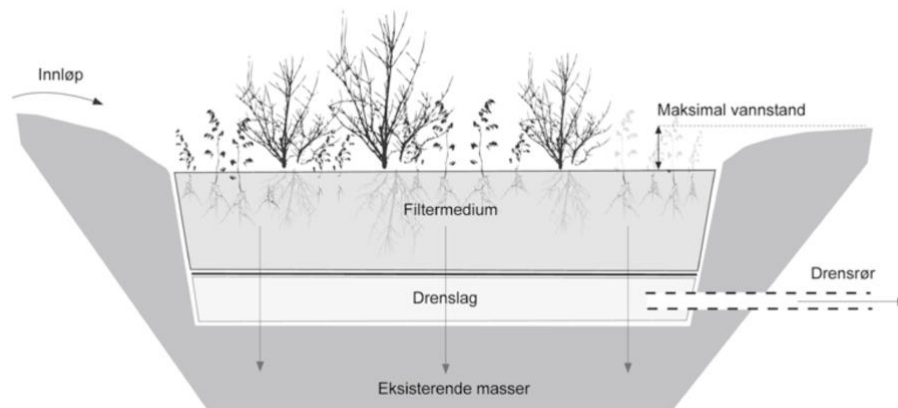
Hensikten med trinn 1 i tretrinnsstrategien er å sikre at de minste regnhendelsene fanges opp, renses og infiltreres i grunnen eller annen vegetasjon. I trinn 2 skal de større regnhendelsene forsinkes og fordrøyes før et eventuelt påslipp til avløpsanlegg eller utslipp til vassdrag. Siste trinn i strategien skal sikre trygge flomveier for de mest ekstreme nedbørhendelsene. De senere år er det blitt mer vanlig å legge til nulltrinnet i strategien. Nulltrinnet har som hensikt å sikre at overvannshåndtering inkluderes og tilrettelegges for i byplanlegging, slik at de påfølgende trinn skal være enklere å gjennomføre (Paus, 2018).

Til forskjell fra den konvensjonelle metoden for overvannshåndtering, håndteres overvann åpent i bybildet ved bruk av LOD-tiltak. De vil fremstå som et estetisk positivt element i bybildet og det medfører lavere kostnader enn ved bruk av den tradisjonelle metoden (Braskerud & Paus, 2020). Ved å erstatte mørke, ikke-permeable overflater med LOD-tiltak, kan man bidra til lavere temperaturer i byene

og gjenoppretting av en mer naturlig vannbalanse. Tiltakene kan benyttes til rekreasjonsformål og det vil styrke biologisk mangfold (Ødegaard, 2014). Eksempler på LOD-tiltak som er særlig aktuelle for bruk til håndtering av takvann i urbane områder er regnbed, grønne tak og regntønner.

1.5.1 Regnbed

Regnbed er terrengtilpassede bed anlagt med planter som er beregnet på å tåle både tørke og store nedbørsmengder for en kort periode. Det har til hensikt å infiltrere, forsinke og forbruke overvann. Bunnen av et regnbed består av et filtermedium i en sammensetning av jord, sand og kompost. Ved nedbørhendelser vil overvann infiltrere gjennom filtermediet og deretter ledes videre til infiltrasjon i grunnen eller ledes bort i drenerør som fører vann videre til overvannssystem, illustrert i Figur 1.2. Bruken av miniregnbed er særlig utbredt i byer i Australia, Canada og USA (Braskerud & Paus, 2013).



Figur 1.2: Illustrasjon som viser oppbygningen av et regnbed, laget av Erle Stenberg (Braskerud, Paus, & Ekle, 2013).

1.5.2 Grønt tak

Grønne tak er et vegetasjonsdekke som kan installeres på flate tak eller tak med svak helning. De er bygd opp av ulike lag, vist i Figur 1.3, som sammen har som funksjon å holde på og forbruke overvann. Det finnes tre ulike typer grønne tak: ekstensive, intensive og semi-intensive tak. De ekstensive takene består av enkel vegetasjon og krever lite vedlikehold. De intensive takene består av tykkere vekstmasser som det kan være nødvendig å vanne i perioder uten nedbør, dermed krever denne typen vegetasjonsdekke mer vedlikehold. Semi-intensive grønne tak

har noe enklere vegetasjon enn de intensive takene og krever mindre vedlikehold (Miljødirektoratet & NIBIO, 2017).

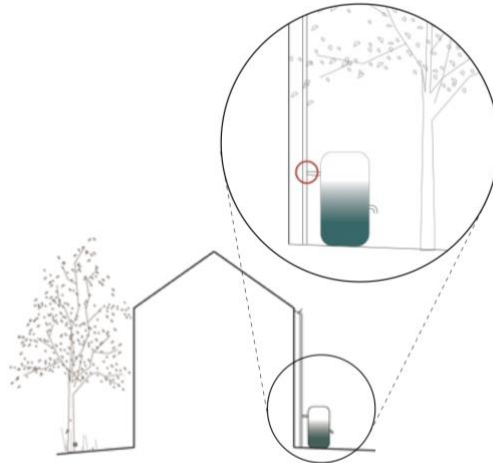


Figur 1.3: Illustrasjon som viser lagvis oppbygning av et grønt tak (Bergknapp, 2020).

Ved installering av grønne tak vil en ikke-permeabel overflate som tidligere bidro til avrenning, gjøres om til en grønn overflate, designet med den hensikt å bidra til flomdemping. Ved bruk av grønne tak vil avrenningsvolum og spissavrenning fra taket reduseres. Vegetasjonen kan også bidra til å kjøle ned byggets temperatur i sommermånedene og holde på noe varme i vintermånedene. Dette er særlig relevant i land som har tradisjon for mindre isolasjon enn byggeskikken har i Norge (Noreng, et al., 2012).

1.5.3 Regntønne

Regntønner er et mindre LOD-tiltak som kan brukes i kombinasjon med taknedløp. Her vil vann samles opp og lagres i en lukket beholder. Et eksempel på en regntønne er vist i Figur 1.4. Senere kan vannet benyttes til vanning av planter, og vil kunne bidra til å redusere andelen drikkevann som benyttes til vanning. Dette vil være et bidrag til å gjenopprette den naturlige vannbalansen. Effekten av flomdemping begrenses til regntønnens faste volum og krever at tønne tømmes før neste regnhendelse (Gabriel & Fiil, 2016).



Figur 1.4: Illustrasjon av hvordan en regntønne kan få tilført takvann gjennom et taknedløp (Gabriel & Fiil, 2016).

1.6 Miniregnbed som alternativt tiltak for lokal overvannshåndtering

Systemene presentert i delkapittel 1.5 er viktige tiltak under den overordnede tretrinnsstrategien, særlig i forbindelse med nybygging. Et behov disse systemene møter i mindre grad, er overvannshåndtering for allerede eksisterende bebyggelse der det ikke nødvendigvis er plass eller mulighet til å grave ned større systemer. Dette kan være langs en gate, et fortau eller i en bakgård der det ikke er plass til å grave opp gaten og anlegge regnbed, det kan være tak med stor helning eller svak konstruksjon, eller det kan være at en regntønne, som riktignok kan plasseres på overflaten på fortau eller i trange bakgårder, har for lite fordrøyningsvolum og er begrenset av regntønnens dimensjoner.

Det er altså behov for tiltak som kan håndtere takvann lokalt og som kan installeres uten graving. Et nytt konsept som møter dette behovet er miniregnbed. Det er et system som kombinerer infiltrasjons- og fordrøyningselementene til et vanlig regnbed med fleksibiliteten til en regntønne som kan plasseres direkte på overflaten og påkobles taknedløp.

1.6.1 Miniregnbedets oppbygning

Miniregnbedet testet i denne gradsoppgaven er et system utviklet i Edinburgh av C&D Associates og heter på engelsk *SUDSBOX* (Campbell, D'Arcy, & Perry, 2019).

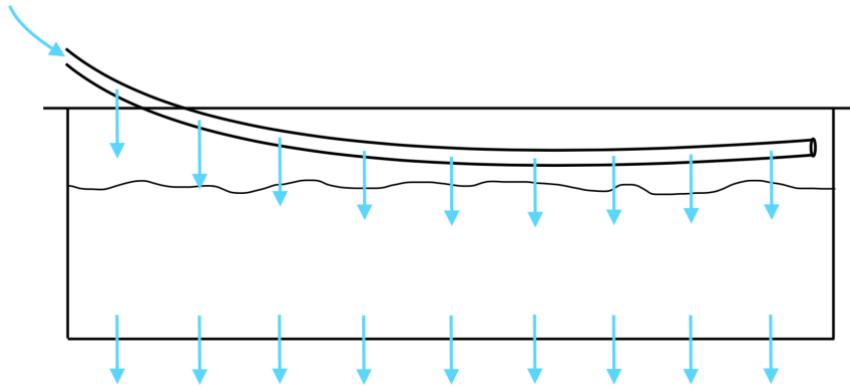
Figur 1.5 viser et eksemplar Oslo VAV har anskaffet for gjennomføring av tester. Systemet består av to hovedkomponenter: en blomsterkasse og et fordrøyningskammer. Skisser av systemet med dimensjoner er vist Vedlegg 3. Blomsterkassen har som hensikt å fange opp og infiltrere mindre nedbørhendelser, i tråd med trinn 1 i tretrinnsstrategien. Fordrøyningskamrene vil forsinke og fordrøye større nedbørhendelser og leder vannet ut av systemet gjennom et utløp som kan ha utslipp direkte til lokalt terreng, eller som kan kobles på kommunens ledningsnett. I Skottland er miniregnbedet tenkt å være påkoblet avløpsnett (Campbell, D'Arcy, & Perry, 2019), mens Oslo kommune ønsker at det er frakoblet (Vann- og avløpsetaten, 2017).



*Figur 1.5: Miniregnbed ved Sogn hagekoloni tilkoblet tak gjennom taknedløp og vannføringsplitter.
Foto: Bent C. Braskerud.*

Bildet viser hvordan miniregnbedet er tilkoblet taket gjennom et taknedløp og en vannføringsplitter. Vannet som tilføres systemet er takvann som ellers ville hatt utkast mot lokalt terreng eller som ledes til kommunens ledningsnett gjennom et påkoblet taknedløp. Miniregnbedet trenger ikke graves ned og kan plasseres på overflaten ved allerede eksisterende bebyggelse.

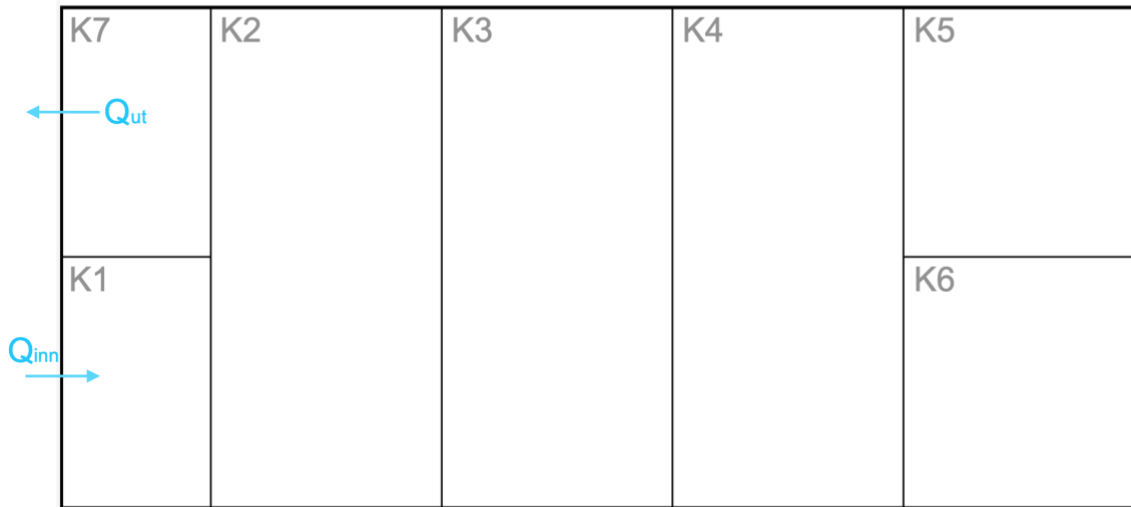
Blomsterkassen befinner seg i toppen av systemet. Denne delen får tilført vann gjennom et rør eller en slange som er gjennomhullet i underkanten og som strekker seg fra nedløpet til enden av blomsterkassen, slik at takvannet fordeles relativt jevnt i hele kassen. Blomsterkassen er illustrert i Figur 1.6. Blomstene står plantet i et jordlag og i bunnen av kassen dreneres overflødig vann videre til fordrøyningskamrene gjennom små hull.



Figur 1.6: Illustrasjon av hvordan vann tilføres blomsterkassen via gjennomhullet rør eller slange, infiltrerer i jordmedium og videreføres til fordrøyningskamre gjennom hull i kassens bunn.

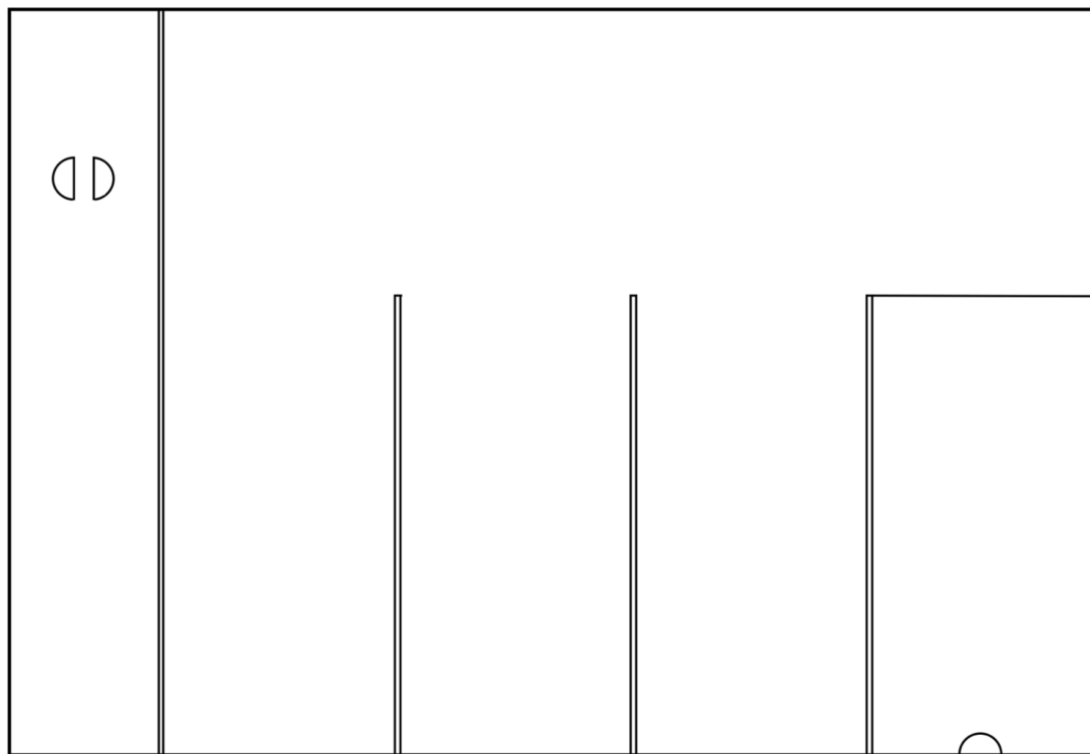
Fordrøyningskamrene befinner seg i nedre del av miniregnbedet og har som hensikt å forsinke og fordrøye større regnhendelser. Kamrene opptar den største andelen av systemets totalvolum, og det er her spissavrenningen fra taket i størst grad blir redusert og forsinket. Illustrasjoner av fordrøyningskamre er vist i Figur 1.7 og Figur 1.8. Denne delen av systemet får tilført vann direkte fra taknedløp gjennom en vannføringsplitter og fra blomsterkassens drenering.

Fordrøyningskamre sett ovenfra



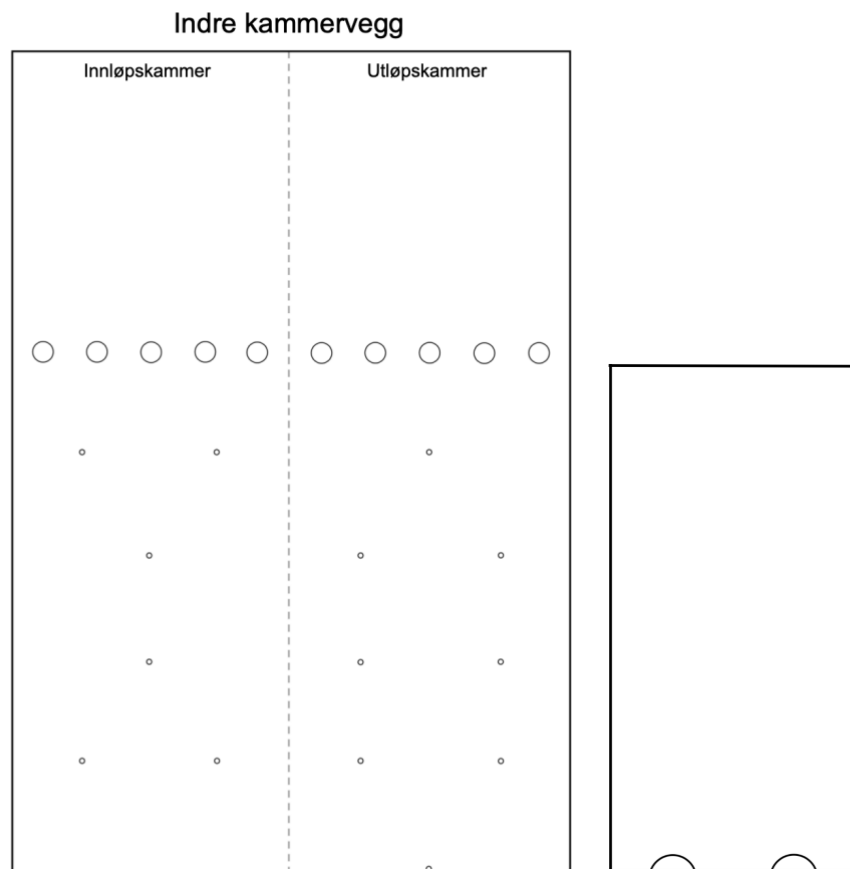
Figur 1.7: Illustrasjon av fordrøyningskamrene, sett ovenfra. Takvann tilføres systemet (Q_{inn}) gjennom vannføringssplitter over innløpskammer K1, fordrøyes i fordrøyningskamre K2-K6 og forlater systemet (Q_{out}) gjennom utløp i utløpskammer K7.

Fordrøyningskamre sett fra siden



Figur 1.8: Illustrasjon av fordrøyningskamrene sett fra siden. Halvmånehull leder vann mellom kamrene, plassert i bunnen av hver kammervegg til høyre for K2. Overløp mellom K1 og K7 vises i øvre, venstre hjørne.

Kammerveggen som skiller fordrøyningskammer fra innløpskammer og utløpskammer er vist i Figur 1.9. Blendeåpningene i veggen er så små at de kun tillater lav vannføring ut av fordrøyningskammerne. Det er slik takvannet holdes igjen og fordrøyes i systemet. Ved større vannmengder som overstiger miniregnbedets kapasitet ledes takvannet direkte til et overløp som har som hensikt å forhindre at systemet oversvømmes. Overløpet er vist i Figur 1.8. I slike tilfeller vil vannføringen ut av systemet være like stor som vannføringen inn i systemet.



Figur 1.9: Indre kammervegger med korrekt størrelsesforhold. Illustrerer kammervegg som skiller fordrøyningskamre fra innløps- og utløpskammer (t.v.) og kammervegg med halvmånehull mellom K2 og K6 (t.h.).

1.6.2 Vannføringssplitter

En vannføringssplitter vist i Figur 1.10, regulerer fordelingen av vannføring mellom blomsterkasse og fordrøyningskammer. Den har to utløp og er koblingen mellom taknedløp og miniregnbed. Alt takvann under en terskelverdi føres direkte til blomsterkassen. Mindre regnhendelser vil dermed håndteres gjennom vanning av planter, fordampning og infiltrasjon i blomsterbedet. Ved lengre og mer intense

regnhendelser vil vannføringer større enn terskelverdien føres direkte til fordrøyningskamre og forsinkes der. Vannføringssplittere produseres i ulike varianter og typen benyttet i forsøkene, medfølger ikke miniregnbedet. Vannføringssplitteren *Regendieb Pro* benyttet i denne oppgaven er produsert av GRAF (GRAF, 2020).



Figur 1.10: Vannføringssplitteren *Regendieb Pro* benyttet til å fordele takvann mellom blomsterkasse og fordrøyningskamre (GRAF, 2020).

1.7 Storm Water Management Model

SWMM er et gratis simuleringsprogram for design og dimensjonering av overvannsystemer og avløp utviklet av det amerikanske *Environmental Protection Agency* (EPA). Programvaren er en nedbør-avløpsmodell som kan simulere avrenning basert på inngangsdata om nedbør på et nedbørsfelt og tilførte vannmengder til et system. Programmet kan benyttes til å simulere enkelthendelser og hendelser over tid, og det kan simulere vannkvalitet og –kvantitet. Inngangsdata kan være en regnhendelse som varierer med tid, og programmet ruter så vannet ut i systemet gjennom hydrologisk routing (Gironás, Roesner, Davis, & Jennifer, 2009). SWMM er benyttet for å lage en modell av miniregnbedet.

Programmet har egne ferdigmodellerte elementer for pumper, vannføringssplittere, lagringsenheter og ulike hullåpninger. De to sistnevnte er særlig relevante for modellering av miniregnbedet. Med dynamisk bølgerouting håndterer programvaren

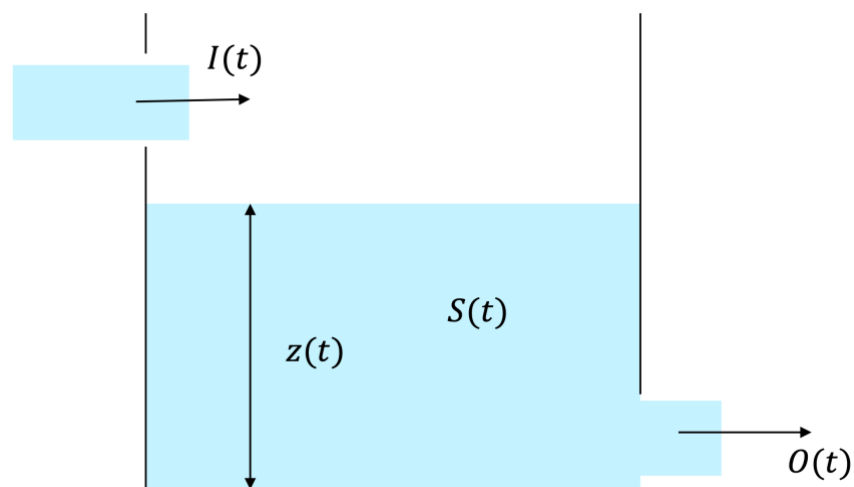
ulike strømningsregimer og programmet har egne ferdigbygde pakker for modellering av LOD-tiltak (Rossman, 2015).

1.7.1 Hydrologisk routing

Ved bruk av hydrologisk routing kan man bestemme hvordan vann beveger seg gjennom et system. Routing er prosessen som beskriver hvordan strømningsrate og vanndybde fordeler seg gjennom et system og hydrologisk routing benyttes gjerne i overvannshåndtering ved dimensjonering av fordrøyningsbasseng. I «*Water-Resources Engineering*» beskriver David A. Chin hvordan hydrologisk routing beregner utløpshydrogram, volum og vannivå som funksjon av tid i et system ved bruk av kontinuitetslikningen (Chin, 2013):

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - O(t) \quad (1.1)$$

der S er systemets lagringsvolum [L^3], t er tid [T], $I(t)$ er innløpshydrogram [L^3/T] og $O(t)$ er utløpshydrogram [L^3/T], vist i Figur 1.11. Det antas horisontalt vannspeil og at utløpskarakteristikk (utløpsvannføring O som funksjon av vanndybde z), magasingeometri (lagret volum S som funksjon av vanndybde z) og innløpshydrogram er kjent. Kontinuitetslikningen (1.1) kan løses numerisk med Modified Puls-metoden (Chin, 2013).



Figur 1.11: Illustrasjon av parametere i hydrologisk routing (Nilsen, 2019).

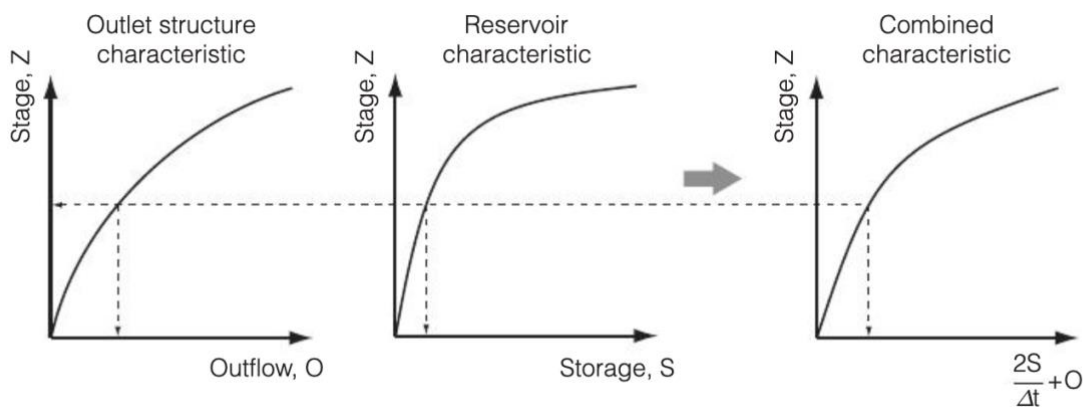
For et avgrenset tidsintervall kan likning 1.1 skrives på følgende form:

$$\frac{S_2 - S_1}{\Delta t} = \frac{I_1 + I_2}{2} - \frac{O_1 + O_2}{2} \quad (1.2)$$

der notasjon 1 refererer til tiden t og notasjon 2 refererer til tiden $t + \Delta t$. Likning 1.2 kan skrives om slik:

$$I_1 + I_2 + \frac{2S_1}{\Delta t} - O_1 = \frac{2S_2}{\Delta t} + O_2 \quad (1.3)$$

Både O og S kan uttrykkes som en funksjon av vannstanden i systemet, Z . Ved å kombinere de to relasjonene kan Z plottes mot $\frac{2S}{\Delta t} + O$, vist i Figur 1.12 (Chin, 2013).



Figur 1.12: Illustrasjon av hvordan utløpsvannføring O og lagret volum S kan kombineres for å uttrykke vanndybde Z som en funksjon av $\frac{2S}{\Delta t} + O$ (Chin, 2013).

Videre beskriver Chin hvordan følgende prosedyre kan benyttes for beregning av utløpshydrogram, $O(t)$:

1. Sett inn kjente verdier for I_1, I_2 og $\frac{2S_1}{\Delta t} + O_1$. Det gir verdien for $\frac{2S_2}{\Delta t} + O_2$.
2. Bestem så avrenning ut av systemet basert på utløpskaraktistikk, magasingeometri og verdien funnet i punkt 1.

3. Trekk fra $2O_2$ i $\frac{2S_2}{\Delta t} + O_2$, slik at vi får $\frac{2S_2}{\Delta t} - O_2$.
4. Gjenta stegene til utløpshydrogrammet er fullført.

1.7.2 Vannføring gjennom blende

I miniregnbedet skjer fordrøyningen av takvann hovedsakelig gjennom tilbakeholdelse av vannmengder. Dette gjøres ved at de små hullene i kammerveggen mot utløpet, som vist i Figur 1.9, kun muliggjør lav vannføring ut av kammeret. Vannføring gjennom en blende kan utledes gjennom Torricellis lov. Det forutsettes at væsken er inkompressibel, har neglisjerbar viskositet og har fritt vannspeil. Formelen relaterer vannhastighet gjennom en blende (v) til vannstanden over hullet (z) (Tipler & Mosca, 2008):

$$v = \sqrt{2gz} \quad (1.4)$$

For å få et uttrykk for vannføring ut av blende kan en benytte seg av følgende relasjon mellom vannhastighet og hullets areal (A):

$$Q = vA \quad (1.5)$$

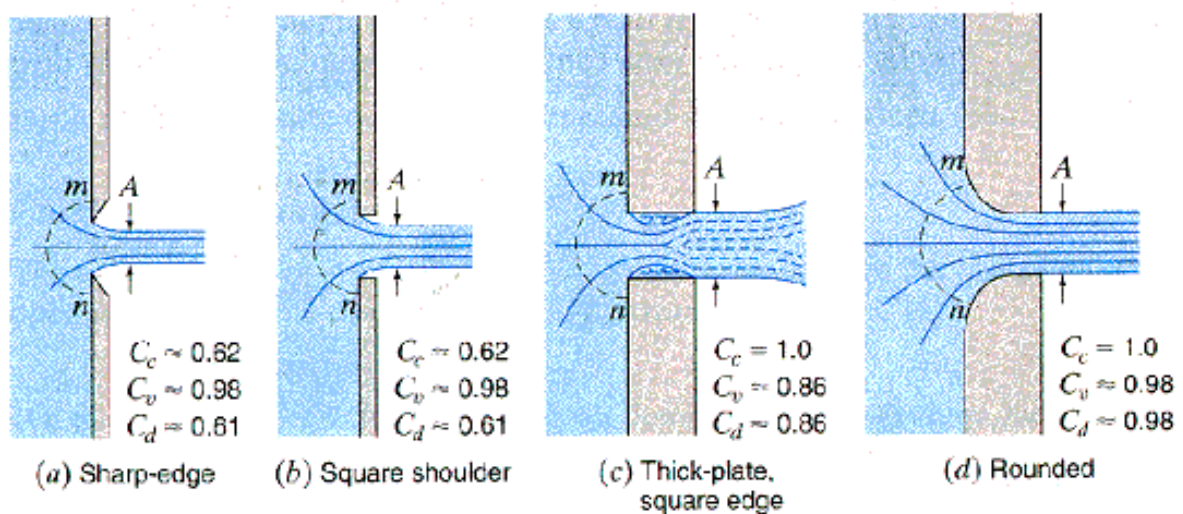
Vannføring gjennom blende kan dermed uttrykkes som et produkt av blendeåpningens tverrsnittsareal, vannhastighet ut av blenden og en tapskorrigerende utløpskoeffisient:

$$Q = C_d A \sqrt{2gz} \quad (1.6)$$

der Q er vannføring gjennom blende [L^3/T], C_d er utløpskoeffisient for blende, A er blendeåpningens tverrsnittsareal [L^2], g er tyngdeakselerasjon [L/T^2] og z er vannstanden over blenden [L].

For idealisert strømning er C_d lik 1. I virkeligheten vil viskøse effekter påvirke vannføringen og tapene som medfølger er innbakt i koeffisienten. Utløpskoeffisienter for blendeåpninger bestemmes eksperimentelt, og i virkeligheten vil C_d alltid være

mindre enn 1 (Çengel & Cimbala, 2014). I følge Finnemore og Franzini i «Fluid Mechanics With Engineering Applications» (Finnemore & Franzini, 2002) kjennetegnes en blende av at veggtykkelse er svært liten i forhold til hullåpning. For standardhullåpninger, vist i (a) og (b) i Figur 1.13, er utløpskoeffisienten C_d lik 0,61. For blendeåpninger av type (c) og (d) vil veggtykkelse og materialets ruhet påvirke vannføringen. For type (d) vil også radiusen til kurvaturen ha en innvirkning. Utløpskoeffisienter for slike hullåpninger må i følge Finnemore og Franzini kalibreres dersom en ønsker høy nøyaktighet (Finnemore & Franzini, 2002).



Figur 1.13: Utløpskoeffisienter (C_d) for skarpkantet (a), firkantet (b), firkantet med tykk plate (c) og avrundet (d) blende med strømningsareal, A (Finnemore & Franzini, 2002).

1.8 V_E – effektivt fordrøyningsvolum

I arbeidet med å sammenligne miniregnbedets fordrøyningsvirkning ved ulike regnhendelser, er det en rekke elementer som kan måles opp mot hverandre. I denne oppgaven vil det fokuseres på følgende: forsinkelse og reduksjon av spissavrenning, og *effektivt fordrøyningsvolum*.

I utviklingen av miniregnbedet ble det av C&D Associates lagt vekt på konseptet effektivt fordrøyningsvolum i vurdering av ulike dimensjoners fordrøyningsvirkning (Campbell, D'Arcy, & Perry, 2019). Dette er et alternativ til å kun se på systemets tilgjengelige volum for fordrøyning, fastsatt av systemets dimensjoner. Denne

oppgaven finner det naturlig å videreføre bruken av begrepet effektivt fordrøyningsvolum.

Effektivt fordrøyningsvolum kan beskrives som det volumet som forlater systemet før og etter avrenningen ut av systemet ($Q_{avrenning}$) er lik den vannføringen som tilføres systemet ($Q_{nedbør}$) i løpet av en hendelse. Produsentene av miniregnbedet definerer effektivt fordrøyningsvolum slik (Campbell, D'Arcy, & Perry, 2019):

$$V_E = V_s + V_0 \quad (1.7)$$

der V_E er effektivt fordrøyningsvolum, V_s er miniregnbedets tilgjengelige volum for fordrøyning og V_0 er det volumet som forlater systemet før $Q_{avrenning} = Q_{nedbør}$ (Campbell, D'Arcy, & Perry, 2019). Effektivt fordrøyningsvolum er altså volumet vann som forlater systemet før (V_0) og etter (V) systemet er fullt. Ved tilføring av vann i form av et kasseregnet, vil systemet slutte å være fullt når vannføringen stoppes. Det vannet som på dette tidspunktet befinner seg i systemet, er lik det tilgjengelige volumet for fordrøyning, bestemt av miniregnbedets dimensjoner.

I simuleringene gjort med modellen av miniregnbedet i SWMM, er vannføring tilført systemet i form av trekantregnet. Systemet vil slutte å være fullt mens det fortsatt får tilført vann, derfor må dette siste volumet av trekantregnet (V_f) legges til i beregningen av effektivt fordrøyningsvolum ved bruk av trekantregnet:

$$V_E = V_s + V_0 + V_f \quad (1.8)$$

2 Metode

Undersøkelsene av miniregnbedets fordrøyningsvirkning er gjennomført over tre steg. Først er en modell av systemet bygd i SWMM basert på målte dimensjoner og teoretiske utløpskoeffisienter, deretter er hydrauliske forsøk gjennomført i vannlaboratorium. I modelleringen er det nødvendig å ha informasjon om hvordan fordrøyningskamre, blomsterkasse og vannføringssplitter fungerer. Resultatet fra disse testene benyttes så til justeringer og kalibrering av modellen. Den ferdige modellen kan så benyttes i simuleringer av utvalgte nedbørhendelser for å undersøke systemets fordrøyningsvirkning. Til slutt er modellens fordrøyningsvirkning optimalisert ved å justere dimensjoner og indre design.

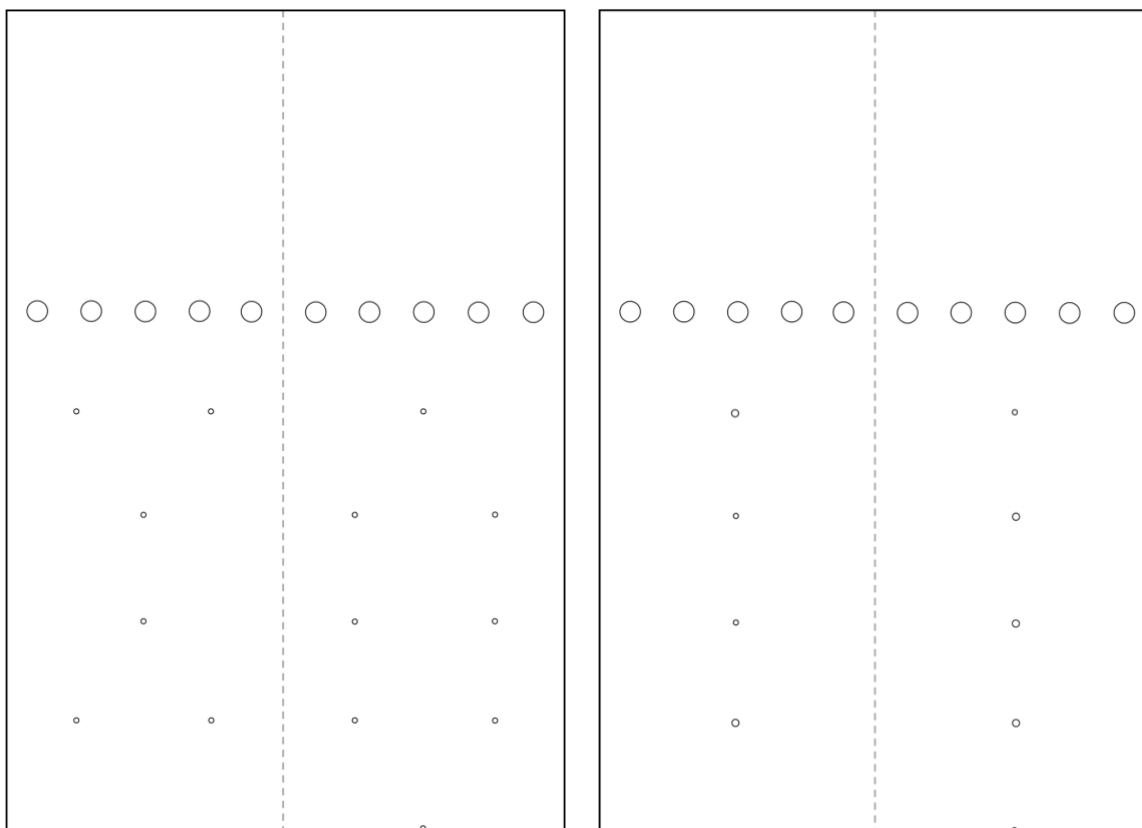
2.1 Modellering i SWMM

En modell av miniregnbedet ble bygd i SWMM basert på målte dimensjoner og teori om utløpskoeffisienter for hull og blender. I arbeidet med å bygge modellen ble det gjort forenklinger av hullmønstrene i kammerveggen mot innløpskammer og utløpskammer. Figur 2.1 viser at to og to hull i samme høyde er slått sammen til ett nytt hull med større diameter.

Arealet av forenklet hull, $A_{1,forenklet}$ er to ganger det opprinnelige arealet, $A_{1,opprinnelig}$. Da kan diameteren, $D_{1,forenklet}$, uttrykkes slik:

$$D_{1,forenklet} = \sqrt{\frac{8A_{1,opprinnelig}}{\pi}} \quad (2.1)$$

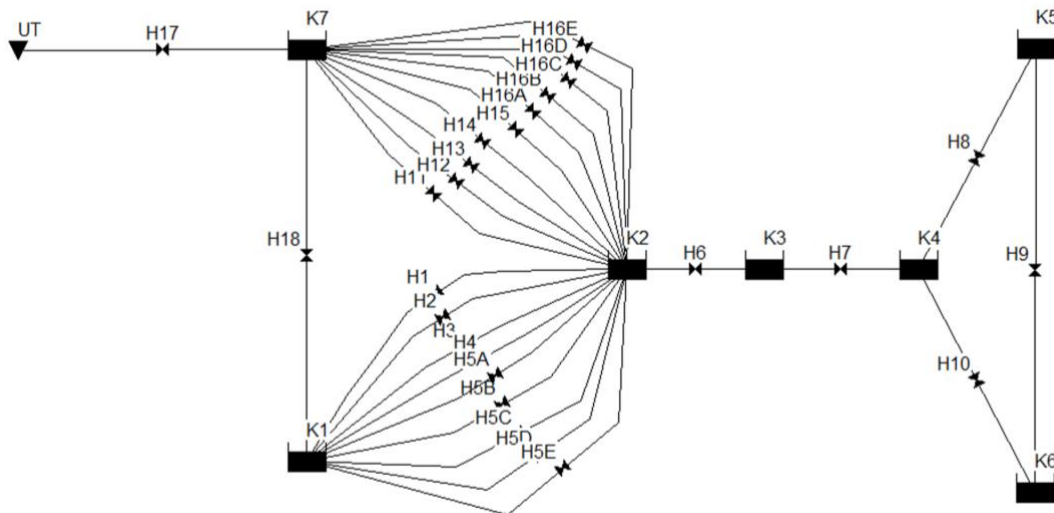
Hullenes opprinnelige diameter, $D_{1,opprinnelig}$, var 5,0 mm, mens forenklet hull diameter, $D_{1,forenklet}$, er 7,05 mm. Det antas at forenklingens eventuelle effekt på vannføring er neglisjerbar.



Figur 2.1: Kammervegg før (t.v.) og etter (t.h.) forenkling av hullmønster. Venstre side av stiplet linje markerer skillevegg mot innløpskammer, høyre side markerer skillevegg mot utløpskammer.

2.1.1 Modellering av fordrøyningskamre

Miniregnbedet består av to hovedkomponenter; fordrøyningskamre og blomsterkasse, derfor er modellen av systemet bygd som to separate deler i SWMM. Kamrene er bygd opp av sju lagringsnoder som fordrøyningskamre (K1-K7), blender (H1-H17), et overløp (H18) og et utløp (H17 og UT), vist i Figur 2.2. Modellen får tilført vannføring i to punkter: fra blomsterkassen til kamrene K2-K6 og fra vannføringssplitteren til innløpskammer K1. Takvannet fordeles så mellom kamrene og ledes ut av miniregnbedet gjennom utløpskammer K7.



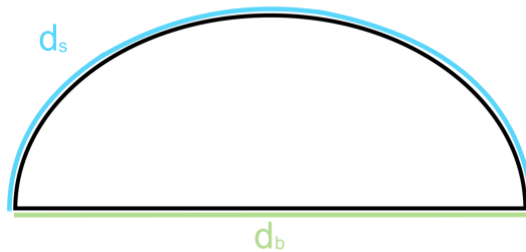
Figur 2.2: Skjermdump av modell i SWMM. K1-K7 markerer kamre, H1-16E er hull mellom kamrene, H17 er utløp og H18 er overløp.

De fleste modellparametere er målt direkte i det virkelige miniregnbedet, med unntak av utløpskoeffisienter. Disse er basert på teoretiske koeffisienter fra Figur 1.13. For utløp og hullene vist i Figur 2.1 benyttes koeffisient for skarpkantet blende, $C_{d,s} = 0,61$. For halvmånehullene i bunnen av kammerveggene mellom K2-K6 (se Figur 1.9) er koeffisienten beregnet som en vektet sum av koeffisient for skarpkantet og avrundet blende. Bunnen av sirkelen antas å ha koeffisient lik en avrundet blende, $C_{d,b} = 0,98$, mens halvsirkelen antas å være skarpkantet.

Vektet utløpskoeffisient kan beregnes slik (V. Nilsen, personlig kommunikasjon, 28.01.2020):

$$C_{d,vektet} = \frac{d_s}{d_s + d_b} C_{d,s} + \frac{d_b}{d_s + d_b} C_{d,b} \quad (2.2)$$

der d_s er halvsirkelens omkrets og d_b er halvsirkelens lengde i bunnen, illustrert i Figur 2.3. Ved å sette inn for d_s lik 6,3 cm og d_b lik 4,0 cm, blir $C_{d,vektet}$ lik 0,75. Overløpet mellom K1 og K7 er også formet som to halvsirkler, men ettersom den flate enden ikke ligger langs bunnen av systemet, er også flatsiden skarpkantet. Overløpet får derfor utløpskoeffisient lik 0,61, men legges forenklet inn i modellen som én samlet sirkel.



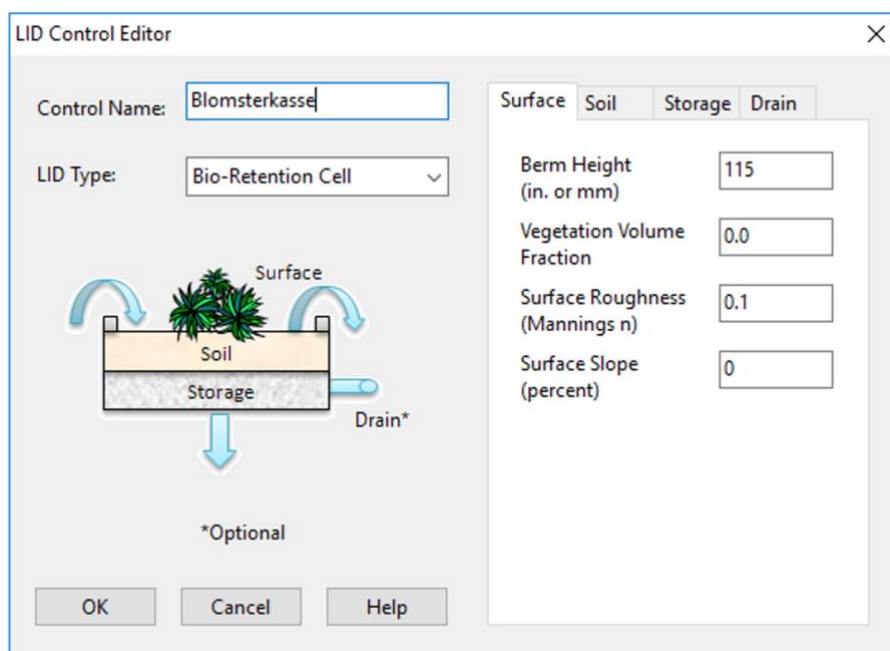
Figur 2.3: Blende mellom fordrøyningskamre i miniregnbedet.

Det er særlig viktig å ta nøyaktige mål av blendeåpningenes diameter i kammerveggene. Hvert hull alene utgjør kun en liten andel av det totale strømningsarealet ut av miniregnbedet, men dersom en liten målefeil gjøres ved mange hull, vil dette utgjøre et større bidrag. Det vil kunne påvirke utløpshydrogrammet fra miniregnbedet og de endelige resultatene i vurderingen av miniregnbedets fordrøyningsvirkning.

2.1.2 Modellering av blomsterkasse

Blomsterkassen ble satt opp ved bruk av SWMMs innebygde funksjon *LID Control*, som er et hjelpeverktøy for bygging av LOD-tiltak. Her kan en legge inn verdier for ulike parametere og egenskaper ved valgt jordmedium, og en kan velge type LOD-tiltak basert på hvilke funksjoner en ønsker. SWMM ruter takvannet gjennom de ulike lagene, blant annet basert på informasjon om ledningsevne i jordmedium, vegetasjonsvolum, overflateruhet og porøsitet.

For miniregnbedets blomsterkasse er det nødvendig å ha en overflate med infiltrasjonsmulighet, et jordmedium som kan ha beplantning og et utløp i bunnen som kan lede infiltrert overvann videre til et valgt system. Flere av *LID Control*-alternativene baserer seg på infiltrasjon som ledes videre til grunnen i bunnen av systemet, men det har ikke miniregnbedet mulighet til. I et miniregnbed ledes overflødig vann fra blomsterkassen videre til fordrøyningskammer. Derfor er det nødvendig å ha en funksjon som tillater utløp i bunnen og videreføring av overflødig overvann. LID-typen *bioretensjonscelle* har de ønskede funksjonene og Figur 2.4 viser lagvis oppbygging. Bioretensjonscellen består av en overflate med mulighet for beplantning, et jordlag, et lagringsvolum og drenering fra bunnen.



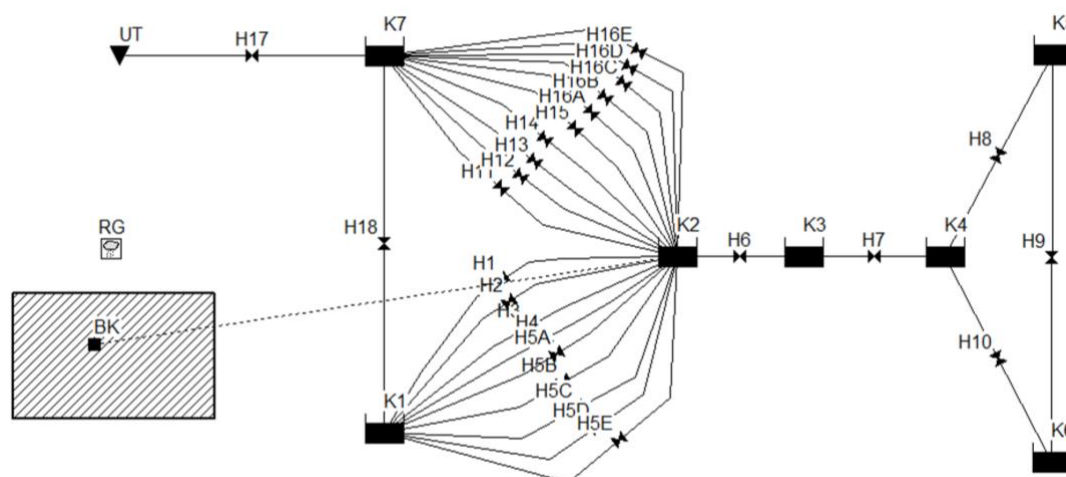
Figur 2.4: Skjermdump av LID-modulens redigeringsverktøy som viser oppbygningen av bioretensjonscellen.

Til testing av blomsterkassen er *Oslokompost* valgt som jordmedium. Dette er en kompost laget av hageavfall, produsert av Oslo kommune (Renovasjonsetaten, u.å.). Noen parametere for jordegenskaper er oppgitt fra produsenten, vist i Tabell 2.2, resterende verdier er hentet fra Tabell 2.1. I de hydrauliske forsøkene gjennomføres testene i blomsterkassen kun med jordmedium, uten beplantning. Derfor settes vegetasjonsvolumet lik null i modelleringen. Jordlaget i blomsterkassen er 18,5 cm dypt, mens blomsterkassens totale dybde er 30 cm. Blomsterkassens høyde over jordlaget (*Berm Height* i Figur 2.4) blir da 115 mm.

I SWMM får LOD-tiltak tilført vannføring fra små nedbørfelt som lages i samme areal som ønsket overflateareal for systemet. Det må ikke forveksles med miniregnbedets faktiske nedbørfelt, som er takarealet systemet får vannføring fra gjennom taknedløp. Figur 2.5 viser modellen av miniregnbedet med blomsterkasse og fordrøyningskamre, der et nedbørfelt (BK) med blomsterkassens areal er satt inn. Nedbørfeltet får tilført vann gjennom regnmåleren (RG), som i modellen fungerer som vannføringsplitteren påkoblet taknedløpet. Drenerte vannmengder fra bioretensjonscellen ledes til fordrøyningskammer K2.

Tabell 2.1: Foreslåtte jordegenskaper i SWMM, der K er mettet hydraulisk konduktivitet (in/hr), ψ er sugeshøyde (in), ϕ er porøsitetsfraksjon, FC er feltkapasitetsfraksjon og WP er visnepunktfraksjon (Rossman, 2015).

Soil Texture Class	K	Ψ	ϕ	FC	WP
Sand	4.74	1.93	0.437	0.062	0.024
Loamy Sand	1.18	2.40	0.437	0.105	0.047
Sandy Loam	0.43	4.33	0.453	0.190	0.085
Loam	0.13	3.50	0.463	0.232	0.116
Silt Loam	0.26	6.69	0.501	0.284	0.135
Sandy Clay Loam	0.06	8.66	0.398	0.244	0.136
Clay Loam	0.04	8.27	0.464	0.310	0.187
Silty Clay Loam	0.04	10.63	0.471	0.342	0.210
Sandy Clay	0.02	9.45	0.430	0.321	0.221
Silty Clay	0.02	11.42	0.479	0.371	0.251
Clay	0.01	12.60	0.475	0.378	0.265



Figur 2.5: Skjermdump av modell i SWMM. Fordrøyningskamre og blomsterkasse er koblet sammen mellom kassen (BK) og fordrøyningskammer K2.

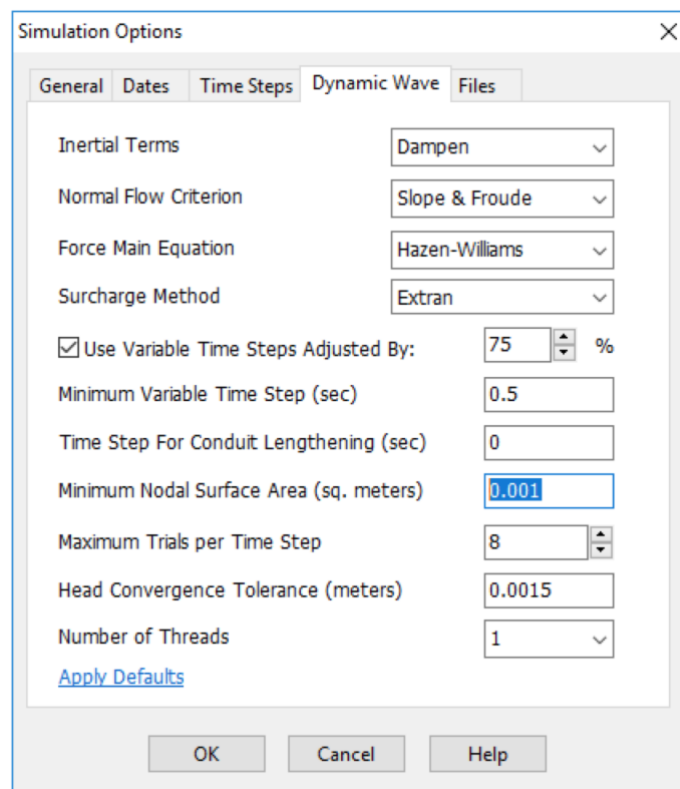
2.1.3 Kinematisk eller dynamisk bølge

SWMM tilbyr to forskjellige metoder for å route vann gjennom et system på. Den enkleste metoden er kinematisk bølge. Denne tar ikke hensyn til bakevjeeffekt, trykkstrømning og reversering av strømning. For modellering av miniregnbedet i SWMM er dette avgjørende elementer i simulering av vannstrømning gjennom systemet. En mer avansert metode for å lede vann gjennom et system på, er dynamisk bølge. Metoden tilbyr nettopp disse nevnte funksjoner i sin simulering, og

krever da en større oppløsning på tidsstegene for å gjennomføre simuleringer (Rossman, 2015). Dynamisk bølge er derfor benyttet i modelleringen.

2.1.4 Minimum Nodal Surface Area

Et miniregnbed er et relativt lite system dersom en ser det opp mot et ledningsnett tilknyttet ett eller flere nedbørsfelt. Ved prosjektets start var det derfor noe usikkerhet knyttet til om SWMM ville håndtere miniregnbedets små dimensjoner. Innledningsvis ga simuleringer en uventet lav vannføring ut av fordrøyningskamrene, mens manuelle beregninger ga en betydelig høyere vannføring. I feilsøkingarbeidet ble det oppdaget at de lave vannføringene kunne komme av et større areal i fordrøyningskamre i modellen enn de virkelige dimensjonene. Ved å løse likning $Q = A \frac{dh}{dt}$ for arealet A, der Q er vannføring ut av kammer og $\frac{dh}{dt}$ er endring i vannstand over et tidsintervall, ble det oppdaget at minste areal benyttet av SWMM var 1,167 m^2 . Det var viktig å oppdage funksjonen Minimum Nodal Surface Areal, markert i blått i Figur 2.6.



Figur 2.6: Skjermdump av innstillingsvindu for simuleringer i SWMM.

Standardverdi for minste tillatte areal (Minimum Nodal Surface Area) var automatisk satt til $1,167 \text{ m}^2$ i programmets standardinnstillinger. Det førte til at alle arealer for lagringsnoder lavere enn dette ble rundet opp. I SWMMs beregninger blir dermed kammerets volum betydelig større enn det er i virkeligheten. Fem timers tømmeid ut av miniregnbedet ble redusert til en drøy time ved å sette grenseverdien lavere enn minste areal i miniregnbedet.

2.2 Hydrauliske tester i fordrøyningskamre

Etter modelleringen av miniregnbedet i SWMM ble det gjennomført hydrauliske tester i fordrøyningskamrene. Resultatene fra testene benyttes senere i kalibreringen av modellens utløpskoeffisienter. Forsøkene ble gjort ved å tilføre miniregnbedet kasseregn med ulike varigheter og intensiteter.

Vannføringen ut av fordrøyningskamre beregnes basert på målinger av vannstandendring i kammeret over tid:

$$Q_{ut} = A \frac{dh}{dt} \quad (2.3)$$

der Q_{ut} er vannføring ut av kammeret, A er kammerareal, h er vannstand i kammer og t er tid.

2.2.1 Fremgangsmåte

Hydrauliske tester i fordrøyningskamre ble gjennomført i laboratorium med tilgang på vannslange med kjent og stabil vannføring som kan reguleres på ml/s-nivå. Systemet ble tilført vann gjennom denne slangen i form av kasseregn med ulike varigheter og intensiteter. De samme kasseregnene tilføres senere SWMM-modellen i kalibreringen av utløpskoeffisienter.

Vannstandsending i systemet ble målt over tid ved bruk av utstyrsoppsett vist i Figur 2.7. Det ble plassert en meterstokk i hvert kammer og avlesninger ble gjort ved bruk av penn, papir og stoppeklokke. I bunnen av kamrene kunne det være utfordrende å gjøre nøyaktige avlesninger av vannstanden. Derfor ble fargestoffet Rhodamine WT

tilsatt vannet for å skape en større kontrast og meterstokk med høyere oppløsning ble satt inn. Mellom forsøkene ble det benyttet en pumpe for å tømme systemet for vann.



Figur 2.7: Bildet til venstre viser utstyrsoppsett i fordrøyningskamre. Høyre side viser meterstokk med høyere oppløsning og bruk av fargestoff i vannet. Foto: Johanne Grøndahl Klausen.

To typer forsøk ble gjennomført med fordrøyningskamrene i hydraulisk laboratorium:

- **Forsøk A**

Målet med disse forsøkene var å se hvordan vann beveger seg gjennom systemet gjennom en kunstig nedbørhendelse med kjent og konstant vannføring over et bestemt tidsintervall. Systemet var tomt ved forsøkens start. Regnhendelsene benyttet i forsøket kan så simuleres i SWMM for å sammenligne hvordan vannet routes gjennom modellen og hvordan det fordeles i virkeligheten.

- **Forsøk B**

Hensikten med denne typen forsøk var å observere hvordan systemet tømmes for vann. Miniregnbedets tilgjengelige volum for fordrøyning ble fylt opp, deretter ble den synkende vannstanden notert som funksjon av tid til systemet var helt tomt. Resultatene fra disse forsøkene kan benyttes til å kalibrere utløpskoeffisienter for hullåpninger i kammervegg mot utløpskammer.

Forsøk A ble gjentatt for ulike tilførte vannføringer, vist i Vedlegg 1.

2.2.2 Feilkilder

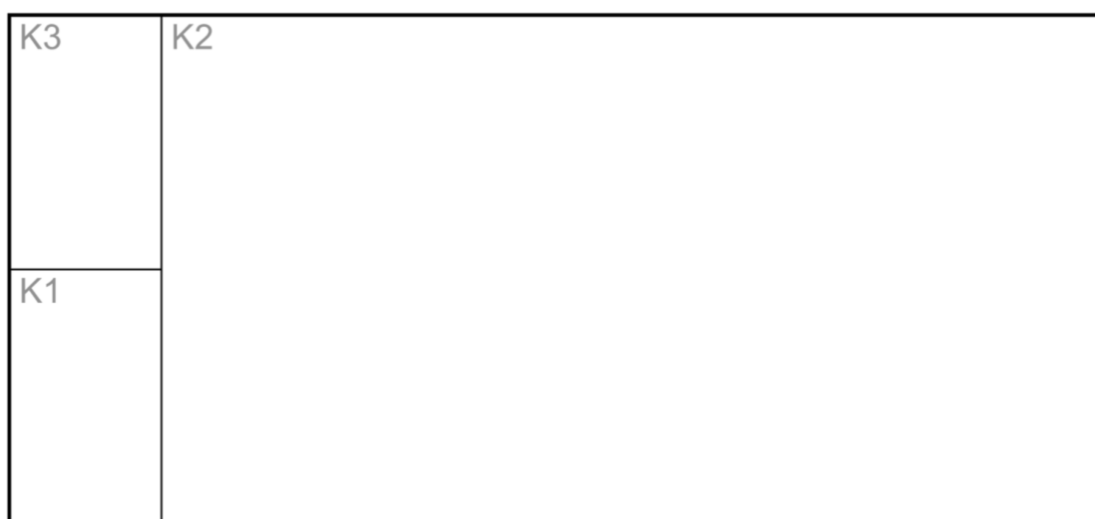
Vannstandsavlesninger i fordrøyningskamrene ble gjort på øyemål. Nærmere bunnen av fordrøyningskamrene er det særlig utfordrende å gjøre nøyaktige avlesninger, ettersom kammerveggene er høye og fører til at avlesninger gjøres i en skråvinkel fra toppen av systemet. På grunn av korona-situasjonen ble det hydrauliske laboratoriet stengt og det var ikke mulig å gjennomføre nye tester i tide. Planen var å gjennomføre Forsøk B om igjen med en datalogger (*Sutron Xpert Datalogger* (OTT Hydromet, 2020)) som kunne gitt mer nøyaktige målinger av vannstand.

2.3 Kalibrering av utløpskoeffisient

Modellen av miniregnbedet består hovedsakelig av elementer som kan måles direkte i det virkelige systemet, med unntak av utløpskoeffisienter. Disse kalibreres ved å sammenligne vannføring ut av fordrøyningskamre i modell og i virkelighet.

2.3.1 Antagelser og forenklinger

Gjennom testingen av fordrøyningskamrene ble det observert at vannstanden var tilnærmet lik i kammer K2-K6. Det ble derfor besluttet å forenkle modellen ved å slå sammen disse kamrene til ett stort kammer kalt K2, som vist i Figur 2.8. Det antas at kammerveggens effekt på miniregnbedets fordrøyningsvirkning er neglisjerbar.

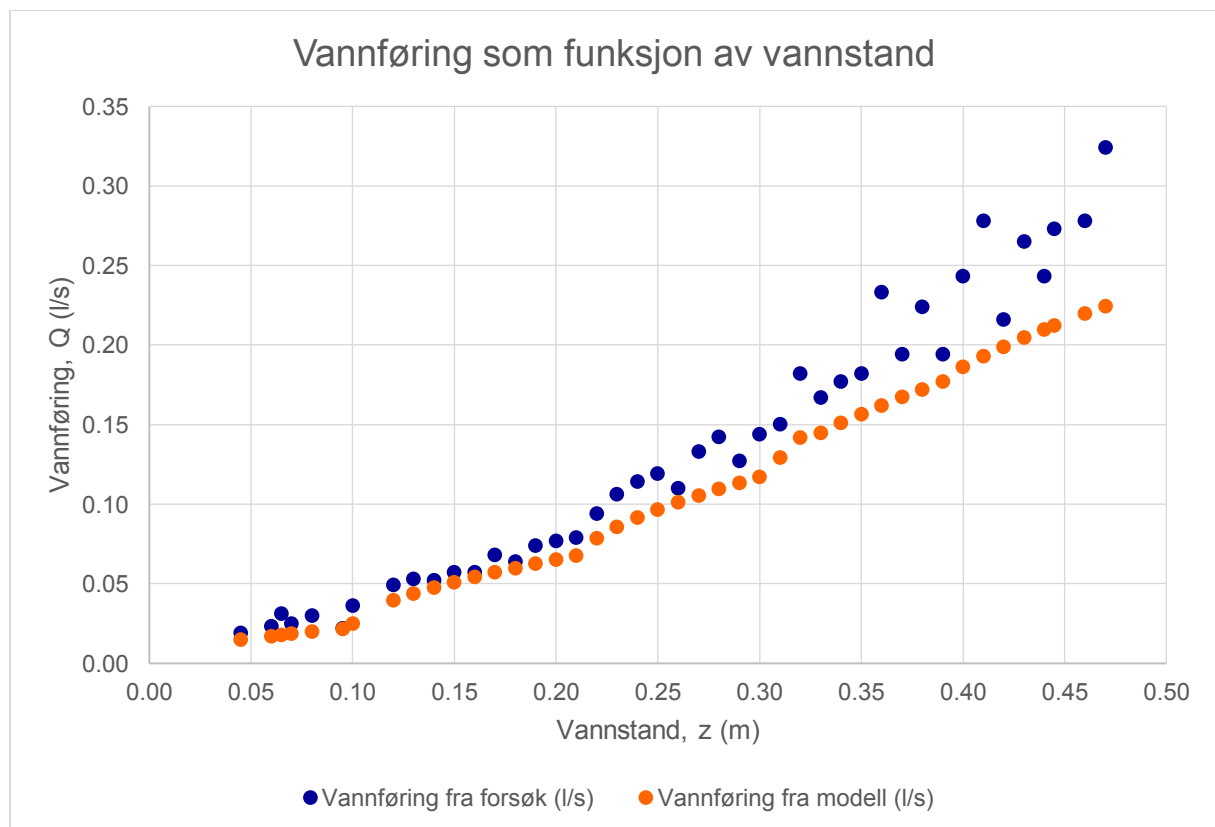


Figur 2.8: Illustrasjon av forenklet fordrøyningskammer sett ovenfra. Opprinnelig design er vist i Figur 1.7.

Under de hydrauliske testene ble det observert at vannstanden i utløpskammeret holdt seg svært lav og relativt stabil, så lenge det ikke gikk vann gjennom overløpet mellom innløpskammeret og utløpskammeret. Det var planlagt å undersøke dette nærmere før laboratoriet stengte. Ettersom det ikke var mulig å gjennomføre nye tester, antas det at effekten av eventuelle variasjoner i vannstand er neglisjerbare i dette kammeret.

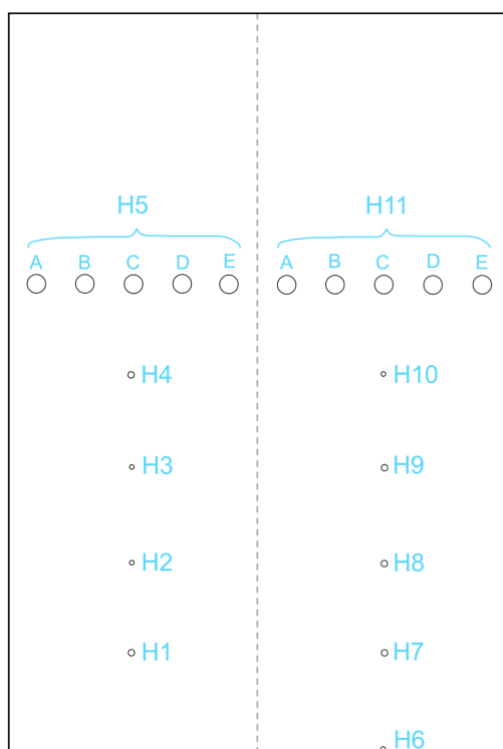
2.3.2 Fremgangsmåte for kalibrering

Kalibreringsarbeidet tar utgangspunkt i resultatene fra Forsøk B i de hydrauliske testene av fordrøyningskamrene. En kurve som viser vannføring ut av fordrøyningskamrene som funksjon av vannstand kan lages ved bruk av Likning 2.3. En tilsvarende kurve lages basert på SWMM-modellen. De to kurvene er sammenstilt i Figur 2.9, som viser at beregnet vannføring fra forsøk er noe høyere enn vannføringen beregnet av SWMM i modellen. Målet med kalibreringen er at modellkurven skal nærme seg forsøkskurven så mye som mulig. Dette gjøres ved å endre på modellens utløpskoeffisienter.



Figur 2.9: Vannføring (Q) fra forsøk og fra SWMM-modell før kalibrering som funksjon av vannstand (z).

Vannføringen ut av fordrøyningskammeret ledes gjennom blendeåpninger i kammervegg. De ulike hullene er vist og navngitt i Figur 2.10. I SWMM beregnes vannføring ut av slike blender ved bruk av Likning 1.6. Samtlige variabler i likningen bestemmes av vannstand og systemets dimensjoner, bortsett fra utløpskoeffisienten, C_d . Det er denne koeffisienten som kan justeres slik at vannføring fra modell nærmer seg vannføring fra forsøk i Figur 2.9. Beregningene figuren baseres på er gjort fra vannstand $z = 0,47$ m, og det er hullene som befinner seg under denne vannstanden som bidrar til vannføring ut av kammeret. Det er altså H6-H10 som kalibreres med utgangspunkt i figuren.



Figur 2.10: Forenklet kammervegg med navngitte hull, H1-H11.

Modellen av miniregnbedet ble bygd med antagelsen om at hullene i kammervegg vist i Figur 2.10 var skarpkantede og hadde tilhørende utløpskoeffisient, $C_d = 0,61$. Figur 2.9 viser at modellen har noe lavere vannføring enn det forsøkene viste. Utløpskoeffisient for H6-H10 må derfor økes for å oppnå høyere vannføring i modellen.

Det er viktig å begynne kalibreringen ved laveste hull og jobbe seg oppover. Vannføringen ved de laveste vannstandene ledes kun gjennom dette ene hullet nær bunnen, H6. Når justeringen av utløpskoeffisient gir samme vannføring i modell som fra forsøk, kan man gå videre til blende i neste høyde, H7, og gjenta justeringene av utløpskoeffisient. Slik kan man jobbe seg opp til øvre hull, H10, mens man får kalibrert ett hull om gangen. Ved høyere vannstander vil totalvannføringen ut av kammeret være summen av vannføring gjennom flere hull.

Det er flere hulltyper i miniregnbedet som ikke blir kalibrert gjennom dette forsøket, som overløpet, utløpet, H5A-H5E og H11A-H11E (se Figur 2.10). Med unntak av utløpet er det ingen eller lav vannføringsaktivitet gjennom disse hullene ved tilføring av vannmengder som håndteres av miniregnbedet. Etersom miniregnbedet ble levert ferdig montert, var det utfordrende å gjennomføre isolerte målinger for kalibrering av disse hullene. Det ble derfor besluttet å beholde teoretiske utløpskoeffisienter for resterende hulltyper.

2.3.3 Feilkilder

Kalibreringens usikkerhet er knyttet til forsøkens mulige feilkilder, skrevet om i delkapittel 2.2.2.

2.4 Infiltrasjonstester i blomsterkasse

Infiltrasjon defineres som prosessen der nedadgående vann trenger ned i løsmasser. Infiltrasjonsraten påvirkes i stor grad av forholdene nær overflaten og vanninnhold i jorda (Schwartz & Zhang, 2003). Blomsterkassens infiltrasjonsevne benyttes i modellen av blomsterkassen og påvirkes av jordmediets egenskaper. Permeabilitet avhenger blant annet av sorteringsgrad og hvor tettpakket løsmassene er (Ødegaard, 2014). Dersom blomsterkassen er beplantet vil plantene og deres røtter også påvirke infiltrasjonen gjennom kassen.

En rekke parametere påvirker løsmassers infiltrasjonsevne, og blomsterkasser i miniregnbed vil derfor håndtere regnhendelser noe ulikt. I dette prosjektet ble Oslokompost benyttet som jordmedium uten beplantning. Kompostens egenskaper er vist i Tabell 2.2. Med svært mange mulige variasjoner for valg av jordtype,

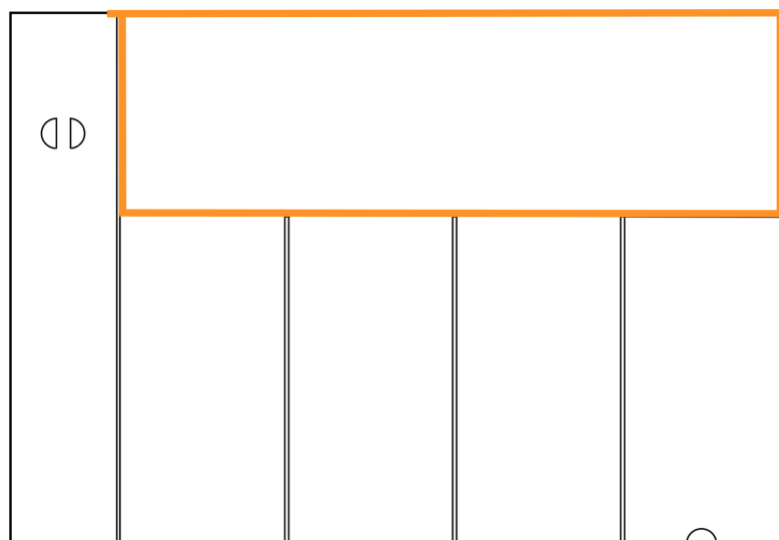
sorteringsgrad og hvor tettpakket løsmasser kan være, ble det besluttet å kun gjennomføre infiltrasjonstester i laboratoriet og hente resterende verdier for jordegenskaper fra litteratur.

Tabell 2.2: Jordegenskaper for Oslokompost, oppgitt av produsent (Renovasjonsetaten, u.å.).

Oslokompost, fin	
Egenvekt	800 kg/m ³
Partikkelstørrelse	0 – 10 mm
Sammensetning	Løv, kvist og gress
Tørrstoffinnhold	ca. 87,5 %
C/N	17,5
Surhetsgrad	pH 7,5 – 8,5

2.4.1 Fremgangsmåte infiltrasjonstester

Figur 2.11 viser blomsterkassen montert i miniregnbedet. I bunnen av kassen legges det en fiberduk som skal forhindre at løsmasser fraktes til fordrøyningskamrene, og kassen fylles deretter med 100 liter løspakket jord. Jordlaget er omkring 18 cm tykt i blomsterkassens totale dybde på 30 cm. Deretter fylles kassen med vann.



Figur 2.11: Illustrasjon av hvordan blomsterkassen (markert i oransje) plasseres i miniregnbedet. Hull i bunnen av kassen leder overflødig vann videre til fordrøyningskamrene.

For å måle infiltrasjonshastighet i blomsterkassen ble metoden *ponded infiltration* (infiltrasjon av oversvømt areal) benyttet. Den går ut på å mate løsmasser med vann til det skjer en oppstuvning på overflaten. Deretter stoppes vanntilførselen og hver cm vannstandssenkning i blomsterkassen noteres som funksjon av tid, til vannstanden synker lavere enn jordoverflaten. Figur 2.12 viser blomsterkassen under forsøk, der løsmassene mates med vann. Fram til oppstuvningen oppnås, er det hovedsakelig hastigheten til de tilførte vannmengdene som bestemmer infiltrasjonshastigheten gjennom løsmassene. Etter oppstuvning er løsmassene tilnærmet mettet med vann og jordkarakteristikken bestemmer infiltrasjonshastighet (Schwartz & Zhang, 2003).

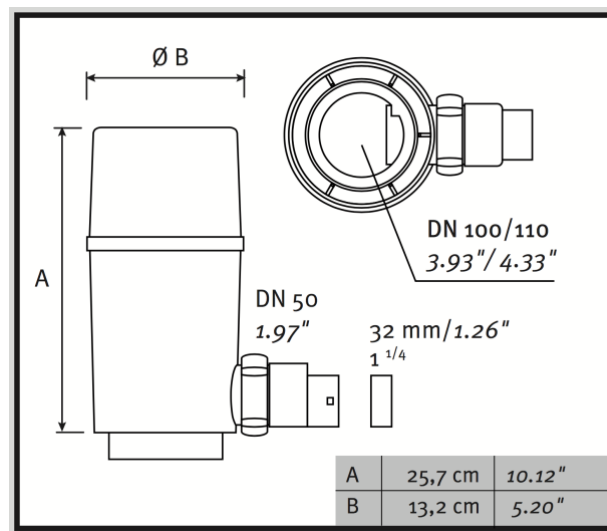


Figur 2.12: Blomsterkassen blir fylt med vann over et jordlag på 18,5 cm. En fiberduk er pakket rundt kassen for å forhindre at jord transporteres videre til fordrøyningskamrene. Foto: Johanne Grøndahl Klausen.

Før forsøkene er fordrøyningskamrene tømt for vann, men dersom vannstanden i kamrene når opp til blomsterkassen vil dette kunne påvirke infiltrasjonshastigheten. Over tid med infiltrasjon med fritt vannspeil over jordoverflaten, vil infiltrasjonen nå en stabil infiltrasjonsrate (Schwartz & Zhang, 2003). I dette prosjektets forsøk ble blomsterkassen med løsmasser tilført vann over tid også etter oppstuvning, slik at infiltrasjonshastigheten skulle stabilisere seg. Vannføringen ut av blomsterkassens bunn kan beregnes basert på målt endring i vannstand som funksjon av tid ved bruk av Likning 2.3, og benyttes i modelleringen av miniregnbedet. Blomsterkassens tverrsnittsareal er lik arealet av det sammenslåtte fordrøyningskammeret K2, $A_{K2} = 0,54 \text{ m}^2$.

2.5 Vannføringstest med vannføringsplitter

Vannføringsplitteren har to utløp som fordeler vann fra taknedløp til blomsterkasse og fordrøyningskamre. Ved installering av miniregnbed kobles splitteren på taknedløpet og miniregnbedet. Øvre utløp i splitterens side leder vann til blomsterkasse gjennom en slange som er gjennomhullet i underkanten, mens nedre utløp i bunnen leder vann til fordrøyningskamrene gjennom innløpskammer K1. Hensikten er at små vannføringer skal ledes til infiltrasjon og vanning av planter i blomsterbed, mens større vannføringer ledes direkte til fordrøyning. Splitterens dimensjoner er vist i Figur 2.13.



Figur 2.13: Skisse av vannføringsplitter med dimensjoner (GRAF, 2020).

Vannføringstester ble gjennomført med vannføringsplitteren for å finne maksimalvannføring som ledes ut til blomsterkassen. Maksimalvannføringen kan benyttes som en terskelverdi i modelleringen av miniregnbedet. Vannføringer lavere enn terskelverdien vil ledes til blomsterkasse, mens vannføringer som overskrider terskelverdien vil føres til fordrøyningskamrene.

For testing av vannføringsplitter gjelder samme utgangspunkt som testing av infiltrasjonshastighet i jorda. Det fins en rekke ulike typer vannføringsplittere med variasjon i dimensjoner, funksjoner og terskelverdier. For å få et inntrykk av hvordan vannføringsplitteren fordeler takvann mellom blomsterkasse og fordrøyningskamre er det gjennomført forsøk for mål av maksimalvannføring ut av øvre utløp.

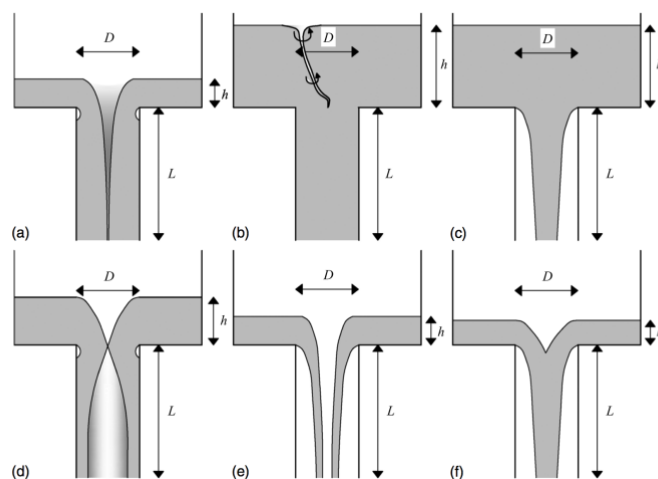
2.5.1 Fremgangsmåte

Nødvendig utstyr for gjennomføring av forsøkene er vannføringssplitter, et taknedløp i standarddimensjoner, vanntilførsel, målebeger og stoppeklokke. Taknedløp og strømningssplitter er vist i Figur 2.14. Testene ble gjennomført ved å feste vannføringssplitteren på et avskåret taknedløp i standarddimensjoner og tilføre systemet vann gjennom en hageslange som føres til toppen av taknedløpet. Hageslangen ble satt til å tilføre maksimal vannføring og ble rotert inntil indre vegg i taknedløpet, slik at vann både ledes i midten og langs indre kant av nedløpet, slik det vil gjøre i en vanlig takrenne.



Figur 2.14: Foto fra forsøk med vannføringssplitter tilkoblet taknedløp. Foto: Johanne Grøndahl Klausen.

Eksempler på ulike strømningsregimer i taknedløp er vist i Figur 2.15. De ulike strømningsregimene i taknedløpet avhenger av utforming, dimensjoner og vannføring. Vannføringssplitteren baserer seg på en antagelse om at mindre vannføringer vil følge taknedløpets indre vegg, mens høyere vannføringer vil ta opp en større del av tverrsnittsarealet, vist eksempelvis i (a) og (b) i figuren.



Figur 2.15: Eksempler på strømningsregimer der (a) viser lavere strømning som følger indre vegg langs nedløp og (b) viser fullt nedløp som følge av større vannføring (Padulano & Del Giudice, 2018).

Gjennom forsøket oppstår det vannføring ut av øvre utløp i vannføringsplitter, som skal lede vann til blomsterkasse, og ut av bunnen, som skal lede takvann direkte til fordrøyningskamrene. Vannføring ut av vannføringsplitterens øvre utløp ble målt ved bruk av målebeger og stoppeklokke. Målebegeret ble plassert direkte under utløpet og tiden det tok å fylle begeret til et kjent nivå ble målt. Forsøket ble gjennomført flere ganger for å kunne beregne en snittverdi for maksimalvannføring gjennom det øvre utløpet.

2.5.2 Feilkilder

Vannføringen i hageslangen var ikke kjent og det ble ikke gjort målinger av vannføringen som ledes direkte til fordrøyningskammer. Det er derfor noe usikkert om målt vannføring ut av splitterens øvre utløp kan ha blitt påvirket eller begrenset av måten forsøket ble utført på eller hageslangens maksimalkapasitet. Ved forsøk ble ikke vannføringsplitter montert fast i taknedløp og miniregnbed, noe som også kan påvirke vannstrømningen gjennom splitteren.

2.6 Manuell modellering av vannføringsplitter

I SWMM kan en *divider* legges inn i en modell for å fordele vannføring mellom ulike elementer automatisk. Blomsterkassen og fordrøyningskamrene krever ulikt format på tilførte vannføringer. Blomsterkassen får tilført vann gjennom en *Rain Gage* som simulerer nedbør på et nedbørfelt (mm/time), mens fordrøyningskammer kan få tilført

vann direkte, som en vannføring (l/s). Derfor ble vannføringssplitteren modellert manuelt ved å beregne vannføringene hver for seg, i form av et delt trekantregn.

2.6.1 Fremgangsmåte

Maksimal vannføring ut av øvre utløp i vannføringssplitteren blir videre brukt som terskelverdi for den manuelle modelleringen av vannføringssplitteren, med $Q_{terskel} = 0,146$ l/s. Vannføringer til og med denne terskelverdien føres til blomsterkasse, mens vannføringer som overgår terskelverdien føres videre til fordrøyningskammer.

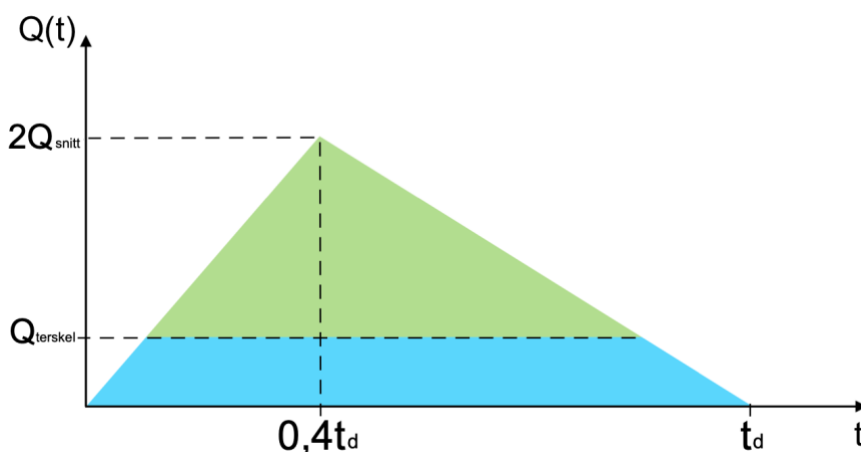
Vannføring til blomsterkasse ($Q_{blomst}(t)$) og vannføring direkte til fordrøyningskammer ($Q_{kammer}(t)$) kan uttrykkes slik (V. Nilsen, personlig kommunikasjon, 19.03.2020):

$$Q_{blomst}(t) = \begin{cases} Q_{nedbør}(t), & Q_{nedbør}(t) < Q_{terskel} \\ Q_{terskel}, & Q_{nedbør}(t) \geq Q_{terskel} \end{cases} \quad (2.4)$$

$$Q_{kammer}(t) = \begin{cases} 0, & Q_{nedbør}(t) < Q_{terskel} \\ Q_{nedbør}(t) - Q_{terskel}, & Q_{nedbør}(t) \geq Q_{terskel} \end{cases} \quad (2.5)$$

2.6.2 Trekantregn

For simulering av nedbørhendelser er det vanlig å benytte trekantregn som en forenkling av virkeligheten. Ved bruk av denne formen på innløpshydrogram er spissavrenning to ganger størrelsen til gjennomsnittlig nedbørintensitet. Tidspunkt for spissavrenning oppstår i følge Chin et sted mellom $0,32t_d$ og $0,51 t_d$ (Chin, 2013). Tidspunkt for spissavrenning (t_p) er derfor valgt til å være $0,4t_d$. Varighet og snittintensitet hentes fra dimensjonerende nedbørhendelser for aktuelle hendelser og gjentaksintervall. Trekantregnet deles i to, vist i Figur 2.16, separert av $Q_{terskel}$.



Figur 2.16: Utforming av trekantregn der t_d er nedbørhendelsens varighet, $2Q_{snitt}$ er spissavrenning, $0,4t_d$ er tidspunkt for spissavrenning og $Q_{terskel}$ markerer terskelen før vannføringssplitteren fører vann direkte til fordrøyningskamre. Grønt areal ledes til fordrøyningskamre, blått areal ledes til blomsterkasse. Q og t_d hentes fra Tabell 2.3.

Beregninger av hver nedbørhendelse er gjort i Excel. Stigningstall kan beregnes slik (V. Nilsen, personlig kommunikasjon, 08.10.2019):

Stigningstall for $Q(t)$ når $t < 0,4t_d$:

$$m_1 = \frac{2Q_{snitt}}{0,4t_d} \quad (2.6)$$

Stigningstall for $Q(t)$ når $t > 0,4t_d$:

$$m_2 = \frac{-2Q_{snitt}}{t_d - t_p} \quad (2.7)$$

Ettersom øvre og nedre del av trekantregn ledes til hver sin del av systemet, må også tidspunktet $t_{terskel}$ være kjent. Vannføring til fordrøyningskammer begynner ved $t = t_{terskel,1}$ og slutter ved $t = t_{terskel,2}$

$$t_{terskel,1} = \frac{Q_{snitt}}{m_1} \quad (2.8)$$

$$t_{terskel,2} = \frac{Q_{snitt}}{m_2} + t_d \quad (2.9)$$

2.7 Simulering av nedbørhendelser

Kapittel 2 har til nå beskrevet hvordan modellen av miniregnbedet er bygd og kalibrert. Den ferdige modellen kan så anvendes i simuleringer av utvalgte nedbørhendelser. Resultatene fra simuleringene benyttes til å undersøke fordrøyningsvirkningen til miniregnbedet.

2.7.1 Valg av nedbørhendelser

Et miniregnbed er beregnet på å benyttes til trinn 1 og 2 i tretrinnsstrategien. Dette innebærer infiltrasjon og fordrøying av små og store regnhendelser, mens ekstremnedbør håndteres i trinn 3 gjennom å sikre trygge flomveier. Med utgangspunkt i trinn 1 og 2 er følgende nedbørhendelser valgt ut for testing: regnhendelser med varighet 1 til 60 minutter og gjentaksintervall 2 til 20 år. Regnhendelsene er vist i Tabell 2.3, konvertert fra gjennomsnittlig nedbørintensitet til snittavrenning ut av taknedløpet fra et takareal, $A_{\text{tak}} = 50 \text{ m}^2$. Dimensjonerende nedbør er vist grafisk i Figur V. 10. For et taknedløp med standarddimensjoner, for eksempel 75 mm diameter nedløp og 100 mm renne, anbefales det av SINTEF Byggforsk et maksimalt takareal på 50 m^2 per taknedløp (SINTEF Byggforsk, 2017).

Tabell 2.3: Nedbørdata hentet fra dimensjonerende nedbør (IVF) fra Blindern målestasjon omregnet til vannføring ut av taknedløp med tilhørende takareal 50 m^2 (Norsk klimaservicesenter, 2020).

Nedbør konvertert til avrenning fra tak (l/s)										
Gjentaksintervall	Varighet (min)									
	1	2	3	5	10	15	20	30	45	60
2 år	1,465	1,237	1,120	0,939	0,700	0,571	0,492	0,390	0,302	0,246
5 år	1,864	1,605	1,463	1,255	0,939	0,785	0,684	0,544	0,429	0,348
10 år	2,127	1,849	1,691	1,464	1,097	0,927	0,811	0,645	0,513	0,416
20 år	2,380	2,082	1,909	1,665	1,249	1,062	0,933	0,743	0,593	0,482

De utvalgte nedbørhendelsene i Tabell 2.3 simuleres i den kalibrerte modellen av miniregnbedet. Utløpshydrogram fra hver simulering hentes ut fra utløpsnoden (UT) og legges inn i Excel sammen med tilhørende trekantregn. Innløpshydrogrammet viser da hvordan vannføringen ut av taknedløpet ville artet seg uten håndtering i miniregnbed. Med innløps- og utløpshydrogram i samme figur kan avrenning fra tak med og uten håndtering i miniregnbed enkelt sammenlignes.

2.7.2 Forenklinger og antagelser

Utformingen av de simulerte nedbørhendelsene er basert på forenklinger og antagelser. Trekantregn er en forenklet fremstilling av avrenningsmønster ved en nedbørhendelse, det ses bort fra regn som faller direkte på miniregnbedets blomsterbed og det antas at takrenne og taknedløp ikke er begrensende faktorer for tilførte vannmengder.

Antagelse om takstørrelse

Dataene brukt i de simulerte regnhendelsene er hentet fra IVF-kurver fra Blindern målestasjon. Nedbørdataene gis i enheten (l/s*ha) slik at vannføringer kan beregnes for aktuelt nedbørfelt. Et miniregnbed får tilført vannmengder fra et taknedløp, altså er miniregnbedets nedbørfelt lik nedløpets tilhørende takareal. I følge SINTEF er det vanlig å benytte et standardareal på maksimalt 50 m^2 per nedløp (SINTEF Byggforsk, 2017). Denne standarden benyttes som takareal for beregninger av tilført vannføring til miniregnbedet. På den måten blir systemets fordrøyningsvirkning testet for størst mulig takareal per nedløp.

Regn direkte på systemet

Det er besluttet å se bort fra regn som faller direkte på miniregnbedets overflate i blomsterbedet. Miniregnbedets overflateareal er $0,6264 \text{ m}^2$. Dette utgjør 1,3 prosent av et takareal på 50 m^2 . Miniregnbed kan installeres inntil husvegger og stå plassert helt eller delvis under tak. Derfor ble det besluttet å se bort fra eventuell nedbør direkte på systemet.

Renne og nedløp som begrensende faktor

Det antas at taknedløp og takrenne ikke er begrensende faktorer for miniregnbedets tilførte vannmengder. Et miniregnbed skal håndtere små og store regnhendelser, men ikke ekstremhendelser, i tråd med trinn 1 og 2 i tretrinnsstrategien. Dersom taknedløp eller -renne begrenser tilførte vannmengder ved slike hendelser, kan det argumenteres for at dimensjoneringen av nedløp og renne er for liten.

2.8 Optimalisering

Optimaliseringen av miniregnbedet svarer på del to av målbeskrivelsen for gradsopgaven. Forslag til forbedringer gis gjennom et tabellverk for dimensjonering som øker systemets fordrøyningsvirkning. Tabellverket utarbeides ved å undersøke hvordan endringer av dimensjoner og indre design i modellen påvirker maksimalvannføringen ut av miniregnbedet ved de utvalgte nedbørhendelsene. Først vil det være nyttig å definere en øvre grense for maksimalvannføring ut av miniregnbedet.

2.8.1 Hva er god nok fordrøyningssevne?

I optimaliseringsarbeidet er det hensiktsmessig å definere en øvre grense for tillatt avrenning fra systemet. En slik grense kan tilpasses lokale forhold og krav, avhengig om det er tenkt utslipp til lokalt terreng eller påkobling til kommunal overvannsledning eller fellesledning. Oslo kommune krever i utgangspunktet at overvann håndteres åpent på lokal tomt, dersom det er teknisk mulig. I veilederen «Overvannshåndtering – en veileder for utbygger» (Vann- og avløpsetaten, 2017), oppgis grenseverdier for maksimalt tillatt påslipp av overvann til kommunens fellesledninger, vist i Tabell 2.4. Miniregnbedet bør ideelt sett ha utslipp til lokalt terreng, men for å definere grenseverdi som optimaliseringen kan sikte mot, tas det utgangspunkt i grenseverdiene fra denne tabellen.

Ved bruk av takarealet på 50 m^2 som totalt tiltaksareal, viser Tabell 2.4 at maksimalt tillatt påslipp er 0 l/s. Miniregnbedet har ikke som hensikt å stoppe, men fordrøye avrenningen fra tak. Det tas derfor utgangspunkt i neste grenseverdi. For et totalt tiltaksareal på 0,1 ha er det tillatt med påslipp opp til 2,0 l/s. Dette gir maksimalt tillatt påslipp på 0,1 l/s for takarealet på 50 m^2 .

2.8.2 Fremgangsmåte for optimalisering

Miniregnbedets kapasitet kan enkelt økes ved å utvide systemets ytre dimensjoner, men dette kan ta opp dyrebart overflateareal i byrommet. Systemets ytre dimensjoner er derfor beholdt så langt det har latt seg gjøre, mens fordrøyningskamrenes indre design og dimensjoner endres. utfordringen er å finne en god balanse mellom størst mulig fordrøyningssevne og minst mulig utvidelse av

systemets volum. Det originale designet av miniregnbedet er beholdt, med de originale funksjonene og plasseringene av blomsterkasse og fordrøyningskamre. Variasjoner i hullmønstre, diametere og kammerareal er utprøvd for å finne forslag til dimensjoner som oppfyller maksimalkravet. Vedlegg 3 viser de dimensjoner og design som er justert i de endelige forslagene til forbedringer.

Tabell 2.4: Maksimalt tillatt påslipp for overvann fra en tomt til Oslo kommunes fellesledning (Vann- og avløpsetaten, 2017).

Minste innvendig ledningsdimensjon	Totalt tiltaksareal	Maksimalt påslipp
[mm]	[ha]	[l/s]
< 300	< 0,1	0
300	0,1	2
380	0,3	4
450	0,5	6
500	0,8	8
550	1	10
> 550	> 1	≤ 10

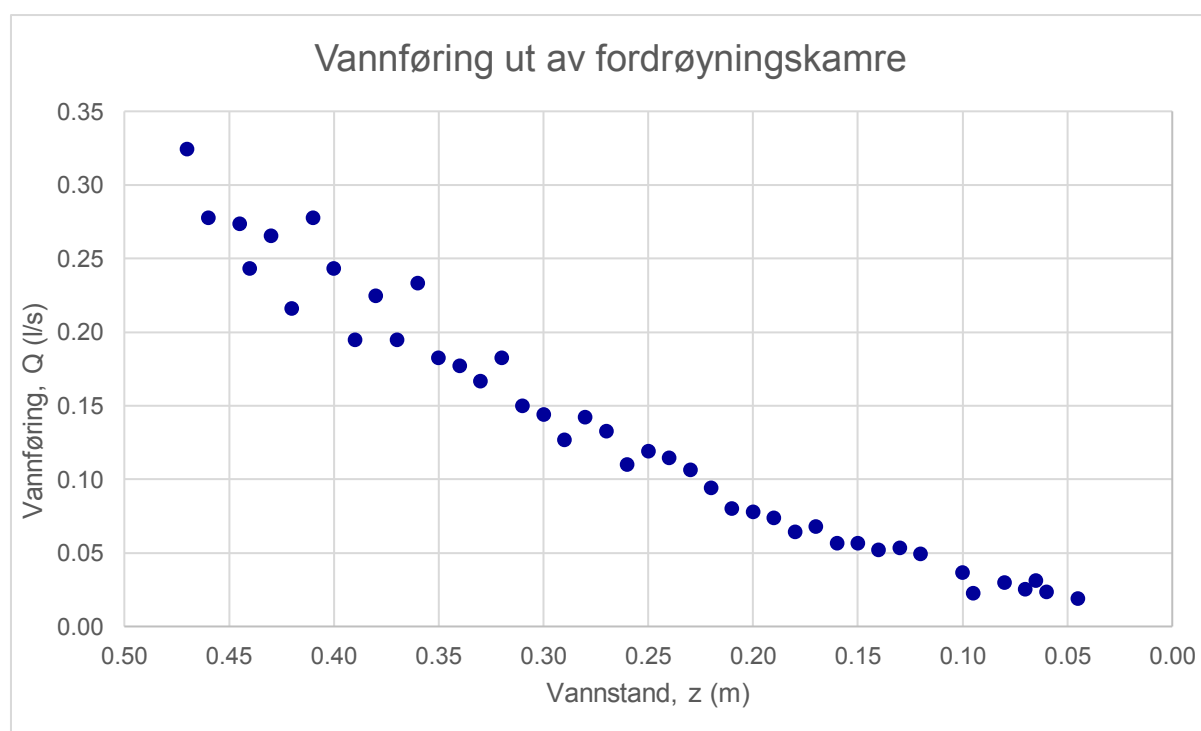
3 Resultater

Miniregnbedets fordrøyningsvirkning er undersøkt ved å simulere nedbørhendelser i en modell i SWMM. Dette besvarer første del av oppgavens målbeskrivelse.

Modellen er basert på forsøk gjennomført i hydraulisk laboratorium, og første del av dette kapittelet viser resultatene fra disse forsøkene. Deretter vises resultatene fra nedbørsimuleringer i modellen og det foreslås hvordan miniregnbedet kan optimaliseres, i tråd med andre del av gradsoppgavens målbeskrivelse.

3.1 Kalibrerte utløpskoeffisienter

Vannføring ut av fordrøyningskamrene som funksjon av vannstand er benyttet til å kalibrere utløpskoeffisienter for blender. Resultatet fra de hydrauliske testene i Forsøk 2 er vist i Figur 3.1 i form av beregnet vannføring ut av kammeret som funksjon av vannstand.

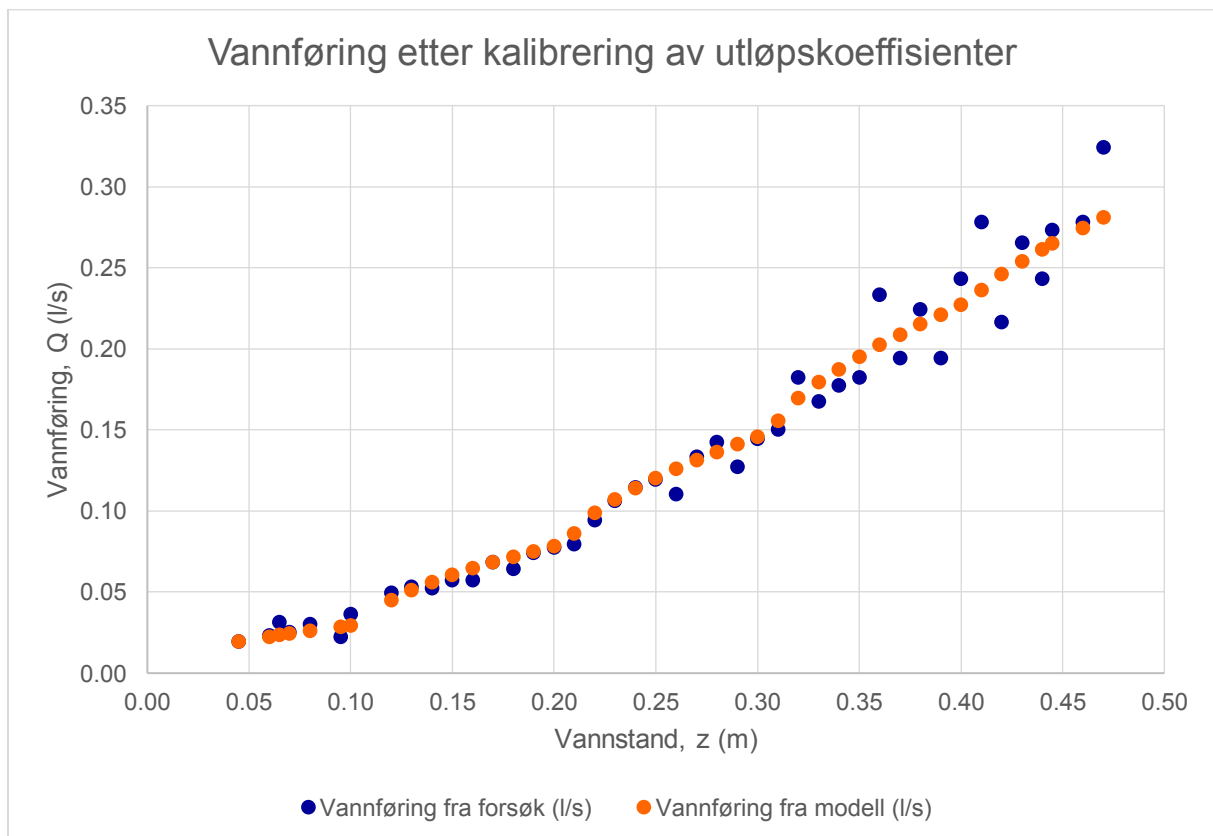


Figur 3.1: Vannføring (Q) ut av fordrøyningskamre som funksjon av vannstand i kamre (z).

Den høyeste vannføringen finner sted ved start når vannstanden er høy og avtar deretter med synkende vannstand. Ved lav vannstand er det totale arealet for

vannstrømning begrenset til færre hull. Ved høyere vannstand bidrar flere hull til vannføring og det totale strømningsarealet i Likning 2.3 blir større. Det var forventet at kurven ville være noe ujevn nærmere bunnen av kammeret, da det var utfordrende å gjøre nøyaktige avlesninger her. Derfor er det noe overraskende at kurven er mer uregelmessig ved de høye vannstandene.

I metodekapittelet viste Figur 2.9 en sammenstilling av vannføring som funksjon av vannstand fra forsøk og fra modell, der utløpskoeffisient for skarpkantet blende ble benyttet ($C_d = 0,61$). Hensikten med de hydrauliske forsøkene i fordrøyningskamrene var å kalibrere modellens utløpskoeffisienter slik at de to kurvene i Figur 2.9 nærmer seg hverandre så mye som mulig. Resultatet av kalibreringen er vist i Figur 3.2 og de kalibrerte utløpskoeffisientene er vist i Tabell 3.1.



Figur 3.2: Vannføring (Q) ut av fordrøyningskamre fra forsøk og fra kalibrert modell som funksjon av vannstand (z).

Tabell 3.1: Kalibrerte utløpskoeffisienter for blende H6-H10. Under forsøk ble det observert at H7 ga lavere vannføring enn resterende blender, og det så ut til at hullet ikke var ordentlig gjennomboret. I kalibreringen ble koeffisient for H7 funnet til å være 0,7, men utløpskoeffisient $C_d = 0,8$ benyttes i modellen med en antagelse om at det kun har skjedd en feil i produksjonen.

Kalibrerte utløpskoeffisienter					
Blende	H6	H7	H8	H9	H10
C_d	0,8	0,8 (0,7*)	0,8	0,8	0,8

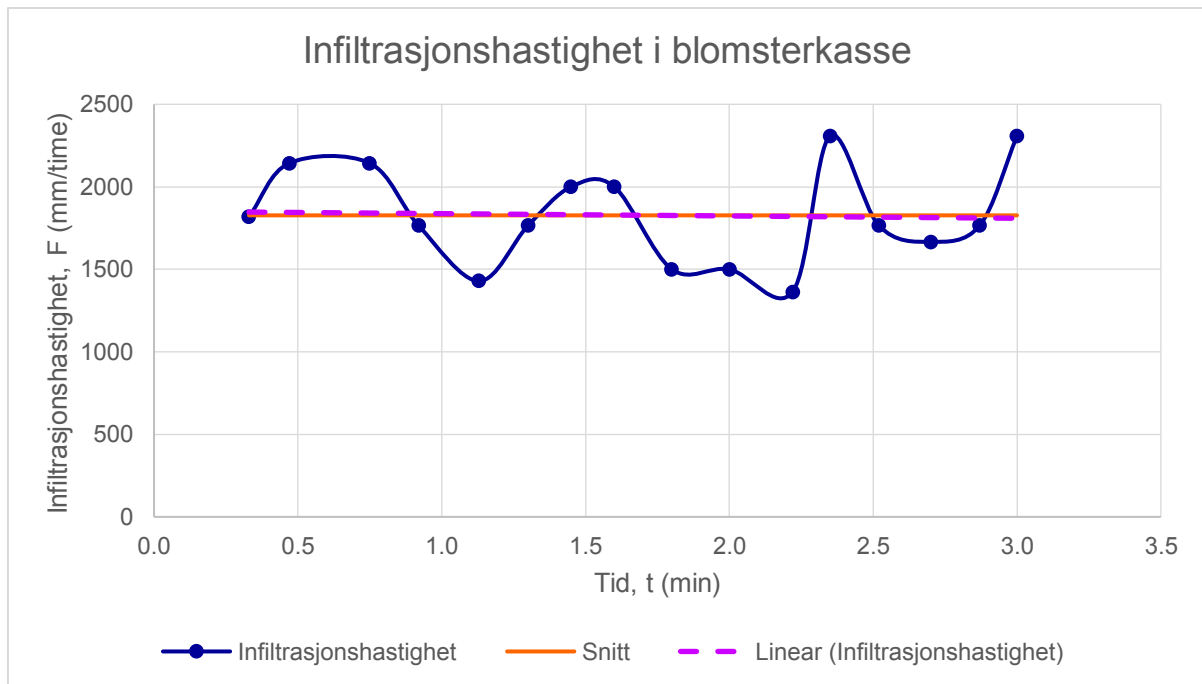
Figur 3.2 viser at vannføringen i modellen er høyere etter kalibrering. Figurens blå punkter markerer beregnet vannføring fra forsøk mens oransje punkter markerer simulert vannføring fra modell. Målte og simulerte verdier holder seg relativt like gjennom kurven, med størst differanse ved vannstand høyere enn 0,35 m.

Utløpskoeffisientene ble økt gradvis fra $C_d = 0,61$ til $C_d = 0,8$, til vannføringen i modellen ble den samme som fra forsøkene. Hullene i kammerveggen mot innløpskammeret (H1-H4, se Figur 2.10) er av samme type som de kalibrerte hullene. Det antas derfor i den kalibrerte modellen at utløpskoeffisient $C_d = 0,8$ også er gyldig for disse.

3.2 Infiltrasjonsevne i blomsterkasse

Rådataene fra infiltrasjonstestene i blomsterkassen er presentert i Vedlegg 2. Basert på dataene i Figur V. 2 kan vannføring ut av blomsterkassen beregnes med Likning 2.3. Deretter kan man finne infiltrasjonshastigheten i blomsterkassen ved å dele på blomsterkassens areal, som er lik fordrøyningskamrenes areal, $A_{K2} = 0,54 \text{ m}^2$.

Resultatet fra beregningene er vist i Figur 3.3.



Figur 3.3: Infiltrasjonshastighet (F) i blomsterkassen som funksjon av tid (t). Blå kurve markerer beregnet infiltrasjonshastighet basert på målt endring i vannstand, oransje linje er snittverdi for infiltrasjonshastighet og lilla, stiplet linje viser trendlinje for infiltrasjonshastighetens kurve.

Figuren viser at infiltrasjonshastigheten i blomsterbedet varierer, tilsynelatende uten systematikk med vannstanden. Trendlinjen, markert i fiolett, stiplet linje, ser ut til å holde seg tilnærmet vannrett på snittlinjen, markert i oransje. Det er stor differanse mellom ytterpunktene for største og minste infiltrasjonsevne, på henholdsvis 2308 mm/time og 1364 mm/time. Snittverdi for infiltrasjonshastigheten er på 1827 mm/time og denne verdien benyttes i modelleringen av blomsterkassen i SWMM.

3.3 Terskelverdi i vannføringssplitter

Fordelingen av vannføring mellom blomsterkasse og fordrøyningskamre bestemmes av vannføringssplitterens maksimale vannføring ut av øvre utløp. Testene med vannføringssplitteren ga følgende resultat, vist i Tabell 3.2:

Tabell 3.2: Resultater fra tester med vannføringssplitter. Maksimal vannføring ut av vannføringssplitterens øvre utløp ($Q_{terskel}$) er beregnet basert på tiden det tok å fylle et målebeger på 3,6 liter.

Forsøk	Volum (l)	Tid (s)	$Q_{terskel}$ (l/s)
1	3,6	24,6	0,146
2	3,6	25,8	0,140
3	3,6	25,0	0,150
4	3,6	24,7	0,146

Basert på de fire målingene ble det funnet at snittverdi for maksimalvannføring ut av vannføringssplitterens øvre utløp til blomsterkassen er 0,146 l/s med standardavvik +/- 0,004 l/s. Denne verdien benyttes som terskelverdi i den manuelle modelleringen av vannføringssplitteren i SWMM. Alle vannføringer høyere enn terskelverdien ledes direkte til innløpskammer K1 gjennom splitterens nedre utløp.

3.4 Modellens håndtering av simulerte nedbørhendelser

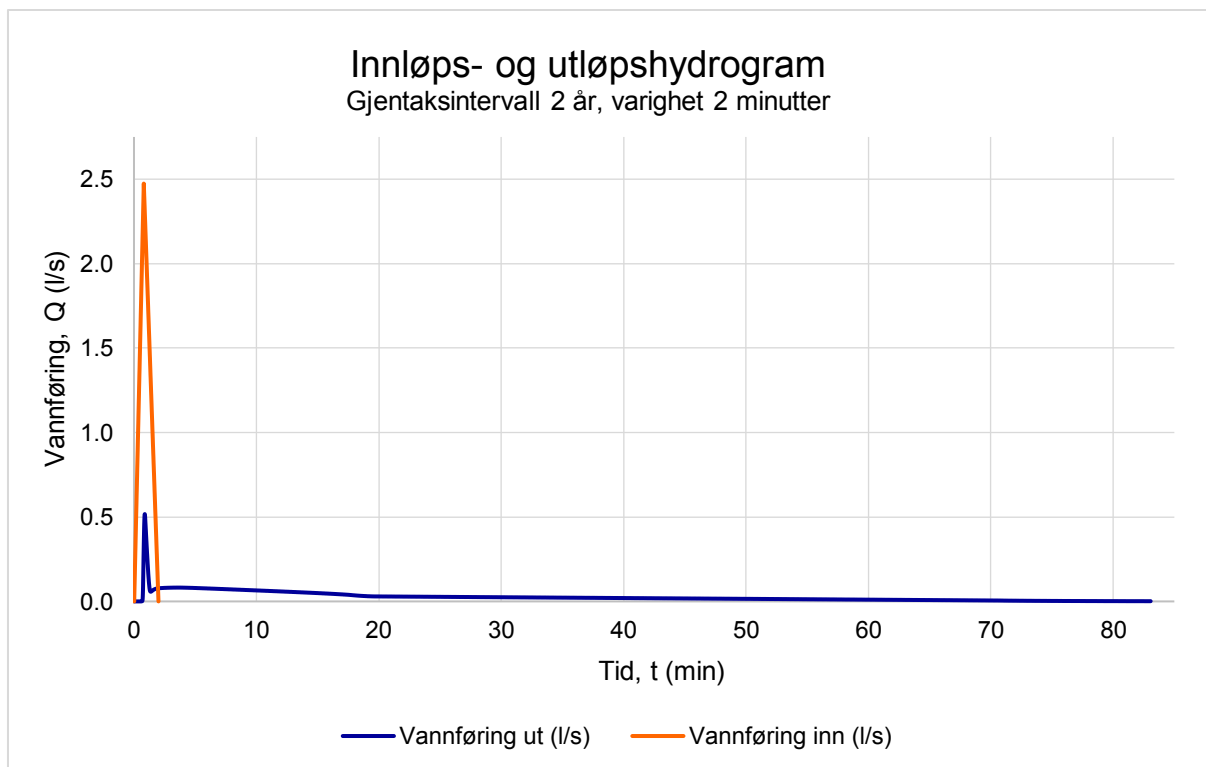
Modellen av miniregnbedet er testet for de simulerte regnhendelsene fra Tabell 2.3 for å undersøke fordrøyningsvirkningen til et miniregnbed ved dimensjonerende nedbørhendelser for Oslo. I dette delkapittelet vil først utvalgte utløpshydrogram trekkes fram som typiske eksempler på fordrøyningsvirkningen av korte hendelser, nedbørhendelser av middels varighet og lengre hendelser. Det er særlig tre punkter som er interessante å undersøke i utløpshydrogrammene:

- Tidspunkt for spissavrenning ut av miniregnbedet, $t_{p,avrenning}$
- Maksimalvannføring ut av miniregnbedet, $Q_{maks,avrenning}$
- Effektivt fordrøyningsvolum, V_E

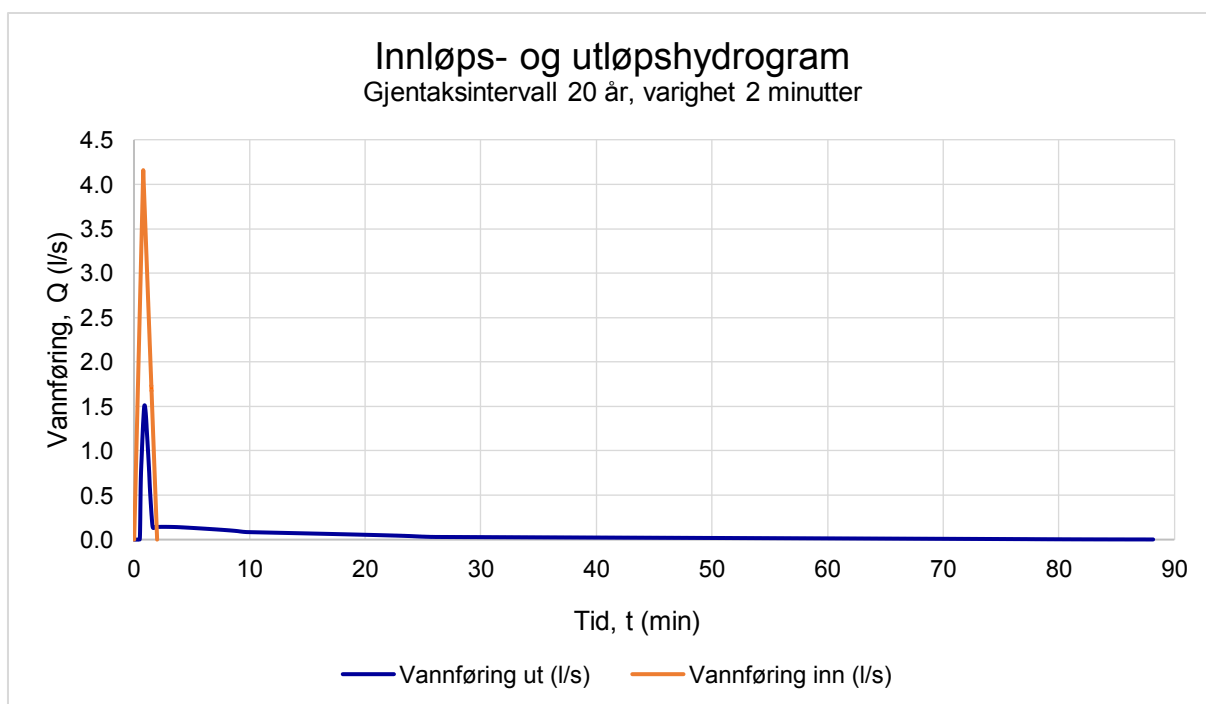
3.4.1 Korte nedbørhendelser

To hendelser med to minutters varighet og henholdsvis 2 og 20 års gjentaksintervall trekkes fram som eksempler på korte nedbørhendelser. Figur 3.4 og Figur 3.5 viser modellens innløps- og utløpshydrogram for de to hendelsene. $Q_{maks,avrenning}$ oppstår raskt i begge simuleringene, før avrenningen synker og stabiliserer seg på et lavere nivå.

Utløpshydrogrammene viser at spissavrenningen fra takarealet blir betydelig dempet gjennom bruk av miniregnbed ved disse hendelsene. For toårshendelsen er tidspunkt for spissavrenning, $t_{p,avrenning}$, forsinket med fem sekunder, maksimal vannføring er redusert med 79 prosent og tidspunkt for avrenningshendelsens start, t_0 , er forsinket med 16 sekunder. For 20-årshendelsen er $t_{p,avrenning}$ forsinket med syv sekunder, $Q_{maks,avrenning}$ reduseres med 64 prosent og t_0 er forsinket med 28 sekunder.



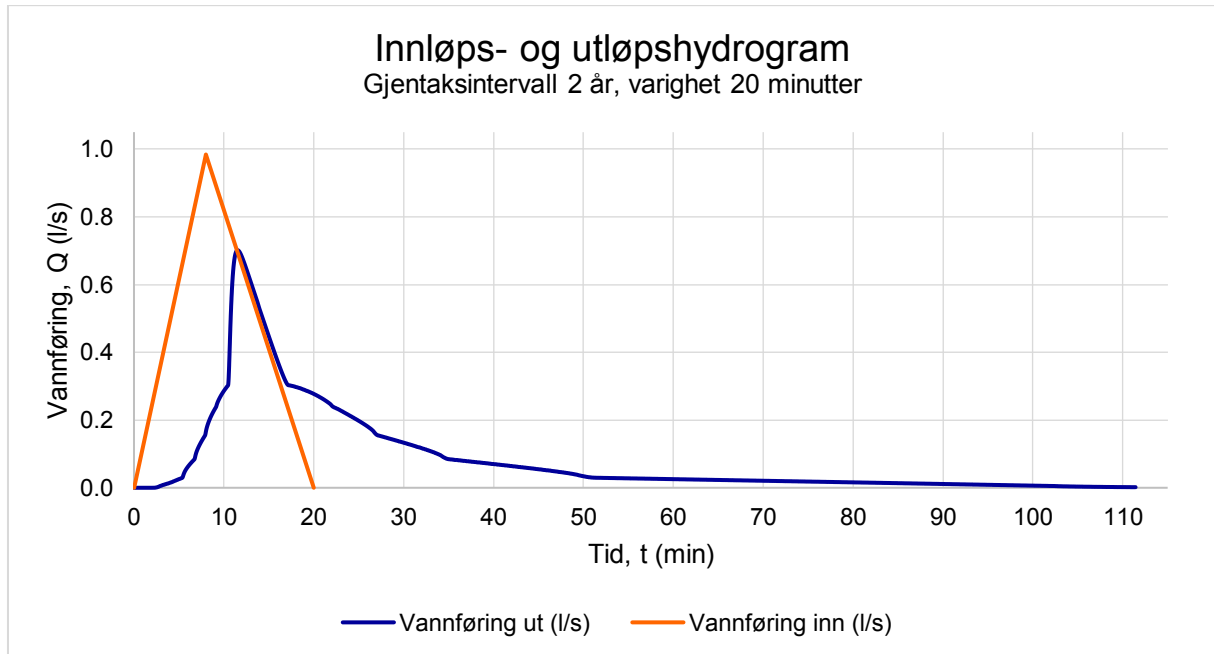
Figur 3.4: Innløps- og utløpshydrogram ($Q(t)$) fra SWMM-modell av miniregnbed ved nedbørhendelse med 2 års gjentaksintervall og 2 minutters varighet.



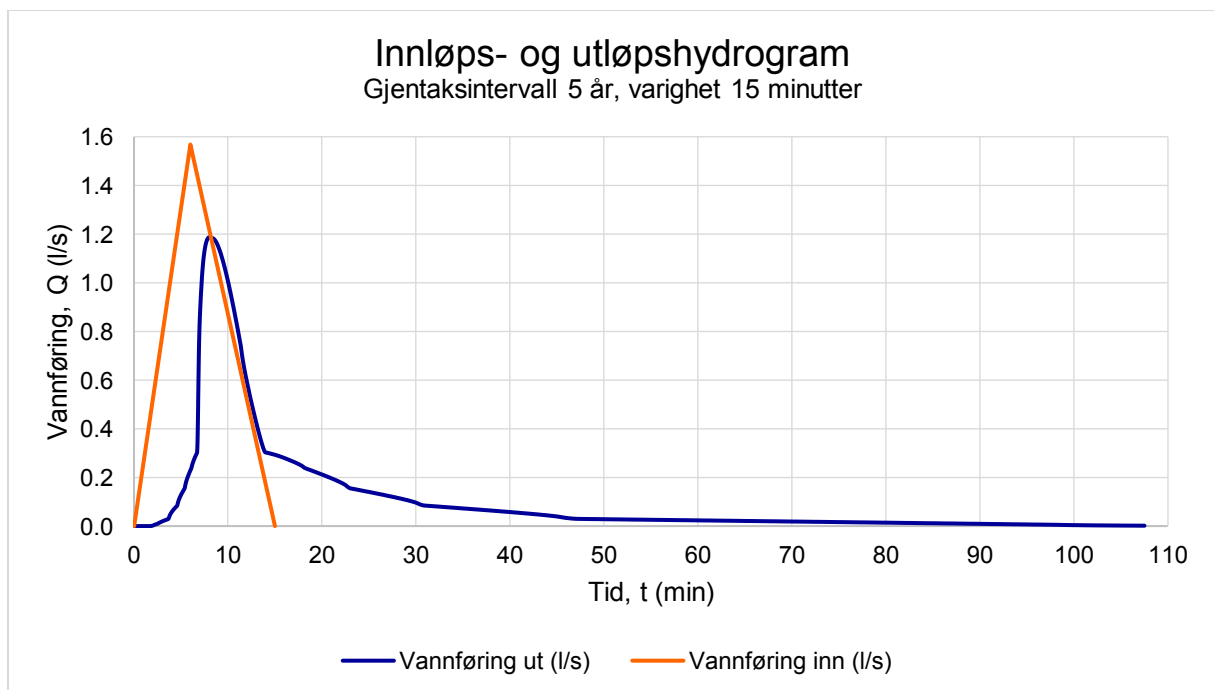
Figur 3.5: Innløps- og utløpshydrogram ($Q(t)$) fra SWMM-modell av miniregnbed ved nedbørhendelse med 20 års gjentaksintervall og 2 minutters varighet.

3.4.2 Nedbørhendelser med middels varighet

Som eksempler på håndtering av nedbørhendelser med middels varighet vises to hendelser med to og fem års gjentaksintervall, og henholdsvis 20 og 15 minutters varighet. Hydrogrammene fra disse simuleringene er vist i Figur 3.6 og Figur 3.7.



Figur 3.6: Innløps- og utløpshydrogram ($Q(t)$) fra SWMM-modell av miniregnbed ved nedbørhendelse med 2 års gjentaksintervall og 20 minutters varighet.

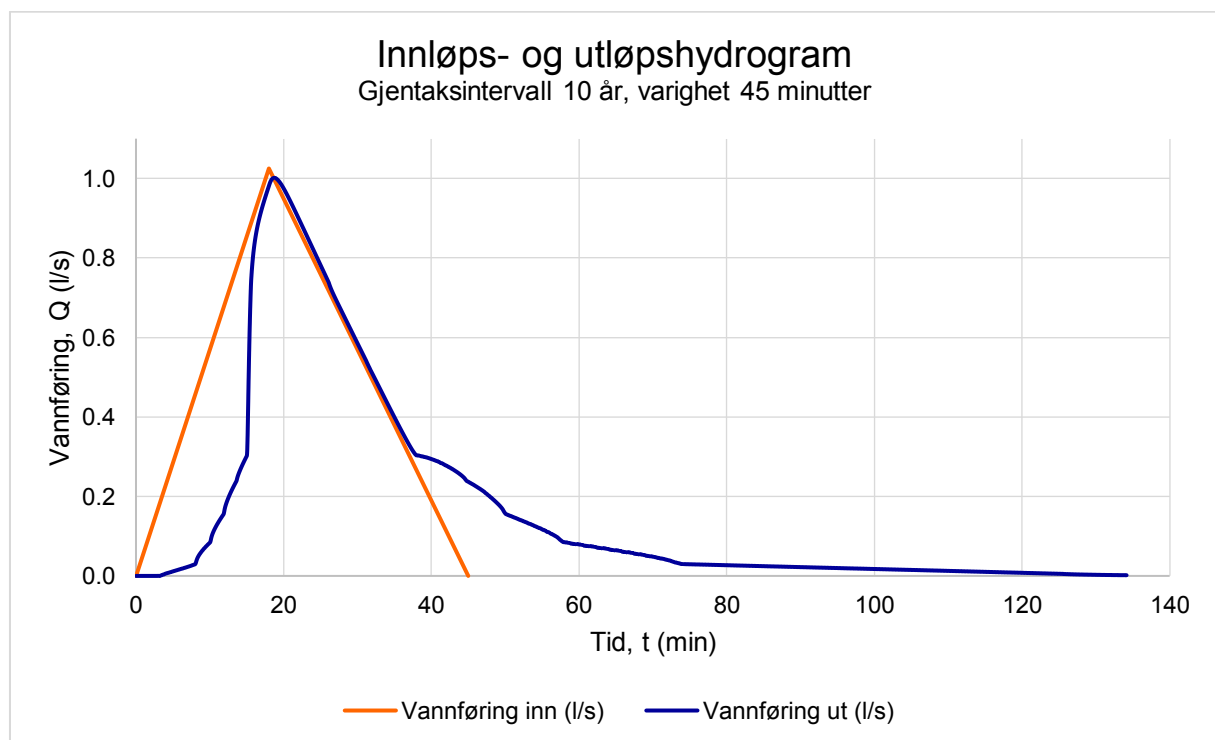


Figur 3.7: Innløps- og utløpshydrogram ($Q(t)$) fra SWMM-modell av miniregnbed ved nedbørhendelse med 5 års gjentaksintervall og 15 minutters varighet.

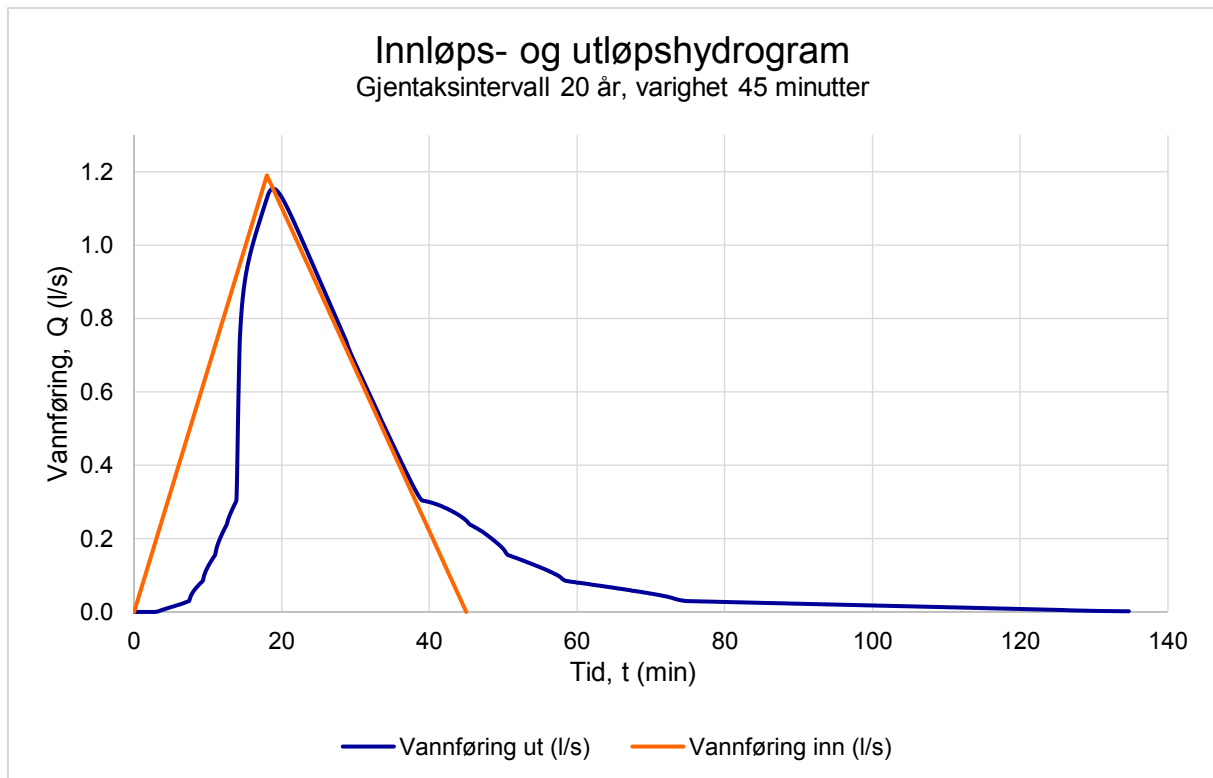
For femårshendelsen er $t_{p,avrenning}$ forsinket med 2 minutter og spissavrenningen redusert med 24 prosent. Figur 3.7 viser at $Q_{nedbør} = Q_{avrenning}$ ved $t = 8,1$ minutter. Her har ikke lenger miniregnbedet en fordrøyningseffekt på takvannet som kommer inn, fram til $Q_{nedbør}$ synker til 0,28 l/s ved $t = 13,4$ minutter. Effektivt fordrøyningsvolum, V_E , er ved denne hendelsen lik 438 liter. Toårshendelsen følger et lignende avrenningsmønster. Her forsinkes $t_{p,avrenning}$ med 3,5 minutter og spissavrenningen reduseres med 29 prosent. V_E er lik 409 liter.

3.4.3 Lengre nedbørhendelser

Miniregnbedets håndtering av lengre nedbørhendelser vises eksempelvis i Figur 3.8 og Figur 3.9. Figurene viser innløps- og utløpshydrogram for to nedbørhendelser med 10 og 20 års gjentakintervall og 45 minutters varighet.



Figur 3.8: Innløps- og utløpshydrogram ($Q(t)$) fra SWMM-modell av miniregnbed ved nedbørhendelse med 10 års gjentakintervall og 45 minutters varighet.



Figur 3.9: Innløps- og utløpshydrogram ($Q(t)$) fra SWMM-modell av miniregnbed ved nedbørhendelse med 20 års gjentaksintervall og 45 minutters varighet.

Figurene viser at avrenning for de to hendelsene følger samme mønster.

Miniregnbedets fordrøyningskapasitet overskrides mens nedbørkurven fortsatt er stigende, noe som kun fører til liten demping av spissavrenning og liten forsinkelse av $t_{p,avrenning}$. For tiårshendelsen dempes $Q_{maks,avrenning}$ med 3 prosent og $t_{p,avrenning}$ forsinkes kun med 0,6 minutter. For tjuerårshendelsen dempes spissavrenningen med 3 prosent og $t_{p,avrenning}$ forsinkes med 0,8 minutter. Effektivt fordrøyningsvolum er lik 606 liter for tiårshendelsen og 718 liter for tjuerårshendelsen.

3.4.4 Samlet oversikt fra alle simuleringer

Eksemplene på fordrøyningsvirkning ved ulike nedbørhendelser gir en visuell fremstilling av hvordan miniregnbedet påvirker og forsinker takvann. En samlet oversikt over resultatene for hver av de 40 simuleringene vises i Tabell 3.3 med følgende parametere:

- Tiden avrenningshendelsens start er forsinket med, $t_{0,forsinket}$
- Maksimalvannføring inn til miniregnbed, $Q_{maks,nedbør}$
- Maksimalvannføring ut av miniregnbed, $Q_{maks,avrenning}$
- Tidspunkt for maksimalvannføring inn til miniregnbed, $t_{p,nedbør}$
- Tidspunkt for maksimalvannføring ut av miniregnbed, $t_{p,avrenning}$

- Totalt nedbørvolum, $V_{nedbør}$
- Effektivt fordrøyningsvolum, V_E

Tabell 3.3: Resultater fra simuleringer av nedbørhendelser vist i Tabell 2.3, der $t_{0,forsinket}$ er antall minutter nedbørhendelsens start forsinkes, $Q_{maks,nedbør}$ er største vannføring inn til miniregnbedet, $Q_{maks,avrenning}$ er største vannføring ut av miniregnbedet, $t_{p,nedbør}$ er tidspunkt for spissavrenning inn til systemet, $t_{p,avrenning}$ er tidspunkt for spissavrenning ut av systemet, $V_{nedbør}$ er det totale nedbørvolumet og V_E er effektivt fordrøyningsvolum.

Resultater fra simuleringer								
Simulert nedbørhendelse		$t_{0,forsinket}$	$Q_{maks,nedbør}$	$Q_{maks,avrenning}$	$t_{p,nedbør}$	$t_{p,avrenning}$	$V_{nedbør}$	V_E
Gjentaksintervall	Varighet	(min)	(l/s)	(l/s)	(min)	(min)	(l)	(l)
2 år	1 min	0,38	2,93	0,69	0,4	0,52	88	88
	2 min	0,27	2,47	0,52	0,8	0,88	148	148
	3 min	0,32	2,24	0,37	1,2	1,28	202	202
	5 min	0,32	1,88	0,23	2,0	4,62	282	282
	10 min	0,32	1,40	0,55	4,0	7,68	420	367
	15 min	0,32	1,14	0,70	6,0	9,53	514	391
	20 min	2,33	0,98	0,70	8,0	11,45	590	409
	30 min	2,83	0,78	0,63	12,0	15,57	702	459
	45 min	3,85	0,60	0,51	18,0	22,12	814	551
	60 min	4,80	0,49	0,41	24,0	29,90	884	678
5 år	1 min	0,37	3,73	1,18	0,4	0,50	112	112
	2 min	0,55	3,21	1,00	0,8	0,88	193	193
	3 min	0,67	2,93	0,86	1,2	1,30	263	263
	5 min	0,87	2,51	0,64	2,0	2,08	377	377
	10 min	1,37	1,88	1,15	4,0	6,42	563	406
	15 min	1,78	1,57	1,19	6,0	7,98	706	438
	20 min	2,08	1,37	1,15	8,0	9,92	821	457
	30 min	2,58	1,09	1,01	12,0	13,37	978	486
	45 min	3,32	0,86	0,84	18,0	18,62	1157	550
	60 min	4,17	0,70	0,69	24,0	24,27	1253	630
10 år	1 min	0,33	4,25	1,43	0,4	0,50	127	127
	2 min	0,50	3,70	1,27	0,8	0,88	222	222
	3 min	0,63	3,38	1,15	1,2	1,30	304	304
	5 min	0,82	2,93	0,95	2,0	2,10	439	400
	10 min	1,27	2,19	1,44	4,0	5,75	658	454
	15 min	1,67	1,85	1,51	6,0	7,35	834	466
	20 min	1,95	1,62	1,44	8,0	9,07	973	478
	30 min	2,42	1,29	1,22	12,0	12,78	1161	518
	45 min	3,17	1,03	1,00	18,0	18,57	1384	606
	60 min	3,80	0,83	0,82	24,0	24,38	1498	697
20 år	1 min	0,32	4,76	1,65	0,4	0,52	143	143
	2 min	0,48	4,16	1,51	0,8	0,92	250	250
	3 min	0,60	3,80	1,40	1,2	1,32	344	344
	5 min	0,78	3,33	1,21	2,0	2,10	499	441
	10 min	1,18	2,50	1,74	4,0	5,47	749	505
	15 min	1,57	2,12	1,82	6,0	6,93	956	507
	20 min	1,87	1,87	1,73	8,0	8,60	1119	530
	30 min	2,33	1,49	1,44	12,0	12,23	1337	584
	45 min	3,00	1,19	1,15	18,0	18,78	1601	718
	60 min	3,62	0,96	0,95	24,0	24,58	1733	788

Forsinkelsen av avrenningshendelsens start ($t_{0,\text{forsinket}}$) øker med stigende varighet for nedbørhendelse. De laveste vannføringene inn til systemet skjer ved de lengste hendelsene, og som følge av nedbørens trekantform er det lav vannføring tidlig i nedbørhendelsen. Forsinkelsen er størst for nedbørhendelse med to års gjentaksintervall og 60 minutters varighet.

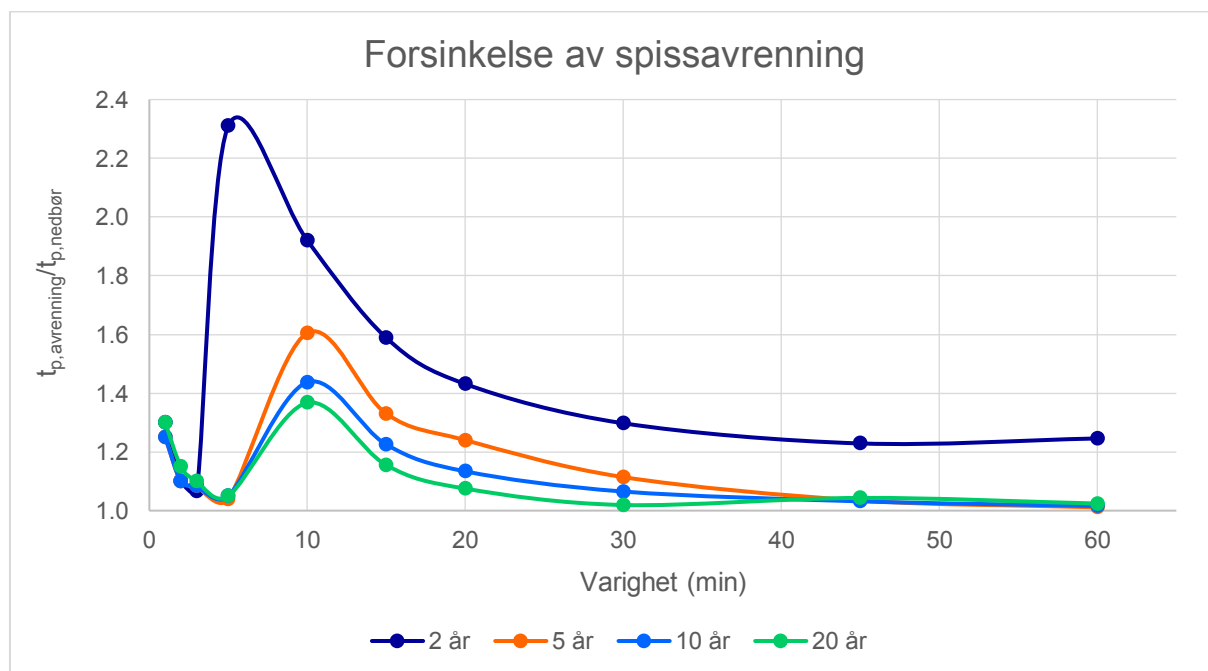
Maksimalavrenning ut fra miniregnbedet varierer mellom 0,23 og 1,82 l/s, med lavest $Q_{\text{maks,avrenning}}$ ved nedbørhendelse med to års gjentaksintervall og fem minutters varighet, og høyest $Q_{\text{maks,avrenning}}$ ved nedbørhendelse med 20 års gjentaksintervall og 15 minutters varighet. Effektivt fordrøyningsvolum er størst for hendelsene med 60 minutters varighet, ettersom det totale nedbørvolumet er større for disse hendelsene. Basert på dataene i Tabell 3.3 kan følgende forhold undersøkes videre:

$$\frac{t_{p,\text{avrenning}}}{t_{p,\text{nedbør}}}$$

$$\frac{Q_{\text{maks,ut}}}{Q_{\text{maks,inn}}}$$

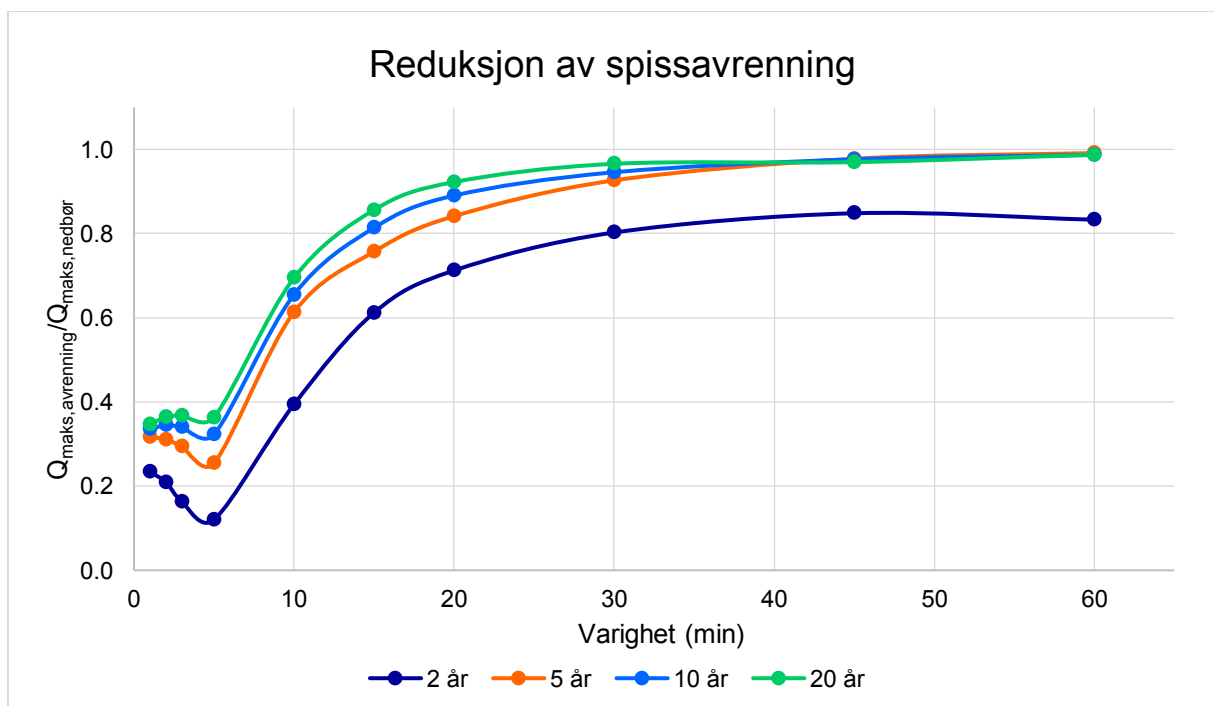
$$\frac{V_E}{V_{\text{nedbør}}}$$

Ved å plote disse forholdene for hvert gjentaksintervall blir det mulig å sammenligne miniregnbedets fordrøyningsvirkning for ulike nedbørhendelser. Forholdene er plottet i Figur 3.10, Figur 3.11 og Figur 3.12 som funksjon av nedbørhendelsens varighet.



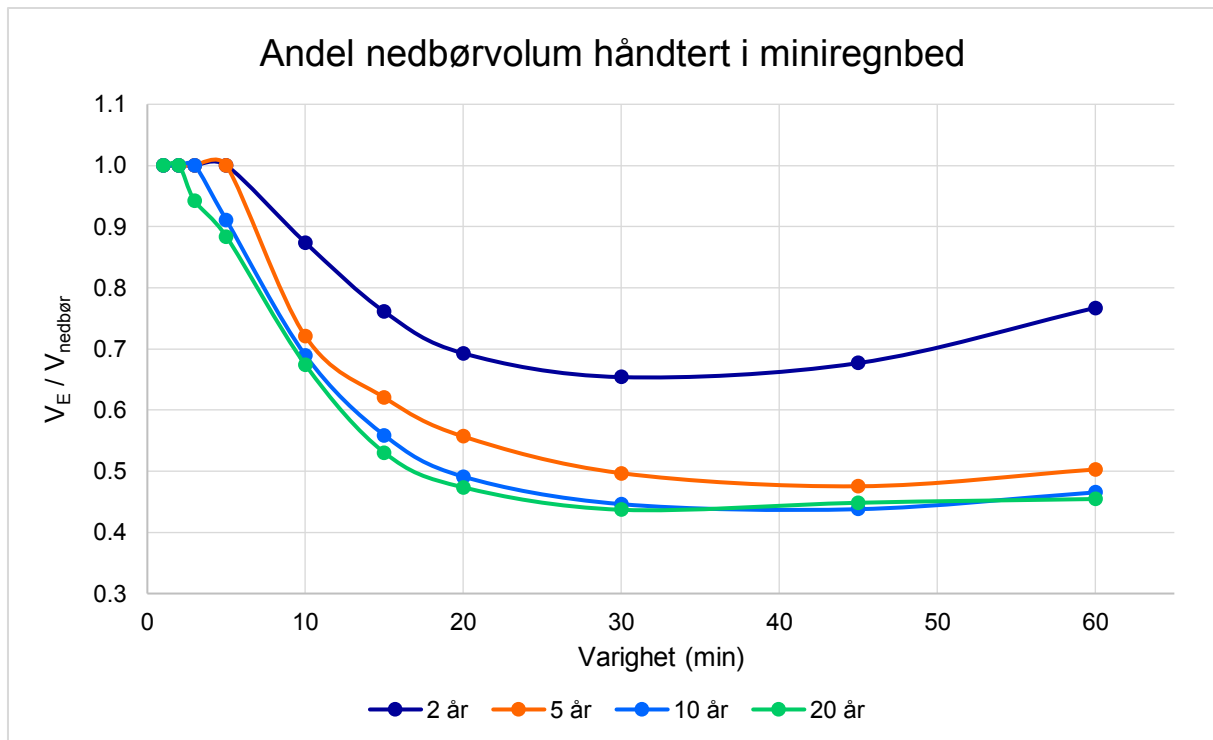
Figur 3.10: Forholdet mellom tidspunkt for spissavrenning ut av miniregnbedet ($t_{p,\text{avrenning}}$) og inn til miniregnbedet ($t_{p,\text{nedbør}}$) for ulike nedbørhendelser som funksjon av nedbørhendelsens varighet.

Forholdet mellom $t_{p,avrenning}$ og $t_{p,nedbør}$ forteller hvor mye spissavrenningen fra tak *forsinkes* gjennom et miniregnbed. Spissavrenning vil aldri fremskyndes av et miniregnbed, derfor er forholdstallet alltid større eller lik 1. En høy verdi indikerer stor forsinkelse, mens en verdi nærmere 1 indikerer at spissavrenningen fra miniregnbedet oppstår nærmere spissavrenningen fra taket. Figur 3.10 viser at nedbørhendelser med to års gjentakintervall har størst forsinkelse, mens forholdstallet for de andre gjentakintervallene begynner å gå mot 1 ved varighet lenger enn 20 minutter.



Figur 3.11: Forholdet mellom spissavrenning ut av miniregnbedet ($Q_{maks,avrenning}$) og inn til miniregnbedet ($Q_{maks,nedbør}$) for ulike nedbørhendelser som funksjon av nedbørhendelsens varighet.

Forholdet mellom $Q_{maks,avrenning}$ og $Q_{maks,nedbør}$ vil alltid være mindre eller lik 1. Forholdstallet forteller hvor mye spissavrenningen fra taket *reduseres* ved bruk av miniregnbed. En lav verdi i Figur 3.11 indikerer stor reduksjon, mens et tall nærmere 1 indikerer liten reduksjon av spissavrenning. Felles for alle gjentakintervallene er at avrenningen reduseres i størst grad for regnvarigheter mellom 1 og 5 minutter.



Figur 3.12: Forholdet mellom effektivt fordrøyningsvolum (V_E) og volum nedbør ($V_{nedbør}$) for ulike nedbørhendelser som funksjon av nedbørhendelsens varighet.

Forholdet mellom V_E og $V_{nedbør}$ forteller hvor stor andel av nedbørvolumet miniregnbedet har en fordrøyningsvirkning på. Forholdstallet vil alltid være mindre eller lik 1. Ved verdier lik eller nær 1 vil miniregnbedet ha fordrøyningsvirkning på henholdsvis hele eller store deler av det totale nedbørvolumet. Lavere verdier indikerer at systemet fylles opp og overbelastes. Også her gir de toårige nedbørhendelsene de beste resultatene, av de fire gjentakintervallene er det snittverdien til de toårige hendelsene som er nærmest 1. Alle gjentakintervallene har til felles at forholdstallet er lik 1 for regnvarigheter opp til og med fem minutter, altså blir hele nedbørvolumet for disse hendelsene håndtert i systemet.

3.5 Optimalisert modell

Hensikten med å optimalisere miniregnbedet er å oppnå bedre fordrøyningsvirkning for et bredere spekter av nedbørhendelser. Dette er gjort ved å endre modellens dimensjoner og indre design slik at $Q_{maks,avrenning}$ er mindre enn grenseverdien 0,1 l/s for alle simulerte nedbørhendelser. Tabell 3.4 og Tabell 3.5 viser optimaliseringen i form av forslag til dimensjoner som oppfyller kravet om $Q_{maks,avrenning} < 0,1$ l/s.

Optimaliseringen er gjort med utgangspunkt i vurderinger som fremgår i delkapittel 4.4.

Det er viktig å understreke at avrenningen fra miniregnbedet påvirkes av nedbørhendelsens form. I denne oppgaven benyttes trekantregn i simulering av regnhendelser, med maksimal intensitet ved $0,4t_d$. Andre former på nedbøren kan gi andre avrenningsmønstre. Tabellverket kan benyttes som et utgangspunkt for dimensjonering, men kan gi høyere vannføringer dersom nedbør tilføres i andre former.

Tabellene viser forslag til dimensjonering for regnhendelser med gjentakintervall 2 – 20 år og varighet 1 – 60 minutter. Q_{snitt} er gjennomsnittlig tilført vannføring, omregnet fra nedbørintensitet, I (l/s ha), til å gjelde for takarealet, $A_{\text{tak}} = 50 \text{ m}^2$. K1 og K3 er innløps- og utløpskammeret i miniregnbedet, mens K2 er fordrøyningskammeret. Høyder, hulldiametere og hullmønster A – J er illustrert i Figur V. 3 – Figur V. 5 i Vedlegg 3. Blomsterkassens areal er i alle forslagene lik arealet av kammer K2, og kassens dybde på 30 cm er bevart.

I samtlige optimaliseringsforslag er det lagt til et nytt hull, H_{ny} , i kammerveggen mellom innløpskammer og fordrøyningskammer, vist i Figur V. 3 i Vedlegg 3. Under forsøkene i laboratorium ble det stående vann i innløpskammeret, ettersom laveste hull er på 10 cm høyde. Dersom det blir stående vann i systemet er dette særlig ugunstig i et nordisk klima, hvor vannet kan fryse og redusere miniregnbedets kapasitet. Det nye hullet, H_{ny} , er plassert i bunnen av kammerveggen og tillater full drenering fra innløpskammeret.

Tabell 3.4: Dimensjonering av miniregnbed for nedbørhendelser mellom 1 og 10 minutters varighet som oppfyller krav om $Q_{maks,avrenning} < 0,1$ l/s. Q_{snitt} er gjennomsnittlig tilført vannføring for hver nedbørhendelse hentet fra Tabell 2.3, K1 er innløpskammer, K3 er utløpskammer, K2 er fordrøyningskammer, H_{tot} er systemets totale indre høyde og $H_{overløp}$ er overløpets høyde over bunnen. Hullmønstre, diametere ($D_{1,inn}$, $D_{2,inn}$, $D_{1,ut}$ og $D_{2,ut}$) og høyder ($H_{2,inn}$ og $H_{2,ut}$) er vist Figur V. 3, Figur V. 4 og Figur V. 5 i Vedlegg 3.

Vannføring inn		Kammerareal (m^2)		Høyder (m)		Innløpskammer				Utløpskammer			
Varighet	Q_{snitt} (l/s)	K1 og K3	K2	H_{tot}	$H_{overløp}$	Hullmønster	$D_{1,inn}$ (m)	$D_{2,inn}$ (m)	$H_{2,inn}$ (m)	Hullmønster	$D_{1,ut}$ (m)	$D_{2,ut}$ (m)	$H_{2,ut}$ (m)
1 min	1,47	0,043	0,540	0,79	0,59	A	0,010	0,020	0,49	F	0,005	0,02	0,49
	1,86	0,043	0,540	0,79	0,59	A	0,010	0,030	0,49	F	0,005	0,02	0,49
	2,13	0,043	0,540	0,79	0,59	A	0,010	0,030	0,49	F	0,005	0,02	0,49
	2,38	0,043	0,540	0,79	0,62	A	0,010	0,030	0,49	G	0,005	0,02	0,49
2 min	1,24	0,043	0,540	0,79	0,62	B	0,005	0,023	0,49	H	0,004	0,02	0,49
	1,61	0,043	0,540	0,79	0,63	B	0,005	0,030	0,49	H	0,004	0,02	0,49
	1,85	0,043	0,540	0,79	0,65	B	0,005	0,030	0,49	H	0,004	0,02	0,49
	2,08	0,043	0,540	0,79	0,65	B	0,010	0,030	0,49	H	0,004	0,02	0,49
3 min	1,12	0,043	0,540	0,79	0,59	B	0,010	0,020	0,49	H	0,004	0,02	0,49
	1,46	0,043	0,540	0,79	0,59	B	0,010	0,020	0,49	H	0,004	0,02	0,49
	1,69	0,043	0,540	0,79	0,59	B	0,010	0,030	0,49	I	0,004	0,02	0,49
	1,91	0,043	0,540	0,79	0,65	C	0,010	0,020	0,55	J	0,004	0,02	0,54
5 min	0,94	0,043	0,540	0,79	0,59	B	0,010	0,020	0,49	I	0,004	0,02	0,49
	1,26	0,043	0,540	0,88	0,60	C	0,010	0,015	0,58	J	0,004	0,02	0,60
	1,46	0,044	0,571	0,95	0,65	C	0,010	0,030	0,65	J	0,004	0,02	0,66
	1,67	0,044	0,571	1,05	0,80	D	0,015	0,015	0,75	J	0,004	0,02	0,75
10 min	0,70	0,046	0,603	1,15	0,90	E	0,015	0,015	0,85	J	0,004	0,02	0,85
	0,94	0,046	0,603	1,15	0,90	E	0,015	0,015	0,85	J	0,004	0,02	0,85
	1,10	0,046	0,663	1,15	0,90	E	0,015	0,015	0,85	J	0,004	0,02	0,85
	1,25	0,046	0,663	1,15	0,90	E	0,015	0,015	0,85	J	0,004	0,02	0,85

Tabell 3.5: Dimensjonering av miniregnbed for nedbørhendelser mellom 15 og 60 minutters varighet som oppfyller krav om $Q_{maks,avrenning} < 0,1$ l/s. Q_{snitt} er gjennomsnittlig tilført vannføring for hver nedbørhendelse hentet fra Tabell 2.3, K1 er innløpskammer, K3 er utløpskammer, K2 er fordrøyningskammer, H_{tot} er systemets totale indre høyde og $H_{overløp}$ er overløpets høyde over bunnen. Hullmønstre, diametere ($D_{1,inn}$, $D_{2,inn}$, $D_{1,ut}$ og $D_{2,ut}$) og høyder ($H_{2,inn}$ og $H_{2,ut}$) er vist Figur V. 3, Figur V. 4 og Figur V. 5 i Vedlegg 3.

Vannføring inn		Kammerareal (m^2)		Høyder (m)		Innløpskammer				Utløpskammer			
Varighet	Q_{snitt} (l/s)	K1 og K3	K2	H_{tot}	$H_{overløp}$	Hullmønster	$D_{1,inn}$ (m)	$D_{2,inn}$ (m)	$H_{2,inn}$ (m)	Hullmønster	$D_{1,ut}$ (m)	$D_{2,ut}$ (m)	$H_{2,ut}$ (m)
15 min	0,57	0,050	0,663	1,15	0,90	E	0,015	0,015	0,85	J	0,004	0,02	0,85
	0,78	0,052	0,702	1,15	0,90	E	0,015	0,015	0,85	J	0,004	0,02	0,85
	0,93	0,054	0,884	1,15	0,90	E	0,015	0,015	0,85	J	0,004	0,02	0,85
	1,06	0,060	0,994	1,15	0,90	E	0,015	0,015	0,85	J	0,004	0,02	0,85
20 min	0,49	0,045	0,571	1,15	0,90	E	0,015	0,015	0,85	J	0,004	0,02	0,85
	0,68	0,054	0,884	1,15	0,90	E	0,015	0,015	0,87	J	0,004	0,02	0,85
	0,81	0,060	0,994	1,15	0,90	E	0,015	0,015	0,85	J	0,004	0,02	0,85
	0,93	0,070	1,184	1,15	0,90	E	0,015	0,015	0,85	J	0,004	0,02	0,85
30 min	0,39	0,050	0,663	1,15	0,90	E	0,015	0,015	0,85	J	0,004	0,02	0,85
	0,54	0,060	0,994	1,15	0,90	E	0,015	0,015	0,85	J	0,004	0,02	0,85
	0,65	0,070	1,184	1,15	0,90	E	0,020	0,020	0,85	J	0,004	0,02	0,85
	0,74	0,076	1,368	1,15	0,90	E	0,020	0,020	0,85	J	0,004	0,02	0,85
45 min	0,30	0,054	0,884	1,15	0,90	E	0,020	0,020	0,85	J	0,004	0,02	0,85
	0,43	0,070	1,184	1,15	0,90	E	0,020	0,020	0,85	J	0,004	0,02	0,85
	0,51	0,076	1,368	1,15	0,90	E	0,020	0,020	0,85	J	0,004	0,02	0,85
	0,59	0,083	1,659	1,15	0,90	E	0,020	0,020	0,85	J	0,004	0,02	0,85
60 min	0,25	0,054	0,884	1,15	0,90	E	0,020	0,020	0,85	J	0,004	0,02	0,85
	0,35	0,070	1,184	1,15	0,90	E	0,020	0,020	0,85	J	0,004	0,02	0,85
	0,42	0,083	1,659	1,15	0,90	E	0,020	0,020	0,85	J	0,004	0,02	0,85
	0,48	0,084	1,760	1,15	0,90	E	0,020	0,020	0,85	J	0,004	0,02	0,85

4 Diskusjon

Gjennom modelleringsprosessen og de hydrauliske forsøkene ble det tatt valg som kan påvirke modellens fordrøyningsvirkning. Det kan være forenklinger gjort i modellen, valg av programvare eller feilkilder fra forsøk. Dette delkapittelet vil først belyse de mulige effektene av disse valgene og feilkildene og deretter vurdere miniregnbedets fordrøyningsvirkning.

4.1 Modellering

4.1.1 Valg av programvare

Programvaren SWMM ble benyttet i modelleringen av miniregnbedet.

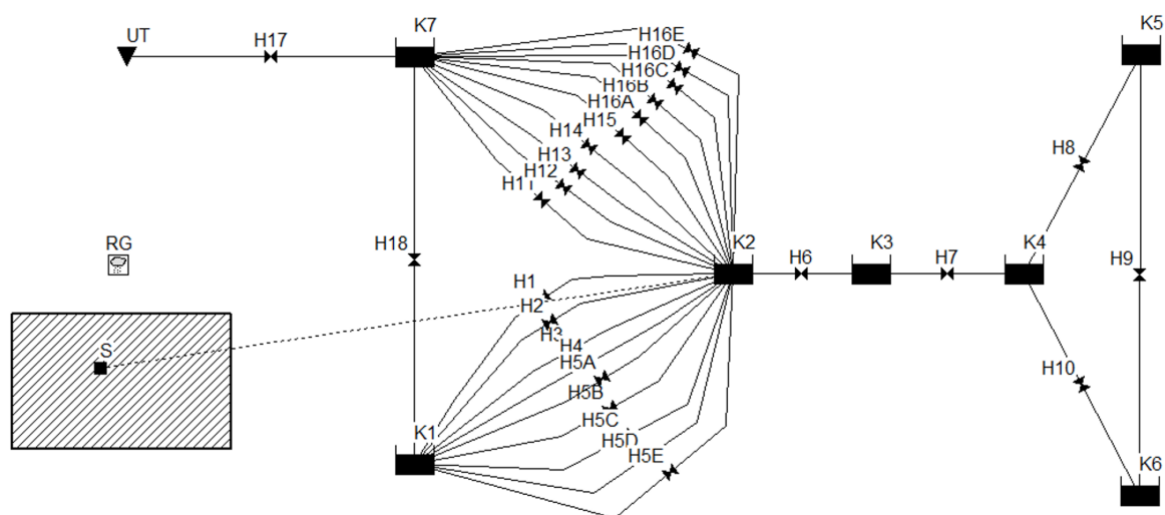
Modelleringsverktøyet er utviklet for dimensjonering og design av overvannssystemer og er særlig egnet for urbane områder. Det ruter vann gjennom et system, håndterer ikke-stasjonær strømning og kan lede nedbør som infiltrerer i et LOD-tiltak videre til et overvannssystem. Alternativ programvare som også kan benyttes til slik modellering er MIKE URBAN og Mouse.

Programmene tilbyr flere av de samme hydrologiske funksjonene som SWMM. Simuleringer kan kjøres som enkelthendelser eller simuleringer over tid og samtlige programmer håndterer ustabil vannstrømning, oppstuvning og bakevjeeffekt. Det ville trolig vært liten forskjell på fordrøyningen av takvann gjennom kamrene ved bruk av de ulike programmene. Overvannsmodulene kan derimot gi noe ulike resultater. I en masteroppgave ved NTNU, *Evaluating Hydrological Performance of LID-Modules in Mike Urban* (Hernes, 2018), er de hydrologiske ytelsene til MIKE URBANs overvannsmoduler undersøkt ved å se på avrenning fra grønne tak og regnbed. Resultatene viste blant annet at MIKE URBAN, sammenlignet med SWMM, generelt ga en mykere avrenning fra systemene, noe som kan føre til en lavere beregning av spissavrenningen fra systemet. I denne oppgaven ønskes det heller å vise for høy avrenning enn for lav, slik at fremstillingen av miniregnbedets fordrøyningsvirkning ikke blir feilaktig positiv.

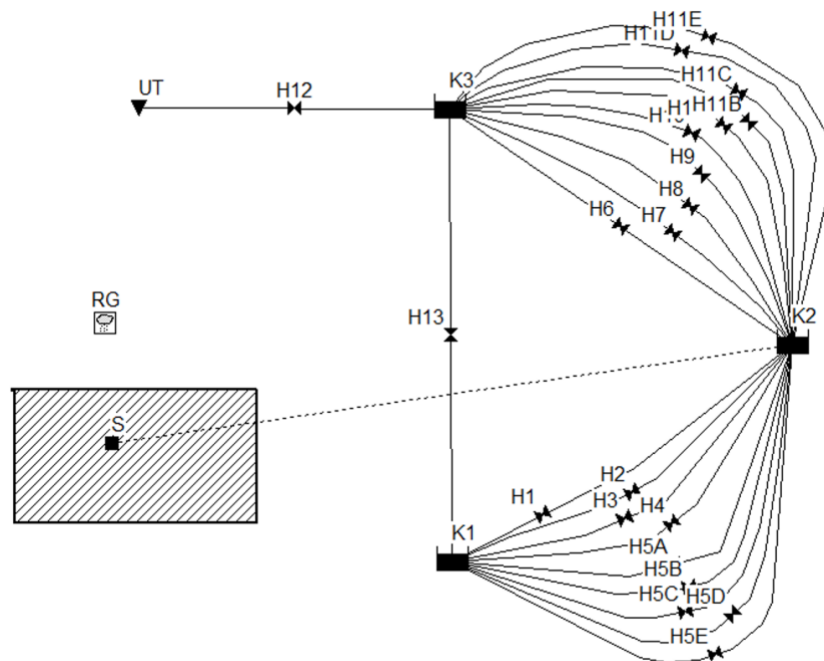
Annen programvare kan altså benyttes til å modellere miniregnbed og det er mulig at avrenningen fra blomsterkassen ville endret karakter noe. Hydraulikken beregnes likt i de ulike programmene, så simuleringene i fordrøyningskamrene ville trolig vært svært like og det er her de største vannmengdene blir håndtert i systemet.

4.1.2 Modellforenklinger

I modelleringen av miniregnbedet ble det gjort forenklinger av systemet. Hensikten var å gjøre modellen enklere å forholde seg til, med en antagelse om at forenklingenes effekt på systemets fordrøyningsvirkning var neglisjerbare. To og to hull ble slått sammen i kammerveggen som skiller fordrøyningskamrene fra innløpskammer og utløpskammer. Gjennom hydrauliske tester i miniregnbedet ble det funnet at vannstanden i de ulike fordrøyningskamrene var tilnærmet lik gjennom ulike nedbørhendelser. Det ser ut til at indre kammerveggers hovedfunksjon er å støtte opp tyngden av blomsterkassen. En forenkling av modellen ble derfor gjort ved å slå sammen de fem kamrene fordrøyningskamrene. Det ble antatt at kammerveggene kan ha en liten forsinkende effekt, men at denne effekten i så fall er tilnærmet neglisjerbar. Figur 4.1 og Figur 4.2 viser modellens oppbygning før og etter forenklingen av kammerveggene.



Figur 4.1: Skjermdump av modell i SWMM før forenklinger.



Figur 4.2: Skjermdump av modell i SWMM etter forenklinger.

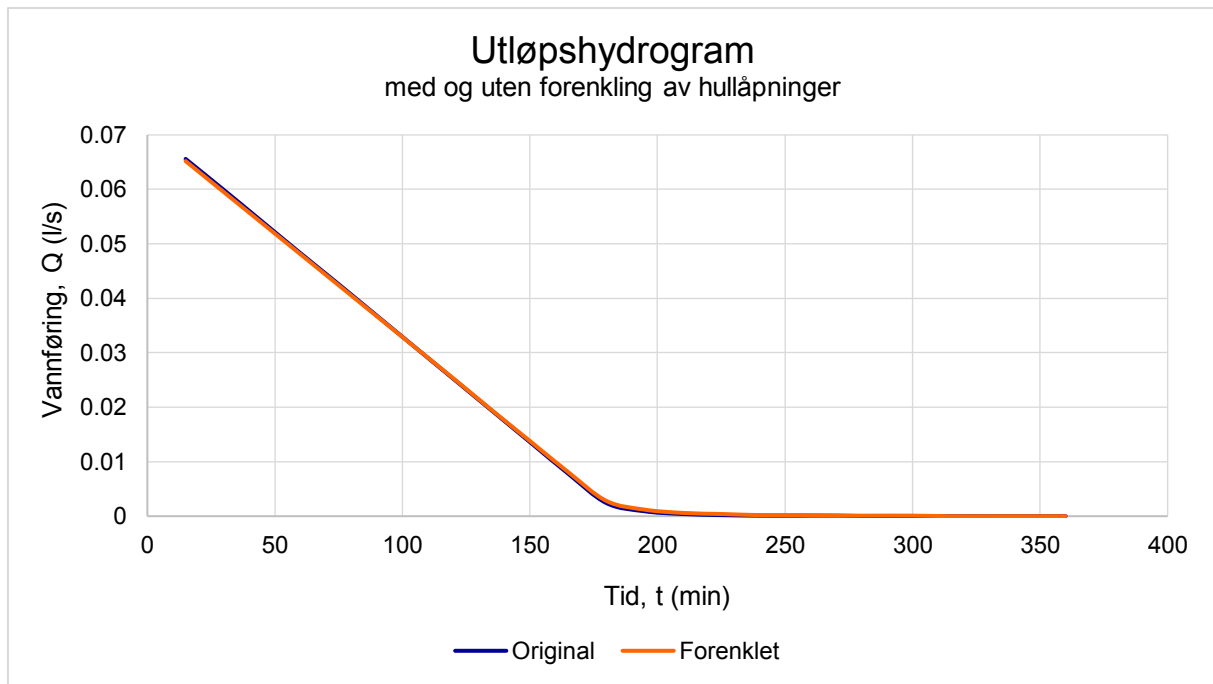
Forenkling av hullåpninger

De nye, sammenslåtte hullene har samme areal som to opprinnelige hull og står i samme høyde som det originale designet. Strømningsarealet er altså det samme, men hullets diameter er større. En dobling av areal gir 1,41 ganger større diameter (

$$\frac{D_{forenklet}}{D_{original}} = \sqrt{\frac{A_{forenklet}}{A_{original}}} = \sqrt{2} D_{forenklet}$$

). Eksempelvis vil det si at toppen av sammenslått hull H7 vil finne seg i høyde $h = 0,107$ m i stedet for $h = 0,105$ m, slik det er i den virkelige kammerveggen (se Figur V. 9). Ved stigende vannstand vil vannføring oppstå samtidig i forenklet modell og i et virkelig miniregnbed, men det vil ta lenger tid før hullet går fullt i modellen. Ved synkende vannstand vil de originale og separerte hullene være fullstendig dykket noe lenger enn modellens hull.

For å undersøke forenklingens effekt på vannføringen ut av fordrøyningskamrene er det gjennomført en test i SWMM med to enkle modeller. I den ene er det lagt inn to hull med diameter $D_1 = 5,0$ mm. I den andre modellen er de to hullene slått sammen, hvilket gir $D_2 = 7,05$ mm. I testen fylles miniregnbedet til full kapasitet og utløpshydrogram hentes ut for vannføringen som forlater systemet etter tilførselen av vann er stoppet. Resultatet vises i Figur 4.3.

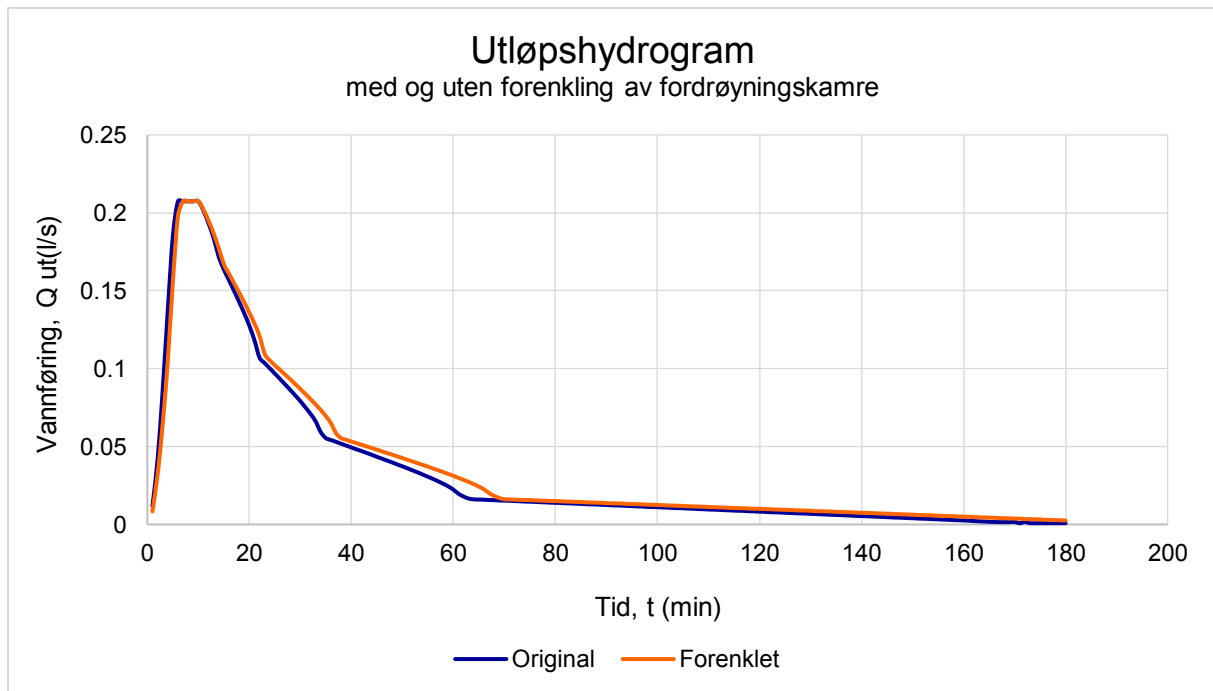


Figur 4.3: Vannføring (Q) ut av fordrøyningskamrene som funksjon av tid (t). Blå kurve viser vannføring i original modell, oransje kurve viser vannføring i forenklet modell.

Figuren viser to utløpshydrogram som er tilnærmet like. Differansen mellom de to linjene er størst ved $t = 225$ minutter. De originale hullene gir i dette punktet en vannføring på 0,002 l/s, mens den foreklede versjonen gir vannføring på 0,004 l/s. Største differanse mellom de to modellene er på 1 prosent, mens snittdifferansen er 0,22 prosent. Den foreklede modellen gir en noe større avrenning fra systemet, og vil altså ikke gi et feilaktig positivt bilde av miniregnbedets fordrøyningsvirkning. Det velges derfor å beholde forenklingene og antagelsen om at effekten på miniregnbedets fordrøyningsvirkning er neglisjerbar.

Forenkling av fordrøyningskamre

Det antas at forenklingen av fordrøyningskamrene har en neglisjerbar effekt på miniregnbedets fordrøyningsvirkning. For å undersøke antagelsen nærmere er to modeller bygd i SWMM med utgangspunkt i miniregnbedets dimensjoner. Den ene modellen beholder kammerveggene og de tilhørende halvmånehullene i bunnen av hver vegg (se Figur 1.9), den andre modellen forenkles ved å slå sammen de fem fordrøyningskamrene til ett kammer. De to modellene tilføres en vannføring på 1,0 l/s i ti minutter og utløpshydrogram er hentet ut fra simuleringene og vist i Figur 4.4.



Figur 4.4: Vannføring (Q) ut av fordrøyningskamrene som funksjon av tid (t). Blå kurve viser vannføring i original modell, oransje kurve viser vannføring i forenklet modell.

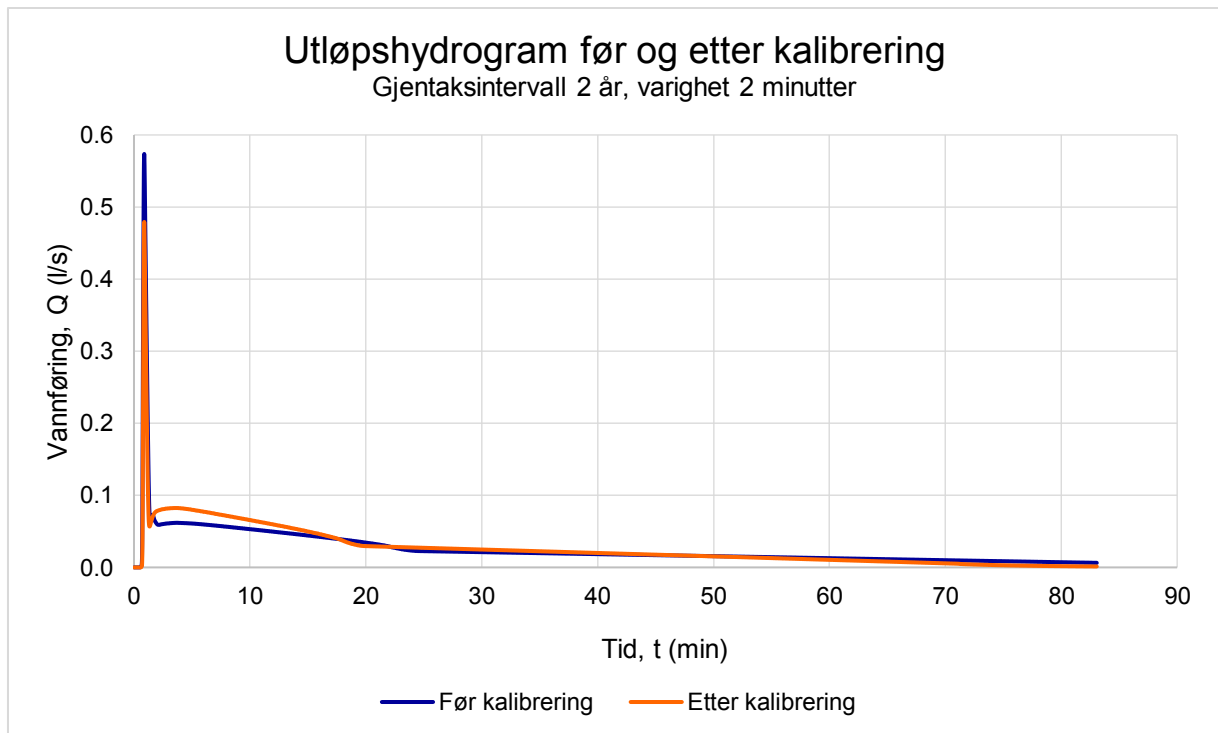
Utløpshydrogrammene følger samme avrenningsmønster, men den forenklete modellen viser noe høyere vannføring ut av kamrene mellom $t = 20$ og $t = 70$ minutter. Differansen mellom de to kurvene er størst ved $t = 64$ minutter, hvor originalmodell gir $Q_{ut} = 0,0161$ l/s og forenklet modell gir $Q_{ut} = 0,0258$ l/s.

Vannføringen i den forenklete modellen er 60 prosent høyere, men dette utgjør kun en differanse på 9,7 ml/s. Kammerveggene har altså en effekt på systemets fordrøyningsvirkning, og som antatt er effekten liten, men noe forsinkende.

Forenklingen fører til at modellen viser en noe lavere fordrøyningsvirkning, noe som heller er ønskelig enn at modellen viser for god virkning.

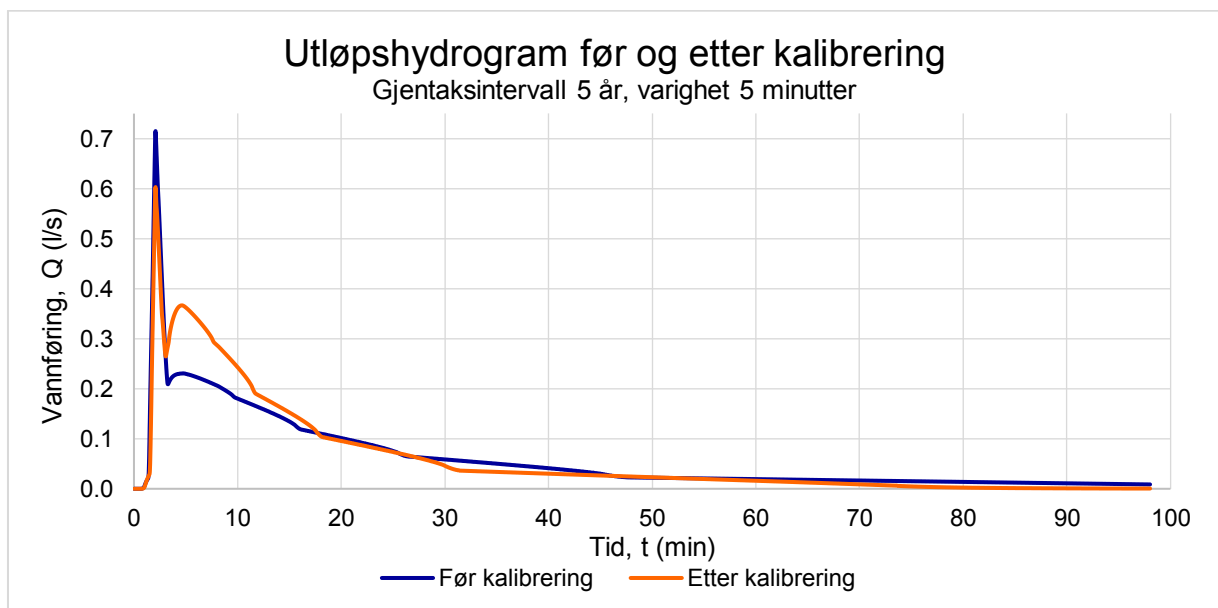
4.1.3 Utløpskoeffisient

En utløpskoeffisient for en blende er en korrigerende faktor som tar høyde for viskøse effekter i beregningen av vannføring. I miniregnbedet ble det antatt at hullene var skarpkantede. De skarpe kantene har i større grad en bremsende effekt på vannstrømning enn en blende med avrundede kanter har, som vist i Figur 1.13. Gjennom kalibreringsarbeidet ble koeffisienten funnet til å være 0,8, altså en mellomting av skarpkantet ($C_d = 0,61$) og avrundet ($C_d = 0,98$) blende. Figur 4.5, Figur 4.6, Figur 4.7 og Figur 4.8 viser utløpshydrogram med og uten kalibrering for fire eksempelhendelser.



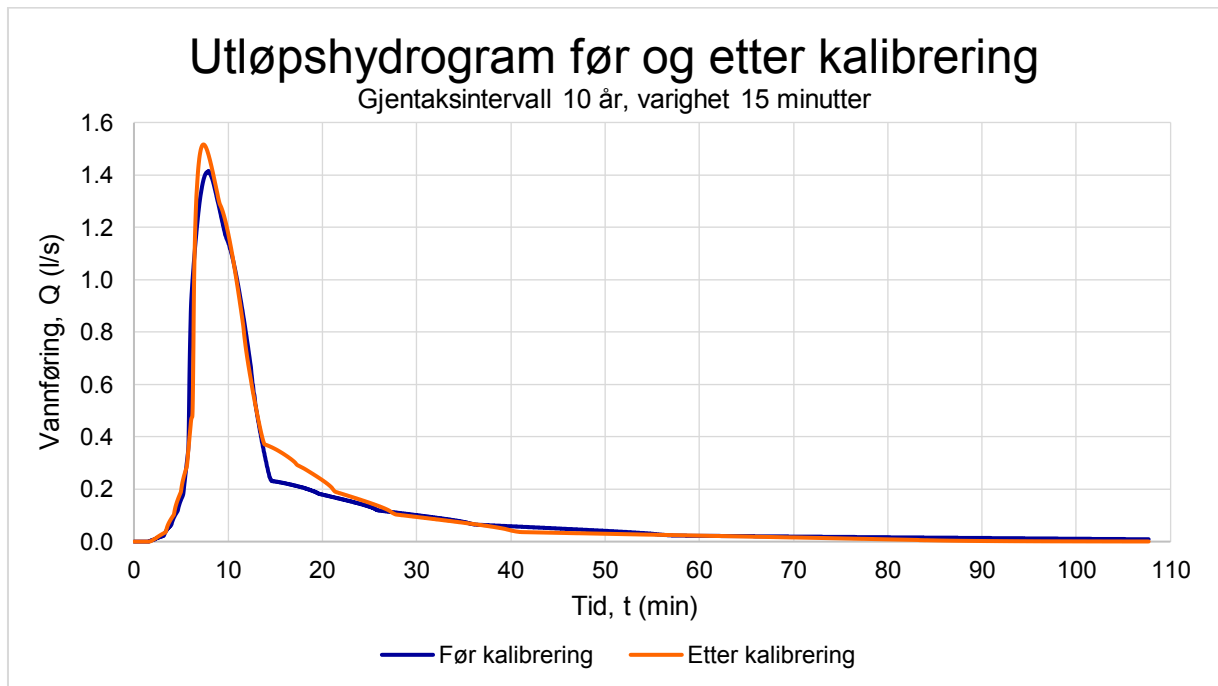
Figur 4.5: Vannføring (Q) ut av miniregnbedet som funksjon av tid (t). Blå kurve viser vannføring i original modell, oransje kurve viser vannføring i kalibrert modell.

Uten kalibreringen ville spissavrenning vært 20 prosent høyere, med $Q_{maks,avrenning}$ lik 0,568 l/s. Avrenning etter nedbøren tar slutt ville vært noe lavere uten kalibreringen, men det ser ikke ut til å ha en stor effekt på tidspunkt for spissavrenning (t_p).



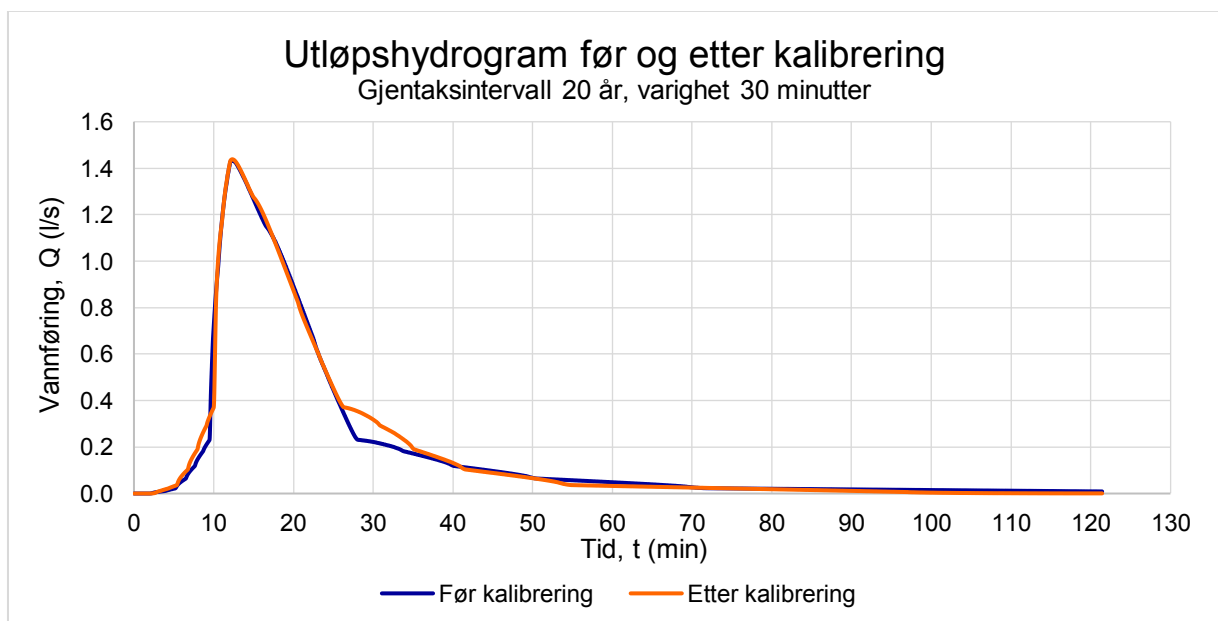
Figur 4.6: Vannføring (Q) ut av miniregnbedet som funksjon av tid (t). Blå kurve viser vannføring i original modell, oransje kurve viser vannføring i kalibrert modell.

Også for nedbørhendelse med gjentakintervall 5 år og varighet 5 minutter er t_p nærmest upåvirket og spissavrenningen ville vært høyere uten kalibrering, med en økning på 19 prosent.



Figur 4.7: Vannføring (Q) ut av miniregnbedet som funksjon av tid (t). Blå kurve viser vannføring i original modell, oransje kurve viser vannføring i kalibrert modell.

For nedbørhendelse med 15 minutters varighet er derimot spissavrenningen høyere etter kalibrering. Figuren viser en økning på 3 prosent, mens t_p er fremskyndet med fire prosent.



Figur 4.8: Vannføring (Q) ut av miniregnbedet som funksjon av tid (t). Blå kurve viser vannføring i original modell, oransje kurve viser vannføring i kalibrert modell.

Figur 4.8 viser at spissavrenningen er tilnærmet lik før og etter kalibrering. Størst er differansen før og etter systemet går fullt. Det ser ut til at kalibreringen har ført til at miniregnbedet håndterer mindre av det totale nedbørvolumet ved denne hendelsen.

For de korte hendelsene har altså kalibreringen ført til lavere spissavrenning fra systemet. For de lengre hendelsene har kalibreringen ikke hatt like stor effekt på avrenningen, og hendelsen med 15 minutters varighet har en noe høyere spissavrenning. Dette understreker viktigheten av å kalibrere modellen basert på hydrauliske tester.

Hvorfor er C_d ikke lik $C_{d,s}$?

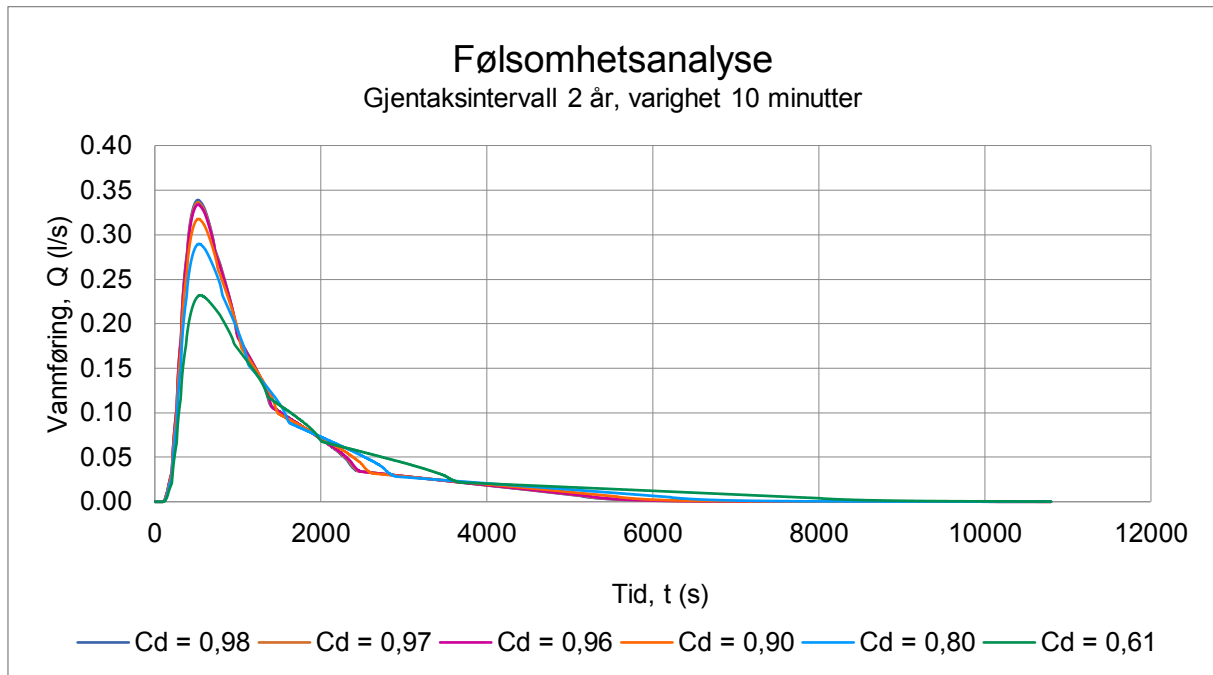
Den kalibrerte koeffisienten er ikke lik $C_{d,s}$ (utløpskoeffisient for skarpkantet blende) slik først antatt. Årsaken til dette kan være sammensatt. Deler av feilkilden kan være at undertegnede ikke har noen tidligere erfaring med å kategorisere en blende, men også andre faktorer vil spille inn. Nøyaktigheten ved mål av systemets dimensjoner kan ha en effekt. Dersom diameteren til et hull er målt feil, kan dette bidra til at utløpskoeffisient er gjort større for å få korrekt vannføring. Hvis diameteren for eksempel er målt 10 prosent for liten blir arealet 20 prosent for lite. Dette fører til at C_d må være 23 % høyere enn den korrekte verdien. Også vannets temperatur kan ha en innvirkning, dersom temperaturen i modelleringen og ved forsøk ikke er den samme. Ved lave temperaturer vil vann ha høyere viskositet og kan føre til tregere transport gjennom systemet.

4.2 Feilkilder fra forsøk

Hydrauliske forsøk ble gjennomført ved bruk av målestokk, stoppeklokke og kontrastfarge tilsatt i vannet. Vannstandsavlesninger er altså gjort på øyemål og dette medfører en usikkerhet tilknyttet rådataenes nøyaktighet. Rådataene benyttes til å kalibrere utløpskoeffisienter og påvirker utløpshydrogrammet til modellen av miniregnbedet. For å undersøke modellens følsomhet for variasjoner i utløpskoeffisient for hullene H1-H4 og H6-H10, er det gjennomført en følsomhetsanalyse.

4.2.1 Følsomhetsanalyse

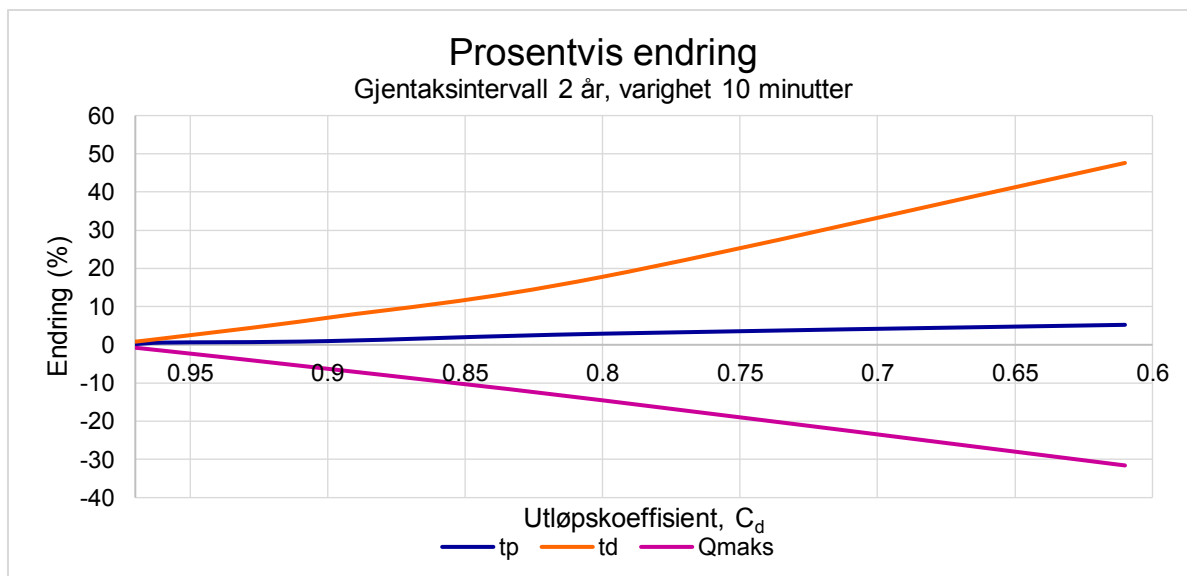
Det er gjennomført analyser for tre hendelser med 10, 20 og 45 minutters varighet og to års gjentaksintervall, vist i Figur 4.9, Figur 4.11 og Figur 4.13. Dette er nedbørhendelser der det ikke oppstår vannføring i overløpet og det vil undersøke hvor følsomme modellresultatene er for variasjon i C_d ved ulike intensiteter og varigheter. Utløpskoeffisienten varierer fra 0,98 (avrundet blende) til 0,61 (skarpkantet blende).



Figur 4.9: Vannføring (Q) ut av miniregnbedet som funksjon av tid (t) ved ulike utløpskoeffisienter (C_d).

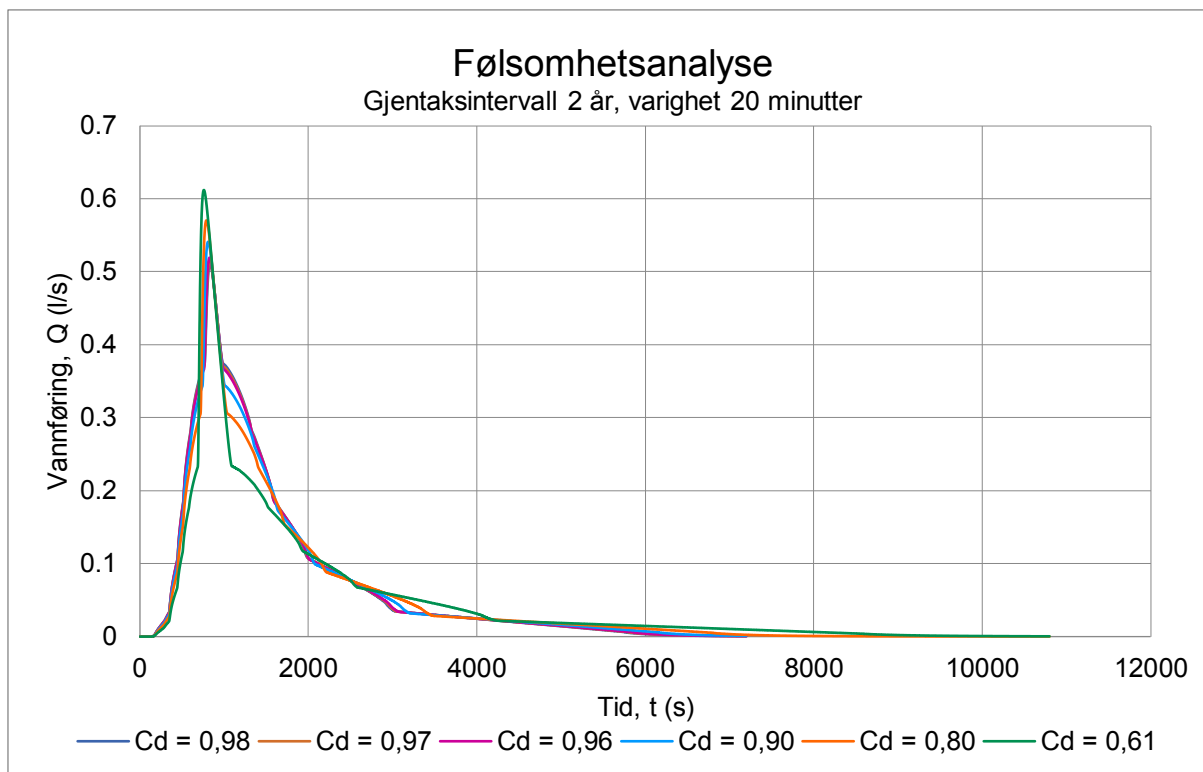
Fra Figur 4.9 fremgår det at miniregnbedets utløpshydrogram kun endrer seg i mindre grad ved små variasjonene i utløpskoeffisient, fra C_d lik 0,98 til 0,97 og 0,96. Fra C_d -verdi lik 0,98 til 0,9 endres utløpskoeffisient med åtte prosent, mens hydrogrammet viser en prosentvis lavere endring for samtlige av de målte parameterne. Prosentvis endring som funksjon av C_d -verdi er fremstilt grafisk i Figur 4.10.

For nedbørhendelse med 2 års gjentaksintervall og 10 minutters varighet er det totalvarighet for avrenningshendelse (t_d) som er mest følsom for variasjoner i utløpskoeffisient. Maksimalvannføringen (Q_{maks}) er også følsom for variasjoner, mens tidspunkt for spissavrenning (t_p) er mindre følsom for endringer i utløpskoeffisient.

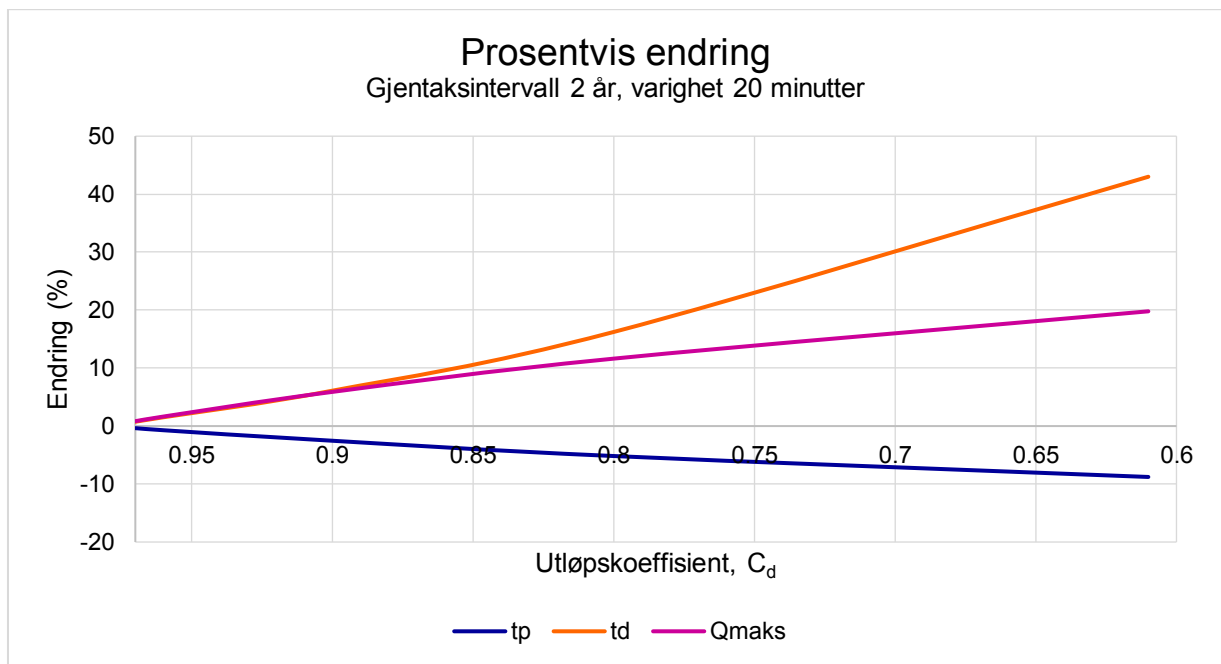


Figur 4.10: Prosentvis endring av tidspunkt for spissavrenning (t_p), avrenningens varighet (t_d) og maksimalvannføring (Q_{maks}).

For nedbørhendelse med 2 års gjentaksintervall og 20 minutters varighet er følsomhetsanalyse vist i Figur 4.11 og prosentvis endring som funksjon av utløpskoeffisient vist i Figur 4.12.



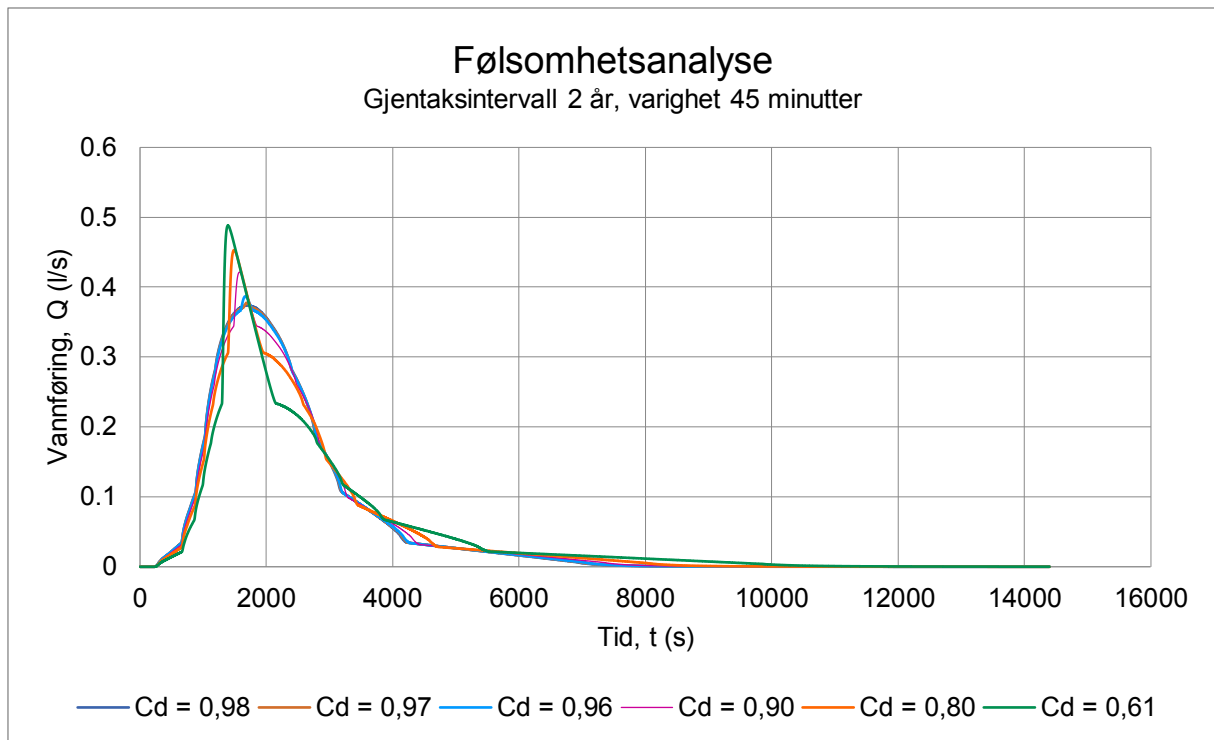
Figur 4.11: Vannføring (Q) ut av miniregnbedet som funksjon av tid (t) ved ulike utløpskoeffisienter (C_d).



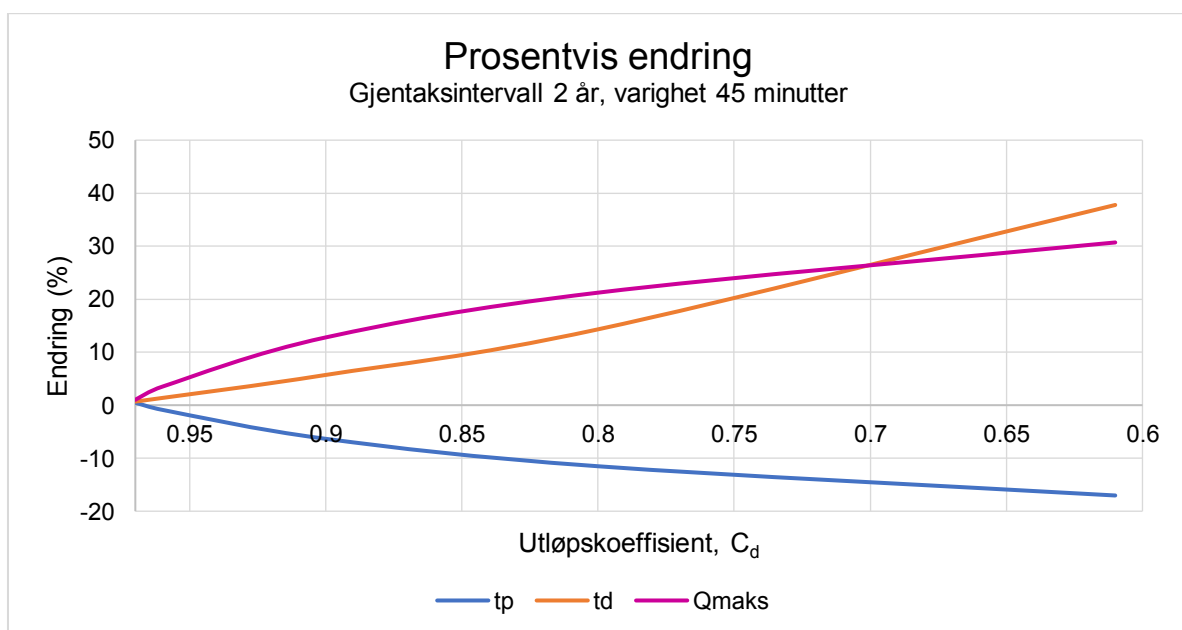
Figur 4.12: Prosentvis endring av tidspunkt for spissavrenning (t_p), avrenningens varighet (t_d) og maksimalvannføring (Q_{maks}).

I likhet med 10-minuttershendelsen fremgår det også her at t_d er mest følsom for variasjoner i utløpskoeffisient, mens t_p påvirkes i minst grad. Legg merke til hvordan stigningstall for kurvene for Q_{maks} og t_p har endret fortegn, mens t_d følger samme trend som den første analysen. Det kan tyde på at maksimalvannføring ut av systemet ved lengre hendelser er mer avhengig av hullenes egenskaper enn ved 10-minuttershendelsen, hvor kamrene uansett fylles raskt opp.

Utløpshydrogram og prosentvis endring for hendelse med 45 minutters varighet er vist i Figur 4.13 og Figur 4.14:



Figur 4.13: Vannføring (Q) ut av miniregnbedet som funksjon av tid (t) ved ulike utløpskoeffisienter (C_d).



Figur 4.14: Prosentvis endring av tidspunkt for spissavrenning (t_p), avrenningens varighet (t_d) og maksimalvannføring (Q_{maks}).

Også her er t_d og Q_{maks} mest følsomme for variasjoner. Q_{maks} er mer følsom for små endringer i C_d og kurven flater deretter ut, mens t_d er mindre følsom enn Q_{maks} for de

mindre variasjonene og mer følsom for større variasjoner. Igjen er tidspunkt for spissavrenning minst følsom for variasjoner i C_d .

Likt for samtlige følsomhetsanalyser er at t_p er minst følsom for variasjoner i utløpskoeffisient. Det indikerer at tidspunkt for spissavrenning ut av systemet i større grad er påvirket av regnets hendelsesforløp enn hullenes egenskaper. 10-minuttershendelsen skiller seg fra de to lengre hendelsene. Her synker Q_{maks} når C_d blir mindre, mens den stiger for de to andre hendelsene. Tidspunkt for spissavrenning forsinkes med synkende C_d -verdi for 10-minuttershendelsen, mens den fremskyndes for de lengre hendelsene. Q_{maks} er mer følsom for små variasjoner i C_d -verdi ved regnhendelser med lenger varighet, enn de kortere hendelsene.

Målenøyaktighet i det hydrauliske laboratoriet kan påvirke kalibreringen av utløpskoeffisienter. Følsomhetsanalysen viser dog at små variasjoner i utløpskoeffisient ikke har en betydelig effekt på miniregnbedets fordrøyningsvirkning. Det er derimot større forskjeller mellom hydrogrammene ved utløpskoeffisient for skarpkantet blende ($C_d = 0,61$) og for den kalibrerte koeffisienten ($C_d = 0,8$). For en 10-minuttershendelse ville en modell med ukalibrerte koeffisienter gitt lavere spissavrenning fra systemet og resultatene ville vist en feilaktig stor fordrøyningsvirkning. For de lengre hendelsene ville spissavrenningen derimot vært større, og dette ville gitt et for dårlig bilde av miniregnbedets fordrøyningsvirkning. Følsomhetsanalysen viser altså viktigheten av å kalibrere modellen basert på hydrauliske tester.

4.3 Infiltrasjonstester i blomsterkasse

Gjennom infiltrasjonstestene i blomsterkassen ble det observert at synkehastigheten ble redusert for hvert forsøk (vist i Figur V. 2, Vedlegg 2). En typisk årsak til dette kan være at jordmediet ikke er tilstrekkelig mettet før start og at synkehastigheten dermed ikke har rukket å bli stabilisert. Ved gjennomføring av forsøkene var det derimot et særlig fokus på nettopp dette, og det ble tilført store vannmengder til systemet over tid for å sørge for at jorden var helt mettet. Det er derfor mindre sannsynlig at dette er grunnen til at infiltrasjonshastigheten ble lavere for hvert

forsøk. En annen hypotese er at fiberduken i bunnen av blomsterkassen gradvis gikk tett.

For å forhindre at jord skulle tas med videre i systemet ble det lagt en fiberduk i bunnen av blomsterkassen. For hvert forsøk så det ut til at denne ble mer og mer tett, og dermed tillot mindre og mindre vannføring gjennom dukens porer. De store vannmengdene tilført til systemet kan også ha bidratt til å pakke jorda tettere for hvert forsøk.

Opprinnelig var planen for beregning av infiltrasjonshastighet å benytte en snittverdi av flere vannhøydeforsøk i blomsterkassen. Dette ville jevnet ut eventuelle målefeil. Ettersom porene i fiberduken ble tettere for hvert forsøk, ble det i stedet besluttet å kun benytte målingene fra første forsøk, før duken har rukket å tetne. Det innebærer at eventuelle målefeil vil få større utslag i resultatene, og derfor er snittverdi for den første testen av infiltrasjonshastighet benyttet i modellen. Ved installasjon av miniregnbed anbefales det derfor å benytte en annen løsning enn fiberduk i bunnen av blomsterkassen. Et alternativ kan være å plassere lecakuler i bunnen av kassen.

4.4 Vurdering av miniregnbedets fordrøyningsvirkning

I resultatkapittelet ble nedbørhendelsene delt inn i tre kategorier: korte hendelser, nedbørhendelser av middels varighet og lengre hendelser. Det var særlig tre elementer som ble trukket fram for å undersøke miniregnbedets fordrøyningssevne for de ulike hendelsene: reduksjon av spissavrenning ($Q_{\text{maks,avrenning}}$), forsinkelse av tidspunkt for spissavrenning (t_p) og effektivt fordrøyningsvolum (V_E). Dette delkapittelet vil vurdere resultatene i Tabell 3.3 ved å se nærmere på hvordan de ulike nedbørhendelse håndteres av miniregnbedet.

Korte nedbørhendelser (1 min – 5 min)

De korte nedbørhendelsene er de hendelsene med størst nedbørintensitet og samtidig minst nedbørvolum. Tabell 3.3 viser at store deler eller hele nedbørvolumet blir håndtert i miniregnbedet, ettersom V_E enten er lik eller tilnærmet lik $V_{\text{nedbør}}$ for samtlige nedbørhendelser med varighet opptil fem minutter.

Den største reduksjonen av spissavrenning skjer for de korte hendelsene. For samtlige regnhendelser med varighet mellom 1 og 5 minutter er spissavrenningen redusert med 60 prosent eller mer. Figur 3.11 viser at kurven for $Q_{\text{maks,avrenning}}/Q_{\text{maks,nedbør}}$ går helt ned til 0,12 for en hendelse med to års gjentaksintervall og fem minutters varighet. Dette er en reduksjon av spissavrenning med 88 prosent. Også i absoluttverdi er dette er den laveste spissavrenningen fra miniregnbedet, med $Q_{\text{maks,avrenning}} = 0,23$ l/s. Selv om reduksjonen av nedbørens spissavrenning er størst i denne kategorien, er ikke den faktiske avrenningen lavest for de korte nedbørhendelsene.

Utløpshydrogrammene i Figur 3.4 og Figur 3.5 er eksempler på avrenning fra miniregnbed ved korte nedbørhendelser. Til tross for at miniregnbedet ofte rommer hele nedbørvolumet, er avrenningskurvene gjerne spisse og høye, og gjennomsnittlig spissavrenning er 1,0 l/s. Årsaken er overløpsaktivitet mellom innløpskammer og utløpskammer. Hullene som leder vann til fordrøyningskamrene er ikke i stand til å ta unna de store vannmengdene, dermed stiger vannstanden til overløpet og deler av nedbørvolumet ledes direkte til utløpet. Det er potensiale for å redusere spissavrenningen ytterligere ved korte nedbørhendelser dersom hullene som leder vann inn til fordrøyningskamrene gjøres større.

Nedbørhendelser av middels varighet (10 min – 20 min)

Spissavrenningen fra systemet ved nedbørhendelser av middels varighet er i snitt større enn ved korte og lengre nedbørhendelser, med en gjennomsnittlig spissavrenning på 1,26 l/s. Reduksjonen av spissavrenning varierer mellom 3 og 61 prosent. Figur 3.10 viser at disse hendelsene i snitt har størst forsinkelse av tidspunkt for spissavrenning (t_p). Det tyder på at systemet bruker lenger tid på å fylles opp og dermed er i stand til å forsinke spissavrenningen i større grad enn de korte og lengre nedbørhendelsene.

En utfordring ved disse hendelsene er at store vannmengder tilføres systemet over et relativt kort tidsrom. For de kortere nedbørhendelsene er nedbørvolumet mindre enn miniregnbedets tilgjengelige volum for fordrøyning ($V_s = 305$ liter) og fordrøyningsvirkningen kan forbedres ved å gjøre hullåpningene mot fordrøyningskamrene større. De mellomstore hendelsene har noe lavere

maksimalvannføring inn til systemet, men nedbørvolumet er gjerne større enn V_s , og volumet tilføres systemet over et kort tidsrom. Dette innebærer at effektivt fordrøyningsvolum blir mindre enn det totale nedbørvolumet ($V_{nedbør}$).

For å optimalisere miniregnbedets håndtering av nedbørhendelser av middels varighet kan det være effektivt å endre hullmønsteret i kammerveggen mellom fordrøyningskammer og utløpskammer slik at vannet sendes raskt ut av systemet og frigjør kapasitet. I systemets originale design er det kun ett hull i bunnen av kammerveggen. Vannstanden i fordrøyningskamrene må stige 10 cm for å nå opp til neste hull, noe som opptar dyrebar kapasitet i systemet og bidrar til å øke spissavrenningen. Problemet kan løses ved å legge inn flere hull nærmere bunnen av kammerveggen.

Lengre nedbørhendelser (30 min – 60 min)

Felles for de fleste lengre nedbørhendelsene er at miniregnbedets kapasitet overskrides allerede før spissavrenningen oppstår. Her er gjennomsnittlig avrenning fra systemet minst, med en snittverdi på 0,89 l/s, men det totale nedbørvolumet er så stort at systemet etter hvert går fullt i samtlige simuleringer. For disse hendelsene reduseres spissavrenning i minst grad, med minste reduksjon for alle simulerte hendelser på 0,8 prosent for nedbørhendelse med gjentaksintervall 5 år og 60 minutters varighet. Også forsinkelsen av t_p er minst for de lange hendelsene.

Ser man kun på reduksjon og forsinkelse av spissavrenning, kan det se ut til at miniregnbedet ikke har noen effekt av betydning ved lange nedbørhendelser. Det er her effektivt fordrøyningsvolum blir en viktig parameter. Selv om miniregnbedet har liten fordrøyningsvirkning på spissavrenningen til disse hendelsene, er effektivt fordrøyningsvolum svært høyt. Største V_E finner man ved varighet 60 minutter og 20 års gjentaksintervall i Tabell 3.3. Her er $V_E = 788$ l, altså 2,9 ganger så stort som miniregnbedets tilgjengelige volum for fordrøyning. Håndteringen av disse hendelsene er ikke ideell, men det er et eksempel på at V_E kan være et nyttig verktøy i totalvurderingen av miniregnbedets fordrøyningsvirkning. Ved optimalisering av håndteringen ved lengre nedbørhendelser kan det være nødvendig å utvide systemets tilgjengelige volum for fordrøyning.

Miniregnbedet har altså ulik fordrøyningsvirkning ved korte hendelser, nedbørhendelser av middels varighet og lengre nedbørhendelser. Selve reduksjonen av spissavrenning er størst ved de korte hendelsene, men den faktiske avrenningen er minst ved de lengste hendelsene. Tidspunkt for spissavrenning forsinkes mest ved hendelser av middels varighet, men her er snittverdien for spissavrenning størst. En optimalisering av miniregnbedets indre design og dimensjoner kan forbedre fordrøyningsvirkningen ved flere nedbørhendelser.

4.5 Optimalisering

Endring i hulldiametere og hullmønster i kammervegger påvirker systemets evne til å fordrøye takvann ved ulike regnhendelser. Noen hullmønstre gir lav avrenning for lange nedbørhendelser, mens andre design gir lav avrenning for de korte, intense hendelsene. Derfor er tabellverket i optimaliseringen utarbeidet for hver enkelt nedbørhendelse. Når endring i indre design alene ikke lenger har gitt en tilstrekkelig fordrøyningsvirkning, er systemets volum utvidet. Først i høyden, til slutt i bredde og lengde. Optimaliseringen er gjort med utgangspunkt i vurderingene gjort i delkapittel 4.4.

Det er størst variasjon mellom optimaliseringsforslagene for regnhendelser med varighet fra 1 minutt til 10 minutter. Her er det gjort få endringer i kammerareal, mens hullmønster, plassering av overløp og hulldiametere varierer i stor grad. Miniregnbedets opprinnelige størrelse passet godt i de fleste av de kortere regnhendelsene. Disse korte, intense nedbørhendelsene fører raskt til at innløpskammer blir oversvømt og at store vannføringer går rett i overløp. Her har det derfor vært viktig å lede større vannmengder over til fordrøyningskammeret raskt, slik at det ikke blir høy avrenning ut av systemet som følge av overløpsaktivitet. Dette er hovedsakelig gjort ved å endre på hullmønster og hulldiametere i kammerveggen mellom innløpskammer og fordrøyningskammer.

De lengre nedbørhendelsene er mindre intense og gir gjerne lavere spissavrenning, men krever at miniregnbedet håndterer et stort volum uten overbelastning. Her er det avgjørende å benytte et hullmønster med hulldiametere som ikke tillater høyere vannføring ut av systemet enn 0,1 l/s, selv ved høy vannstand. Det er også viktig å få

avrenningen raskt opp mot grenseverdien, slik at så mye volum som mulig frigjøres til nytt vann i fordrøyningskammeret. Ved de lengste nedbørhendelsene har det vært nødvendig å øke miniregnbedets volum i større grad.

Volumforholdet mellom fordrøyningskamre og blomsterkasse kan justeres etter behov. Blomsterkassens areal tilsvarer fordrøyningskammerets areal og det er ikke gjort noen endringer i hulldiameter. Det er viktig å beholde nok volum og god drenering i blomsterkassen slik at det skaper et godt miljø for beplantningen. Derfor er hulldiameter og blomsterkassens dybde beholdt.

4.5.1 Form

I tabellverket er det tatt utgangspunkt i at miniregnbedets form skal kunne endres etter lokale behov. Miniregnbedet kan for eksempel gjøres smalere slik at det passer inn på et typisk fortau i bysentrum. På den måten vil systemet ta opp lite av fortauets bredde og være til lite forstyrrelse for fotgjengere, mens det fortsatt vil infiltrere, fordampe og fordrøye overvann fra tak og være et positivt bidrag til gatas estetikk. Derfor foreslår tabellverket kammerarealer framfor bredder og lengder.

4.5.2 Utseende

Miniregnbedets indre fordrøyningskamre og blomsterkasse er støttet opp av en ytre kledning. Det ytre og indre systemet er bygd separat og gir en mulighet til å variere systemets utseende. Den testede versjonen benyttet i denne masteroppgaven er bygd av resirkulert plast som etterligner treverk. Dersom den ytre kledningen kan leveres i ulike versjoner, for eksempel murstein og treverk i ulike farger eller nyanser, vil systemet kunne tilpasses ulike bygningers kledning. For at miniregnbedet skal tas i bruk og være et estetisk positivt bidrag til bybildet, er det hensiktsmessig å ha valgmuligheter i systemets utseende, slik at systemet kan tilpasses omgivelsene best mulig.

5 Konklusjon

Målet med gradsoppgaven har vært å undersøke miniregnbedets fordrøyningsvirkning, foreslå forbedringer av systemet og utarbeide et tabellverk for dimensjonering. Oppgaven er løst gjennom å bygge og kalibrere en modell av miniregnbedet i SWMM og kjøre simuleringer av utvalgte nedbørhendelser i modellen.

Resultatene fra simuleringer i SWMM viser at miniregnbedets fordrøyningsvirkning varierer med de ulike nedbørhendelsene. For korte og intense nedbørhendelser er fordrøyningsvirkningen god, med opptil 87 prosent reduksjon av $Q_{\text{maks,avrenning}}$. Ved disse hendelsene er V_E ofte lik $V_{\text{nedbør}}$, noe som betyr at miniregnbedet har en fordrøyningsvirkning på hele nedbørvolumet. Nedbørhendelser av middels varighet har i snitt størst forsinkelse av t_p , med største forsinkelse på 92 prosent. Simuleringer av disse hendelsene viser dog høy spissavrenning som følge av at store vannmengder tilføres systemet over et relativt kort tidsrom. Simuleringer av de lengre nedbørhendelsene viser at miniregnbedet er i stand til å fordrøye et nedbørvolum opptil 2,9 ganger så stort som miniregnbedets tilgjengelige volum for fordrøying. V_E sier derimot lite om hvordan dette volumet fordrøyes, og for de lengre nedbørhendelsene er reduksjonen av spissavrenning mellom 19 og 0,8 prosent.

Utarbeidelsen av tabellverket for dimensjonering ble gjort med den hensikt å forbedre miniregnbedets fordrøyningsvirkning. Ved bruk av forslagene til dimensjonering i Tabell 3.3 blir $Q_{\text{maks,avrenning}} < 0,1$ l/s for alle nedbørhendelser med opptil 20 års gjentaksintervall fra Tabell 2.3. Gjennom målrettet optimalisering for hver nedbørhendelse er systemet videreutviklet med den hensikt å forbedre fordrøyingsevne uten å utvide miniregnbedets arealbruk på overflaten, så langt det lot seg gjøre.

En utfordring med miniregnbed er at det samme designet kan ha positiv effekt ved én type nedbørhendelse og negativ effekt ved en annen. Dette kan by på utfordringer ved dimensjonering, særlig dersom takvannet ledes videre til ledningsnett og maksimale grenser for påslipp må overholdes. I slike tilfeller kan det være nødvendig

å utvide systemets ytre dimensjoner, noe som vil øke systemets arealbruk på overflaten.

Takvann som føres direkte til fordrøyningskamrene uten opphold i blomsterkassen vil ikke vanne planter og vil i svært liten grad fordampe. Denne delen av systemet bidrar i liten grad til å gjenopprette en naturlig vannbalanse. Dette er ugunstig med tanke på at det er fordrøyningskamrene som håndterer de største vannmengdene.

Vannføringsplitterens terskelverdi for å sende vann direkte til fordrøyningskamrene er på 0,146 l/s, hvilket krever en nedbørintensitet på 29 l/s/ha for et takareal på 50 m². Terskelverdien vil altså overskrides relativt ofte (se Figur V. 10). Dersom miniregnbedet har utslipp til lokalt terreng, bør det om mulig legges til rette for at vannet ledes til en permeabel overflate.

En av de store fordelene ved miniregnbed er at systemet kan plasseres på overflaten. Ved å holde arealbruken lav kan miniregnbed være et særlig nyttig overvannsystem i trange, urbane og allerede utbygde områder. Dette er i tråd med tiltak 7 i Oslo kommunes handlingsplan for overvannshåndtering. I tillegg vil gravefrie metoder ha økonomiske fordeler og gjøre systemet mer fleksibelt for eventuelle endringer etter installasjon.

Resultatene i denne oppgaven viser at miniregnbed kan være et nyttig supplement til de kjente og etablerte LOD-tiltakene. Systemet møter et behov som i liten grad er dekket, ved å muliggjøre gravefri installering. Miniregnbed kan plasseres på fortau, fordrøye takvann og skape et grønnere bybilde. Bruk av miniregnbed kan bidra til å redusere utslipp av urensset spillvann til naturen og fordrøye takvann slik at oversvømmelser kan unngås. I stedet for at overvann ledes bort i lukkede rør, kan miniregnbed være et viktig bidrag til å gjenopprette den naturlige vannbalansen i urbane områder.

Referanser

- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2014). *Fluid Mechanics - Fundamentals and Applications*. New York: McGraw-Hill.
- Becker, M. A., Muthanna, T. M., & Braskerud, B. C. (2016). Trinn 1: Reduser overvannet i avløpsnettene ved å frakoble taknedløp. *VANN*, 51(1), 359-369. <https://vannforeningen.no/dokumentarkiv/trinn-1-reduser-overvannet-i-avlopsnettene-ved-a-frakoble-taknedlop/>.
- Bergknapp. (u.d.). *Oppbygning*. Hentet fra url bergknapp.no: <https://www.bergknapp.no/produkter/gr%c3%b8nne-tak/oppbygning> (17.05.2020).
- Braskerud, B. C., & Paus, K. H. (2013). Forslag til dimensjonering og utforming av miniregnbed for norske forhold. *VANN*, 48(1), 54-67. <https://vannforeningen.no/dokumentarkiv/forslag-til-dimensjonering-og-utforming-av-regnbed-for-norske-forhold/>.
- Braskerud, B. C., & Paus, K. H. (2020). FNs bærekraftsmål og bruk av lokal overvannsdistribusjon. *VANN*, 55(1), 75-86.
- Braskerud, B. C., Paus, K. H., & Ekle, A. (2013). *Anlegging av regnbed*. Hentet fra NVE.no: http://publikasjoner.nve.no/rapport/2013/rapport2013_03.pdf (21.02.2020).
- Campbell, N. S., D'Arcy, B., & Perry, M. (2019). *Effective Attenuation and the implementation of SUDS in Scotland*. Edinburgh, Skottland: C&D Associates LLP.
- Chin, D. A. (2013). *Water-Resources Engineering*. Harlow: Pearson Education Limited.
- De forente nasjoner. (2015). *FNs bærekraftsmål*. Hentet fra url: <https://www.fn.no/om-fn/FNs-baerekraftsmaal> (26.03.2020).
- Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB). (2016). *Risikoanalyse av regnflom i by*. Hentet fra url: https://www.dsb.no/globalassets/dokumenter/rapporter/delrapport_-regnflom_2016.pdf (19.01.2020).
- Finnemore, E. J., & Franzini, J. B. (2002). *Fluid Mechanics with Engineering Applications*. New York: McGraw-Hill Education.

- Gabriel, S., & Fiil, L. (2016). *Regnhøsting for vanning i hager*. Hentet fra url: <https://www.nve.no/Media/5026/overvann-regnhøsting-for-vanning-i-hage.pdf> (03.03.2020).
- Gironás, J., Roesner, L. A., Davis, & Jennifer. (2009). *Storm Water Management Model - Applications Manual*. Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency.
- GRAF. (u.d.). *Regendieb Pro*. Hentet fra url: <https://www.graf-water.com/rainwaterharvesting/downpipe-filter/regendieb-pro/regendieb-pro-grey.html> (21.02.2020).
- Hendriks, M. R. (2010). *Introduction to Physical Hydrology*. New York: Oxford University Press.
- Hernes, R. R. (2018). *Evaluating Hydrological Performance of LID-Modules in Mike Urban (Mastergradsavhandling, NTNU)*. Hentet fra url: <http://hdl.handle.net/11250/2573231>.
- Kvitsjøen, J. (2019). *Vassdrag versus overvann, ulike perspektiver fra hydrologen og VA-ingeniøren*. Hentet fra url: https://vannforeningen.no/wp-content/uploads/2019/10/07_Kvitsjøen_Avløpsrehabilitering.pdf (21.04.2020).
- Løvås, G. G. (2013). *Statistikk for universiteter og høyskoler*. Oslo: Universitetsforlaget.
- Lindholm, O., Endresen, S., Thorolfsson, S., Sveinung, S., Jakobsen, G., & Aaby, L. (2008). *Veiledning i klimatilpasset overvannshåndtering (Rapport 162/2008)*. Hamar: Norsk Vann.
- Miljødirektoratet & NIBIO. (2017). *Vegetasjon til grønne tak*. Hentet fra url: <https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/m627/m627.pdf> (02.04.2020).
- Nilsen, V. (28.10.2019). Forelesning. *Vassdragsplanlegging og VA-systemer (THT300)*. Ås: NMBU.
- Noreng, K., Kvalvik, M., Busklein, J. O., Ødegård, I. M., Clewing, C. S., & French, H. K. (2012). *Grønne tak - resultater fra et kunnskapsinnhentingsprosjekt*. Hentet fra url: https://www.sintefbok.no/book/index/932/groenne_tak_resultater_fra_et_kunnskapsinnhentingsprosjekt (02.04.2020).

- Norsk klimaservicesenter. (2015). *Klima i Norge 2100*. Hentet fra url:
<https://klimaservicesenter.no/faces/desktop/article.xhtml?uri=klimaservicesenteret/klima-i-norge-2100> (20.05.2020).
- Norsk klimaservicesenter. (u.d.). *Dimensjonerende nedbør (IVF) fra målestasjoner*. Hentet fra url: <https://klimaservicesenter.no/faces/desktop/idf.xhtml> (24.02.2020).
- NOU 2015:16. (2015). *Overvann i byer og tettsteder — Som problem og ressurs*. Klima- og miljødepartementet. Hentet fra url: <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/nou-2015-16/id2465332/?ch=1> (16.02.2020)
- Oslo kommune. (2019). *Handlingsplan for overvannshåndtering i Oslo* (Byrådssak 215/19). Hentet fra url: <https://www.oslo.kommune.no/vann-og-avlop/arbeiderpa-vann-og-avlopsnett/overvannshandtering/#gref> (19.01.2020).
- OTT Hydromet. (u.d.). *Sutron Xpert*. Hentet fra url: <https://www.sutron.com/product/xpert/> (20.05.2020)
- Padulano, R., & Del Giudice, G. (2018). Vertical Drain and Overflow Pipes: Literature Review and New Experimental Data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*.
- Paus, K. H. (2018). Forslag til dimensjonerende verdier for trinn 1 i Norsk Vann sin tre-trinns strategi for håndtering av overvann. *VANN*, 53(1), 66-77.
- Renovasjonsetaten. (u.å.). *Faktablad for Oslokompost*. Hentet fra url: <https://www.oslo.kommune.no/avfall-og-gjenvinning/kjop-oslokompost/#gref> (10.03.2020).
- Rossman, L. A. (2015). *Storm Water Management Model - User's Manual Version 5.1*. Cincinnati: EPA.
- Schwartz, F. W., & Zhang, H. (2003). *Fundamentals of Ground Water*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- SINTEF Byggforsk. (2017). *Takrenner og nedløp*. Oslo: SINTEF.
- Statistisk sentralbyrå (SSB). *Kommunefakta Oslo*. Hentet fra url: <https://www.ssb.no/kommunefakta/oslo> (24.02.2020)
- Tipler, P. A., & Mosca, G. (2008). *Physics For Scientists and Engineers*. New York: W. H. Freeman and Company.

Vann- og avløpsetaten. (2017). *Overvannshåndtering - en veileder for utbygger*.

Hentet fra url: <https://www.oslo.kommune.no/vann-og-avlop/arbeider-pa-vann-og-avlopsnettet/overvannshandtering/#gref> (02.05.2020).

Yang, L., Smith, J. A., Baek, M. L.-Z., Jessup, S. M., Tian, F., & Hu, H. (2014).

Impact of Urbanization on Heavy Convective Precipitation under Strong Large-Scale Forcing. Boston: The American Meteorological Society.

Ødegaard, H. (Red.). (2014). *Vann- og avløpsteknikk*. Hamar: Norsk Vann.

Vedlegg 1

Resultater fra Forsøk 1

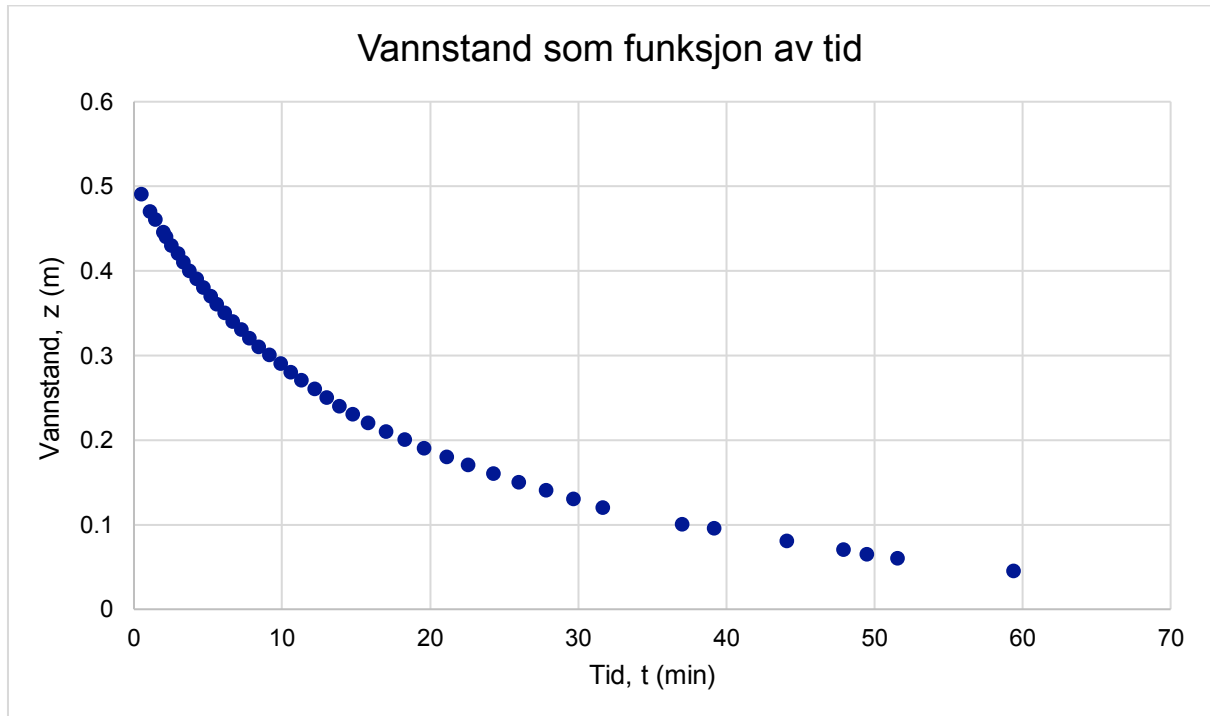
Resultater fra de hydrauliske testene med fordrøyningskamrene er vist i Tabell V. 1. Rådataene er benyttet i kalibreringen av utløpskoeffisienter og som et datagrunnlag for sammenligning av vannføring ut av SWMM-modellen og det virkelige miniregnbedet. I Forsøk 1 ble fordrøyningskamrene tilført vann i form av kasseregner med ulik vannføring og varighet. Gjennom de hydrauliske testene ble det observert at vannstanden var tilnærmet lik i fordrøyningskamrene K2 til K6. De er derfor slått sammen og kalt «Fordrøyningskamre» i tabellen.

Tabell V. 1: Resultater fra Forsøk 1 i hydraulisk laboratorium. Vannstand (z) er målt som funksjon av tid (t) for hver test.

Tilført vannføring	t (mm:ss)	Vannstand, z (cm)		
		Innløpskammer	Fordrøyningskamre	Utløpskammer
0,939 l/s med varighet 5 minutter	00:00	0	0	0
	00:20	49	1	1
	05:00	53	41	2
	05:02	49	40	2
	07:55	41	40	1
1,464 l/s med varighet 5 minutter	00:00	0	0	0
	00:11	49	1	1
	03:17	51	50	2
	04:46	52	51	2
	05:00	51	51	3
0,7 l/s med varighet 10 minutter	00:00	0	0	0
	00:28	49	1	1
	07:28	51	49	2
	08:30	52	51	2
	10:00	52	51	3
	10:35	49	49	1
0,939 l/s med varighet 10 minutter	00:00	0	0	0
	00:19	47	1	1
	06:12	53	49	2
	10:00	55	52	3
	10:38	47	47	2
	13:27	40	40	2
0,571 l/s med varighet 15 minutter	00:00	0	0	0
	00:32	49	1	1
	09:49	53	49	2
	10:30	53	52	3
	15:00	54	52	4
	15:20	49	49	2
18:18	40	40	1	

Resultater fra Forsøk 2

I Forsøk 2 ble den synkende vannstanden i fordrøyningskamrene målt som funksjon av tid. Resultatene fra forsøkene er vist grafisk i Figur V. 1.



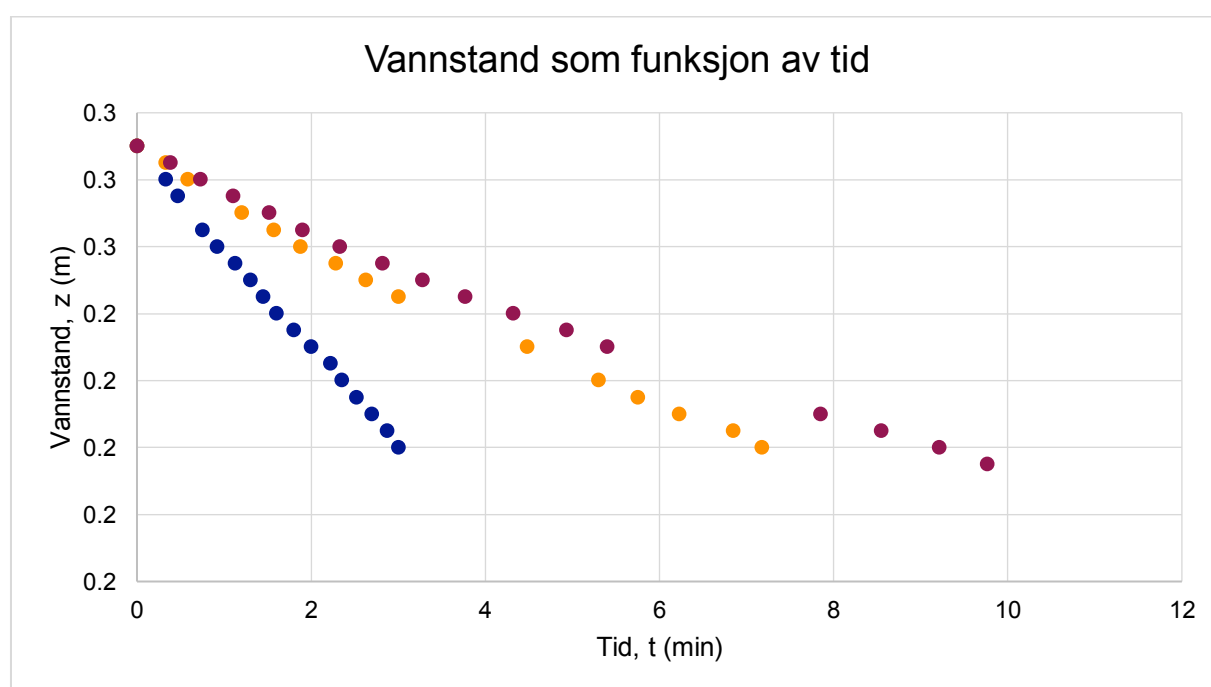
Figur V. 1: Resultater fra Forsøk 1 i hydraulisk laboratorium.

Vannstanden på andre siden av kammerveggen, altså i utløpskammeret, er svært lav gjennom forsøkene og gir fri vannstråle ut av kammerveggen. Basert på dataene i Figur V.1 kan vannføring ut av fordrøyningskamrene beregnes med Likning 2.3 ved å sette inn arealet av innløpskammer og fordrøyningskammer, $A_{K1,K2} = 0,5832 \text{ m}^2$.

Vedlegg 2

Resultater fra infiltrasjonstester i blomsterkasse

Det ble gjennomført tre infiltrasjonstester i blomsterkassen med den hensikt å finne en snittverdi for infiltrasjonshastighet som kan legges inn i SWMM-modellen. Figur V. 2 viser vannstand som funksjon av tid fra de tre forsøkene. Basert på resultatene fra testene kan vannføring ut av blomsterkassens bunn beregnes med Likning 2.3.

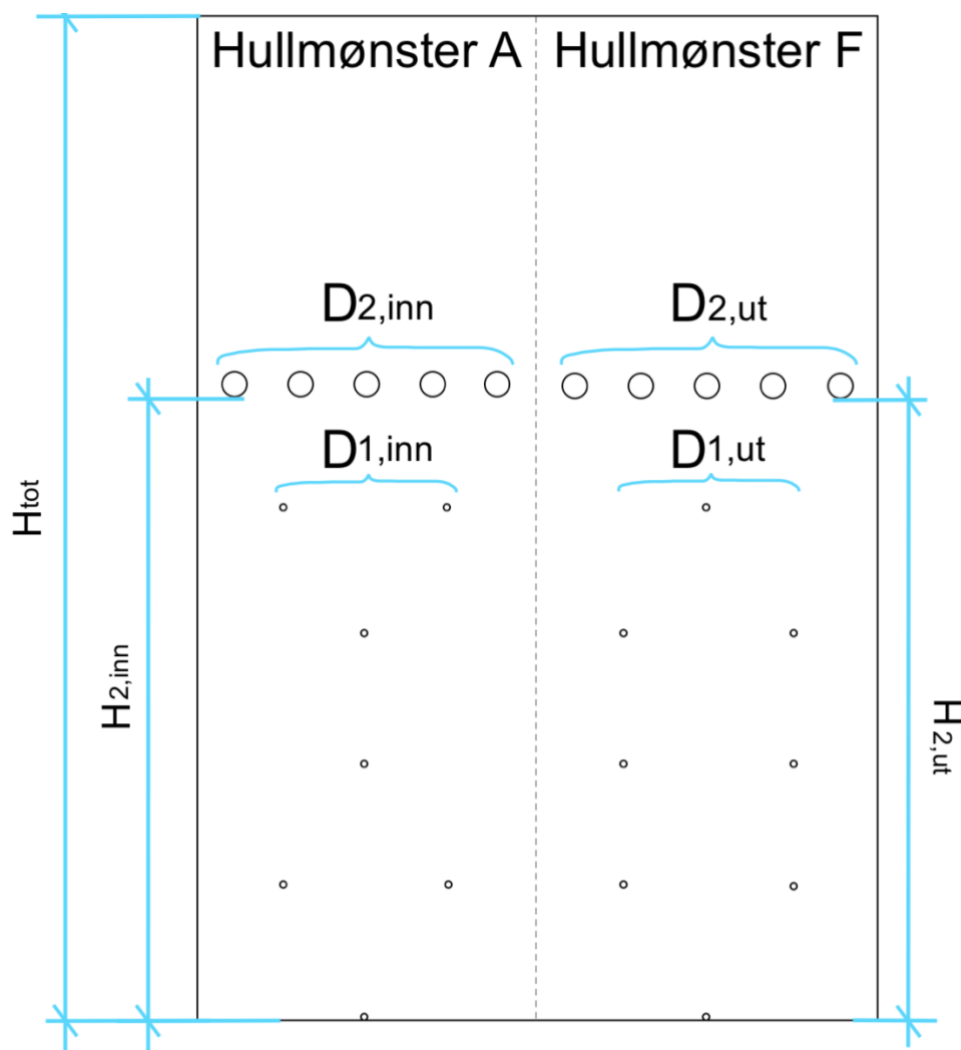


Figur V. 2: Resultater fra infiltrasjonstester i hydraulisk laboratorium. Blå markør viser resultater fra første test, oransje viser for andre test og mørk rød viser resultater fra siste infiltrasjonstest.

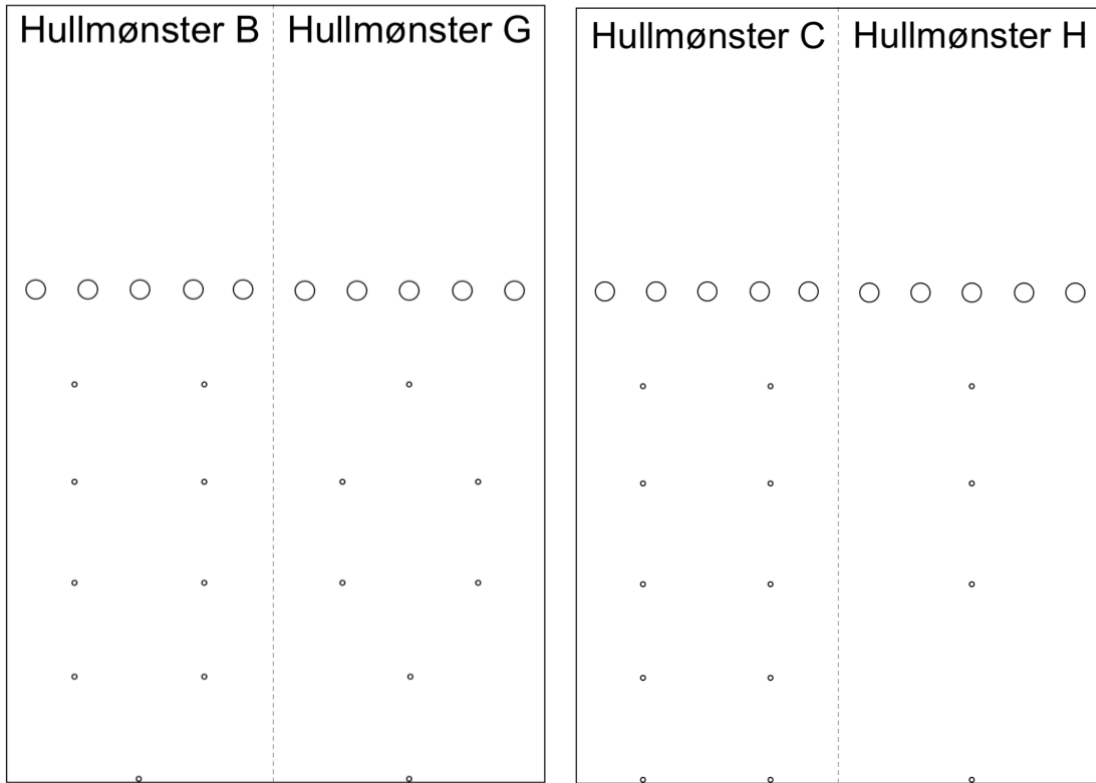
Figuren viser svært ulik synkehastighet for de tre forsøkene. Det ser ut til at infiltrasjonshastigheten blir lavere for hvert forsøk og det mistenkes at fiberduken i bunnen av blomsterkassen er i ferd med å gå tett. For å få verdier som er minst mulig påvirket av tetningen i fiberduken, benyttes kun resultatene fra første forsøk i videre beregninger.

Vedlegg 3

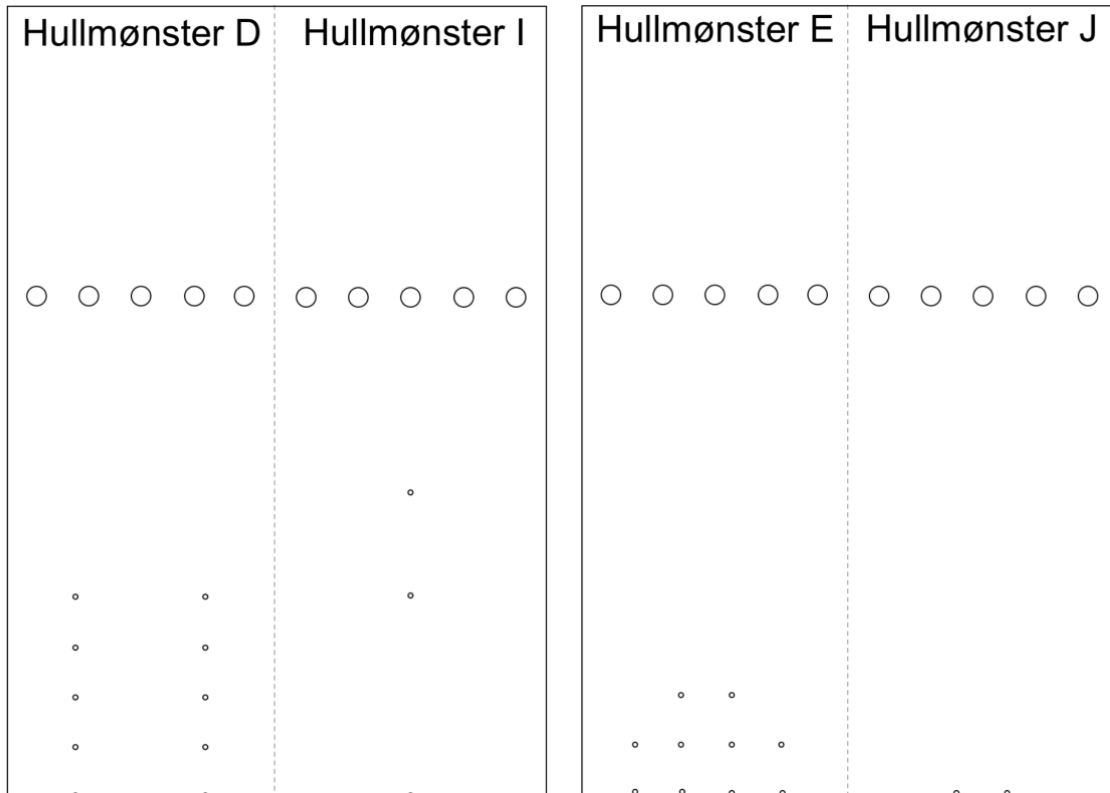
Illustrasjoner som viser dimensjoner og design i miniregnbedet er vist i Figur V.3 – Figur V.9. I systemets originale design er $D_{1,inn} = D_{1,ut} = 0,5$ cm og $D_{2,inn} = D_{2,ut} = 2,0$ cm.



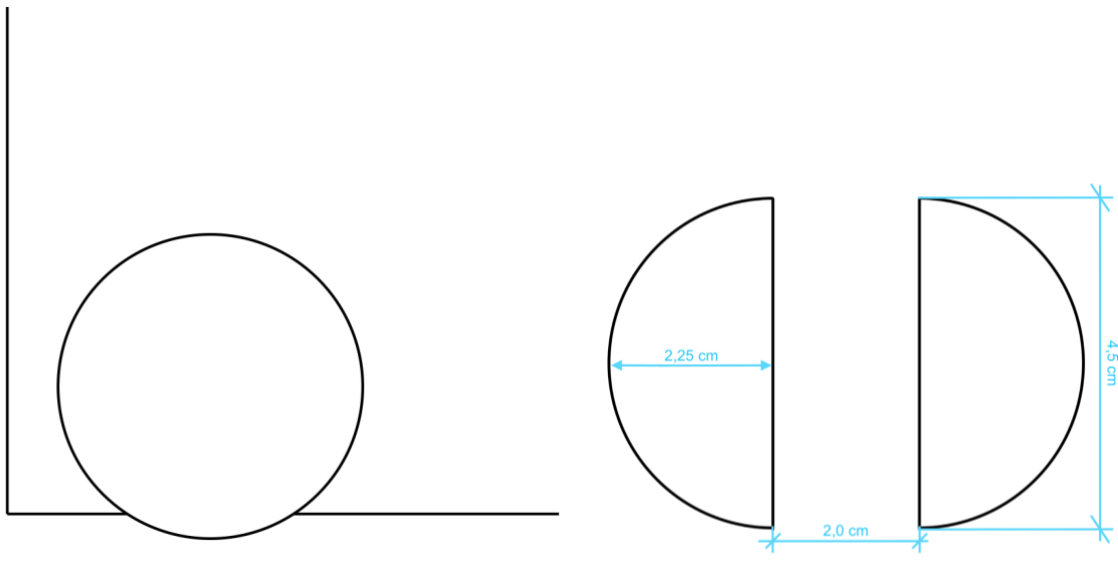
Figur V. 3: Skisse av hullmønster A og F i kammervegg som skiller fordrøyningskamre fra innløps- og utløpskammer, med diametere ($D_{1,inn}$, $D_{2,inn}$, $D_{1,ut}$ og $D_{2,ut}$) og høyder (H_{tot} , $H_{2,inn}$ og $H_{2,ut}$). Dette er det originale designet av kammerveggen, bortsett fra at et nytt hull (H_{ny}) er lagt til i bunnen av veggen mot innløpskammer, som et forslag til forbedring.



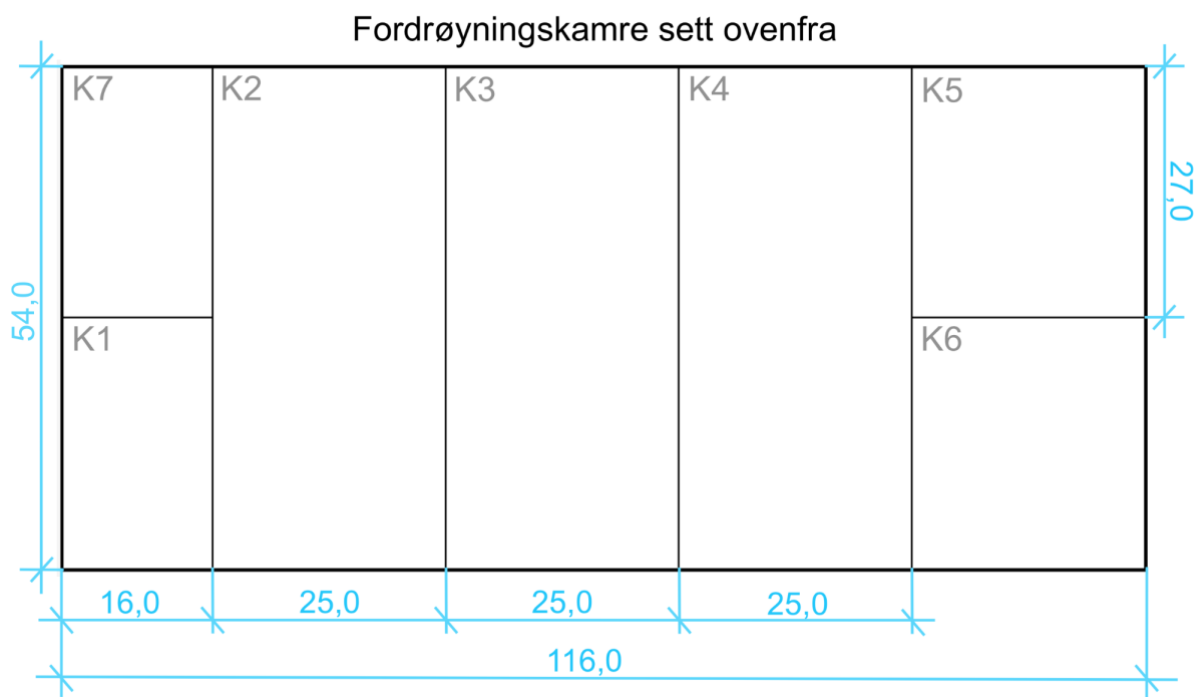
Figur V. 4: Skisse av hullmønster B, C, G og H i kammervegg som skiller fordrøyningskamre fra innløps- og utløpskammer.



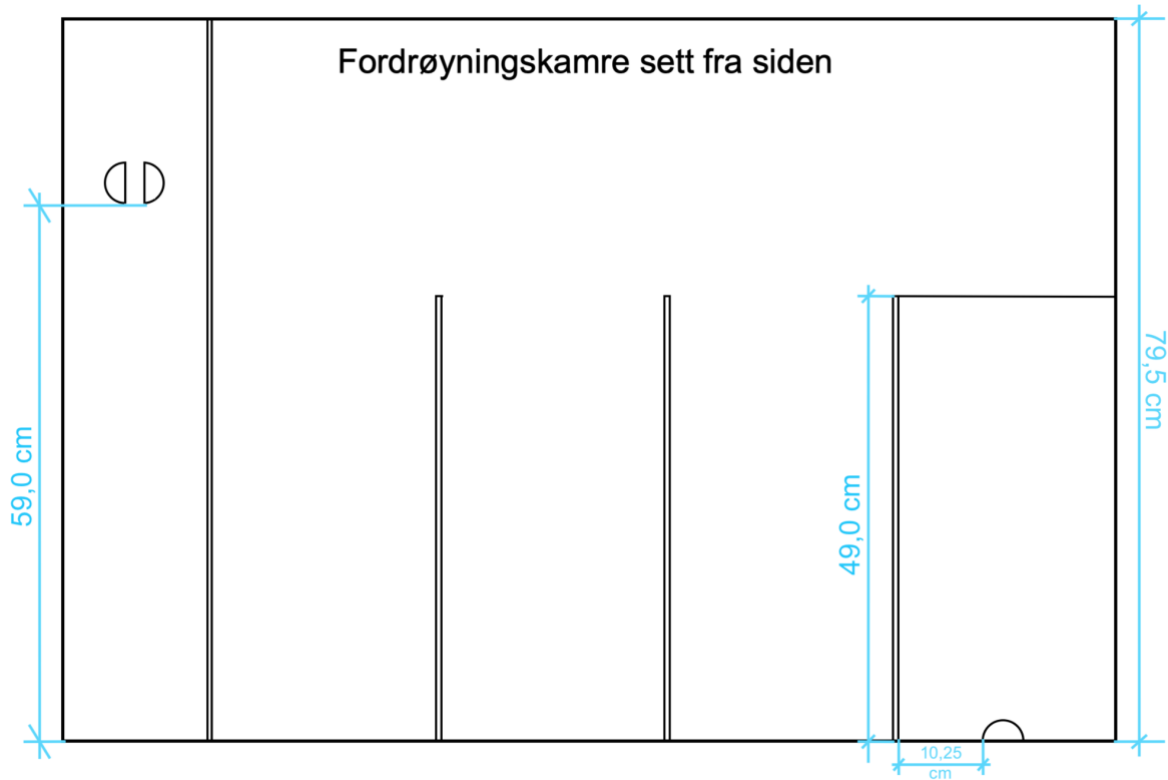
Figur V. 5: Skisse av hullmønster D, E, I og J i kammervegg som skiller fordrøyningskamre fra innløps- og utløpskammer.



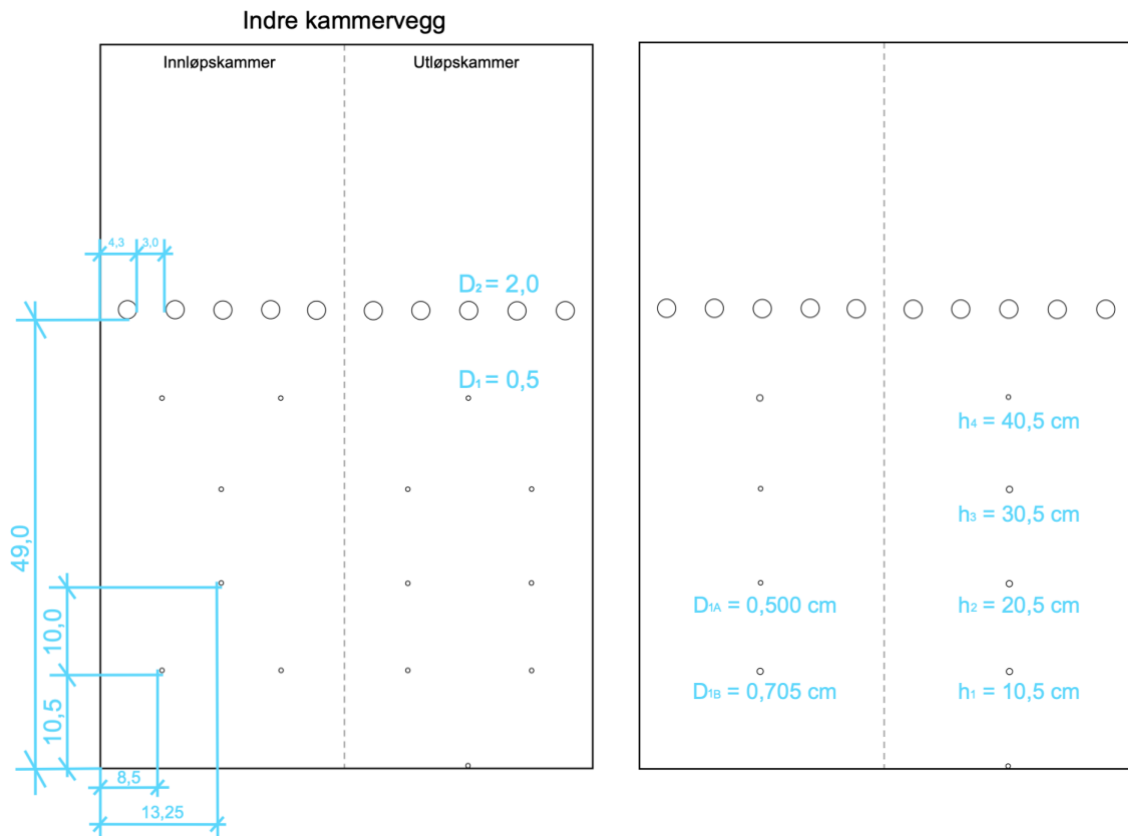
Figur V. 6: Skisse av utløp (t.v.) og overløp mellom innløpskammer og utløpskammer (t.h.). Utløpet har diameter 6,0 cm og er plassert 0,5 cm lavere enn utløpkammerets bunn.



Figur V. 7: Skisse av fordrøyningskamrene sett ovenfra, med indre dimensjoner gitt i cm. Ytre kledning er plassert på utsiden av kamrene. Blomsterkassen har samme areal som K2-K6 har sammenlagt.



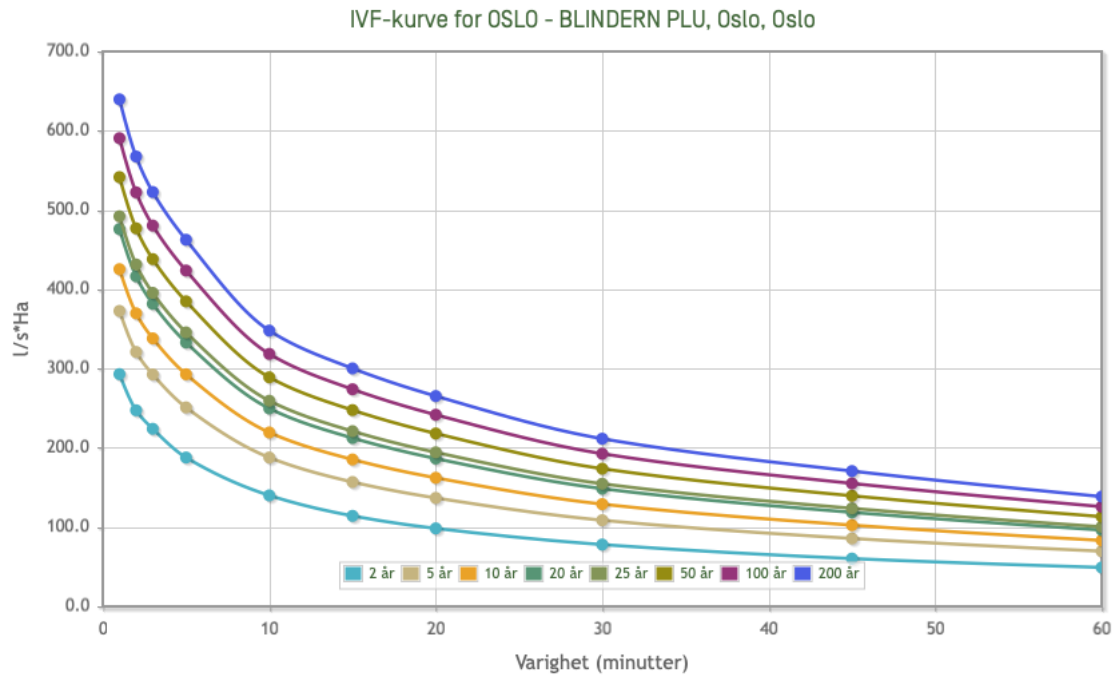
Figur V. 8: Skisse av fordrøyningskamrene sett fra siden, med dimensjoner gitt i cm.



Figur V. 9: Illustrasjon av indre kammervegg med dimensjoner.

Vedlegg 4

Figur V.10 viser dimensjonerende nedbør for Oslo i form av en IVF-kurve.



Figur V. 10: IVF-kurve fra Blindern målestasjon med gjentaksintervall fra 2 til 200 år, der I er nedbørintensitet, V er nedbørhendelsens varighet og F er gjentaksintervall (Norsk klimaservicesenter, 2020).



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway