



Norges miljø- og  
biovitenskapelige  
universitet

**Masteroppgave 2020 30 stp**  
Fakultet for realfag og teknologi

## **Grønne tak med magasinerende sjikt: Avrenning ved kontrollerte fyllingsforsøk og kalibrering av DDD-modellen**

Green roofs with water storage capacity – recession  
effect in controlled filling tests and calibration of the  
DDD model

**Peter Andreas Bassøe**  
Fakultet for realfag og teknologi



*A man with a watch knows what time it is. A man with two watches is never sure*

Segal's Law



# Forord

Denne masteroppgaven markerer slutten på min tid som student ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet, i studiet vann- og miljøteknikk. Veien frem mot mål har vært utfordrende og ekstremt lærerikt. Det er et knippe mennesker jeg har valgt å takke.

Først vil jeg rette en stor takk til min hovedveileder, Vegard Nilsen, for gode diskusjoner, hyggelige samtaler og ikke minst presise tilbakemeldinger gjennom prosessen med oppgaven. En ekstra takk til min biveileder Nils-Otto Kitterød for engasjement og gode ideer ved gjennomføringen av forsøkene. Jeg vil også takke medstudent Ingrid K. Ydse for gjennomføringen av forsøkene.

Spesielt vil jeg takke Knut Møen v/ NVE for tilsendte data og engasjement rundt forsøkene. DDD-modellens skaper og min andre biveileder, Thomas Skaugen, fortjener også en stor takk for oppsett og forståelse av modellen.

Stor takk til nær familie og venner for faglig og personlig støtte i denne perioden. Dere har alle vært delaktig i gjennomføringen av utdanningsløpet mitt.

Ås, 15. Desember,  
2020

Peter Andreas Bassøe



## Sammendrag

Etablering av grønn infrastruktur har i lang tid vært fokusområde i Norge, og torvtak har lenge vært å se på hus og hytter. I dag blir grønn infrastruktur sett på som en del av løsningen til de mer økende og tilstedeværende utfordringene med overvann. Sterk befolkningsvekst og fortetning i norske byer bidrar til økt avrenning og krever nye løsninger for håndtering av overvann.

Våren 2018 ble forskningsinfrastrukturen Bia etablert ved NMBU. Formålet var å etablere en arena som kan danne grunnlag for å vurdere effekt av og videre forskning på grønne tak. De grønne takene består av 40 mm sedum over et magasinerende lag bestående av 150 mm finknust LECA.

Formålet med denne oppgaven er å undersøke et av de grønne takenes resesjonsegenskaper gjennom kontrollerte fylling- og tømmeforsøk, og videre bruke måledata fra forsøkene til å kalibrere Distance Distribution Dynamics-modellen (DDD). Resesjonshendelsene i oppgaven er godt beskrevet og viser takets evne til tømming ved fullstendig metning.

Totalt ble det gjennomført fire kalibreringer, hvor den genererte stasjonære nedbørshendelsen gir gjennomsnittlige NSE- og KGE-verdier på henholdsvis 0.964 og 0.935. Modellen oppnår tilfredsstillende resultater ved validering mot et utvalg naturlige nedbørhendelser med gjennomsnittlige NSE- og KGE-verdier på henholdsvis 0.708 og 0.795.

For de naturlige hendelsene oppnås det gode NSE- og KGE-verdier, men dette alene er ikke nok til å konkludere med at kalibrerte parametre er optimalisert. Basert på det som er gjort i denne oppgaven kan det ikke konkluderes med at kalibrering mot resesjon gir en god modell for å beskrive naturlig avrenning fra grønne tak med et magasinerende lag.





## Summary

Establishment of green infrastructure has long been a focus area in Norway, and turf roofs have long been seen in houses and cottages. Today, green infrastructure is seen as part of the solution to the increasing and present challenges of storm water. Strong population growth and densification in Norwegian cities contributes to increased runoff and requires new solutions for managing storm water.

In the spring of 2018, the research infrastructure Bia was established at NMBU. The purpose was to establish an arena that can form the basis for assessing the effect of and further research on green roofs. The green roofs consist of 40 mm sedum over a storage layer consisting of 150 mm finely crushed LECA.

The purpose of this thesis is to investigate one of the green roofs' recession properties through controlled filling and emptying experiments, and further use measurement data from the experiments to calibrate the Distance Distribution Dynamics model (DDD). The recession events in this thesis are well described and show the roof's ability to empty at full saturation.

A total of four calibrations were performed, where the generated stationary precipitation event gives average NSE and KGE values of 0.964 and 0.935, respectively. The model achieves satisfactory results by validation against a selection of natural precipitation events with average NSE and KGE values of 0.708 and 0.795.

For the natural events, good NSE and KGE values are obtained, but this alone is not enough to conclude that calibrated parameters have been optimized. Based on what has been done in this thesis, it cannot be concluded that calibration against recession provides a good model for describing natural runoff from green roofs with a storage layer.



# Innhold

Forord . . . . .	iii
Sammendrag . . . . .	v
Summary . . . . .	vii
Innhold . . . . .	ix
Figurer . . . . .	xii
Tabeller . . . . .	xiii
Forkortelser . . . . .	xv
<b>1 Introduksjon</b>	<b>1</b>
1.1 Formål og valg av problemstilling . . . . .	1
1.2 Oppgaveoppbygging . . . . .	2
1.2.1 Avgrensninger . . . . .	2
<b>2 Bakgrunn</b>	<b>3</b>
2.1 Overvann . . . . .	3
2.1.1 Overvannshåndtering . . . . .	3
2.2 Grønne tak . . . . .	4
2.3 DDD-modellen . . . . .	5
2.3.1 Hydrologisk modul . . . . .	6
2.3.2 Avrenningsmodul . . . . .	7
2.3.3 NSE og KGE . . . . .	11
2.4 Tidligere forskning . . . . .	12
<b>3 Metode</b>	<b>15</b>
3.1 Takets utforming og instrumentering . . . . .	15
3.2 Gjennomføring av fyller-/tømmeforsøk . . . . .	19
3.2.1 Inngangsfiler og tilpassing av DDD-modellen . . . . .	25
3.2.2 Kalibreringsrutine . . . . .	28
3.2.3 Validering . . . . .	29
<b>4 Resultater</b>	<b>31</b>
4.1 Oppfylling og tømming av taket . . . . .	31

4.1.1	Vannivå i taket . . . . .	31
4.1.2	Vannføring ut av taket . . . . .	35
4.2	DDD-modellen . . . . .	37
4.2.1	Kalibrering . . . . .	38
4.2.2	Validering . . . . .	43
<b>5</b>	<b>Diskusjon</b>	<b>49</b>
5.1	Gjennomføring av fyll- og tømmeforsøk . . . . .	49
5.2	DDD-modellen . . . . .	50
5.2.1	Kalibrering . . . . .	50
5.2.2	Validering . . . . .	51
<b>6</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>53</b>
6.1	Videre arbeid . . . . .	53
	<b>Referanser</b>	<b>55</b>
	<b>Vedlegg A Parameterfil</b>	<b>57</b>
	<b>Vedlegg B Datafil</b>	<b>59</b>
	<b>Vedlegg C Resultatfil</b>	<b>61</b>
	<b>Vedlegg D Valideringshendelser</b>	<b>63</b>
	<b>Vedlegg E Forsøksnotater</b>	<b>65</b>

# Figurer

2.1	Magasineringskapasitet i DDD-modellen . . . . .	6
2.2	Illustrasjon av metningslag . . . . .	9
3.1	Oversiktsbilde av Bia . . . . .	15
3.2	Skissert taktversnitt . . . . .	16
3.3	Nivåsensor i taksverrsnittet. . . . .	16
3.4	Sensorplassering . . . . .	17
3.5	Manuell test av sensor . . . . .	18
3.6	Plassering av flowmåler . . . . .	18
3.7	Tetningspropp. . . . .	19
3.8	Tilkoblingspunkt for fylling. . . . .	20
3.9	Måling av lekkasje . . . . .	21
3.10	Plassering av punktbelastning. . . . .	22
3.11	Metning i LECA . . . . .	23
3.12	Avstand fra underkant trebord til vannspeil . . . . .	24
3.13	Fritt vannspeil ved fylling . . . . .	24
3.14	IBC-container . . . . .	25
3.15	Bunntopografi . . . . .	26
3.16	Avstander i taket . . . . .	26
3.17	ECDF . . . . .	27
4.1	Sensorplassering . . . . .	31
4.2	Oppfylling- og tømmeforsøk nr. 1. . . . .	32
4.3	Oppfylling- og tømmeforsøk nr. 2. . . . .	32
4.4	Resesjonshendelse 1 . . . . .	33
4.5	Resesjonshendelse 2 . . . . .	34
4.6	Vannføring i resesjonshendelse 1. . . . .	35
4.7	Vannføring i resesjonshendelse 2. . . . .	35
4.8	Vannføring for begge resesjonshendelsene. . . . .	36
4.9	Vannivå mot vannføring for resesjonshendelse 1. . . . .	37
4.10	Vannivå mot vannføring for resesjonshendelse 2. . . . .	37

4.11	Vannføring, kalibrering 1. . . . .	38
4.12	Vannføring, kalibrering 2. . . . .	39
4.13	Magasinkapasitet, kalibrering 1. . . . .	40
4.14	Magasinkapasitet, kalibrering 2. . . . .	40
4.15	Estimert magasinkapasitet. . . . .	41
4.16	Vannføring, kalibrering 3. . . . .	42
4.17	Vannføring, kalibrering 4. . . . .	42
4.18	Magasinkapasitet, kalibrering 3. . . . .	43
4.19	Magasinkapasitet, kalibrering 4. . . . .	43
4.20	Validering mai, kalibrering 1. . . . .	44
4.21	Validering september, kalibrering 1. . . . .	44
4.22	Validering oktober, kalibrering 1. . . . .	45
4.23	Validering mai, kalibrering 2. . . . .	45
4.24	Validering september, kalibrering 2. . . . .	46
4.25	Validering oktober, kalibrering 2. . . . .	46
D.1	Nedbørhendelse mai . . . . .	63
D.2	Nedbørhendelse september . . . . .	64
D.3	Nedbørhendelse oktober . . . . .	64

# Tabeller

2.1	Resultater fra tidligere studier . . . . .	13
4.1	Kalibreringsresultater . . . . .	38
4.2	Validering mot nedbørshendelser . . . . .	47
A.1	Oversikt over parametre . . . . .	57
B.1	Generelt oppsett av datafil . . . . .	59
C.1	Oppsett av resultatfil . . . . .	61
E.1	Gjennomføring av forsøk nr. 1 . . . . .	65
E.2	Gjennomføring av forsøk nr. 2 . . . . .	66





# Forkortelser

DDD	Distance Distribution Dynamics
GIS	Geografisk informasjonssystem
KGE	Kling-Gupta Efficiency
NSE	Nash-Sutcliffe Efficiency
NVE	Norges vassdrags- og energidirektorat
SWMM	Storm Water Management Model



# 1. Introduksjon

Etablering av grønn infrastruktur har i lang tid vært fokusområde i Norge, og torvtak har lenge vært å se på hus og hytter. I dag er grønn infrastruktur en del av løsningen til de mer økende og tilstedeværende utfordringer med overvann. Grønne tak reduserer og utjevner flomtoppene betraktelig ved korte intensive nedbørshendelser sammenlignet med vanlig tekket tak, og sørger for en flatere og jevnere belastning på ledningsnettets nedstrøms (Lindholm, 2014).

Høsten 2017 startet Astri Sommer Øyre og Julie Trommald sitt prosjekteringsarbeid med forskningsinfrastrukturen Bia ved NMBU. Formålet med oppgaven var å etablere en arena som over en tidsperiode på minst fem år kunne danne grunnlag for å vurdere effekt av og videre forskning på grønne tak (Øyre og Trommald, 2018). I løpet av våren 2018 ble det etablert tre forskningstak ved NMBU: to grønne og et svart referansetak. I dialog med flere aktører ble det besluttet at de grønne takene skulle anlegges med et magasinerende sjikt med finknust LECA under seddumattene.

## 1.1 Formål og valg av problemstilling

I første del av oppgaven ønsker jeg å undersøke avrenningsforløpet (resesjonen) til et av de grønne takene ved å gjennomføre kontrollerte fylling- og tømmeforsøk. I oppgavens andre del skal resesjonskarakteristikken fra de gjennomførte forsøkene benyttes i *Distance Distribution Dynamics*-modellen (DDD) for kalibrering av et utvalg parametre. Modellen er utviklet og beskrevet av Thomas Skaugen og Christian Onof, og er fullt operativ i flomvarslingsenteret hos Norges vassdrags- og energidirektorat (Skaugen og Onof, 2014). Modellen brukes primært på større nedslagsfelt, men en videreutviklet modell, DDDUrban, er mer tilpasset urbane problemstillinger og blir derfor benyttet i denne oppgaven.

Følgende tema med tilhørende forskningsspørsmål vil bli besvart:

- Gjennomføring av fylling- og tømmeforsøk.
  - Hvordan ser det naturlige resesjonsforløpet ut ved full metning?

- Hva er sammenhengen mellom vannstand i taket og vannføring i utløpet?
- Kalibrere DDD-modellen mot de gjennomførte fylling- og tømme-forsøkene.
  - Hvordan kan modellen settes opp for å kalibreres mot et kontrollert tømme-forsøk uten naturlig nedbør?
  - Kan en DDD-modell som er kalibrert mot et kontrollert tømme-forsøk benyttes til å beskrive avrenningen fra naturlige nedbørshendelser?

## 1.2 Oppgaveoppbygging

Denne oppgaven følger en IMRAD-struktur med et eget bakgrunnskapittel der det gis en kort innføring i tidligere studier gjort ved de grønne takene, og DDD-modellens oppbygging. Resultater og diskusjonen presenteres i egne kapitler.

Forsøkene er gjennomført i samarbeid med Ingrid Kristine Ydse, som i løpet av våren 2021 skal levere sin masteroppgave ved fakultet for miljøvitenskap og naturforvaltning.

I denne oppgaven er det kun ett av de tre takene som blir vurdert. Videre i oppgaven blir forskningsobjektet referert til som *taket*.

### 1.2.1 Avgrensninger

Jeg har valgt å begrense oppgaven til gjennomføring av de planlagte forsøkene, og kalibrering av DDD-modellen. Andre hydrologiske effekter blir nevnt som en del av DDD-modellens funksjoner, men er ikke vurdert i sammenheng med gjennomføringen av forsøkene. Forsøkene ble gjennomført på høsten og innen en tidsperiode hvor evaporasjonen/fordampningen var å anse som neglisjerbar. Det antas at dette har liten eller ingen påvirkning av dataene.

## 2. Bakgrunn

### 2.1 Overvann

Overvann i sin utstrakte form oppstår enten ved nedbør i form av regn eller ved snøsmelting. Det som hverken infiltrerer eller fordamper, fører til avrenning på overflaten. Håndtering av overvann har tradisjonelt sett vært basert på prinsippet om å lede overvannet bort i lukkede systemer, men en moderne tilnærming til problemet har resultert i en håndtering hvor større deler av overvannet ses på som en ressurs og ikke et problem. Rett håndtering av overvann i urbane områder etablerer miljøer for rekreasjon og aktivitet (Lindholm, 2014).

#### 2.1.1 Overvannshåndtering

Mangelen på kunnskap knyttet til overvannshåndtering resulterer i et stort behov for forskning på dette feltet. I rapporten *Overvann i byer og tettsteder* NOU2015:16 (2015) svarer ca 40 prosent av utvalgets kommuner at overvannsutfordringer utgjør en stor kostnads- og velferdstrussel i kommunen, og 60 prosent svarer at eksisterende overvannssystemer ikke vil kunne håndtere nedbøren om 30 år. Mangler på overvannsnettet pekes ut som en av hovedårsakene. Undersøkelsene viser også til en sammenheng mellom kommunenes størrelse og sårbarhetsvurdering. Sårbarheten er størst hos de største kommunene der befolkningsvekst og fortetting er sterkest. Økt fortetting endrer overflatens struktur og øker den totale overflateavrenningen ved nedbør. Dette resulterer i økt mengde overvann (Fremtidens byer, 2016).

#### Avrenning

Mengden overvann som må håndteres styres av flere faktorer. Et klima i forandring har allerede og vil i fremtiden gi oss mer intense nedbørshendelser samt større mengder nedbør. Økt fortetting i byer endrer overflatens permeabilitet og evne til avrenning. Sammen med økt intensitet vil dette skape større mengder avrenning i form av overvann (Fremtidens byer, 2016). Den samfunnsøkonomiske betydningen av god håndtering av overvann er viktig i byer og tettsteder hvor konsentrasjonen av materielle verdier er

høy (NOU2015:16, 2015). Avrenning fra tak og gater (ikke-permeable overflater) har en høyere hastighet og større mengde avrenning sammenlignet med avrenning fra naturlig terreng, parker og andre permeable flater. Økt fortetting og totalnedbør, befolkningsvekst og mer intens nedbør fører til at eksisterende ledningsnett i enkelte tilfeller ikke har nok kapasitet til å samle opp, og avlede overvannet trygt til resipient eller renseanlegg (NOU2010:10, 2010). Mengden overvann omhandler den avrenningen som renner til elver eller bekker i et nedbørfelt, og maksimal avrenning i løpet av en nedbørshendelse kalles flomtopp.

Lokal håndtering av overvann (LOD-tiltak) har de siste årene fått et større fokus. I arbeid med overvann følger en ofte en tre-trinnsstrategi (Paus, 2020):

1. Fang opp og infiltrer alle regn
2. Forsink og fordrøy vann
3. Sikre trygge flomveier for regn

Målet med denne strategien er å definere ulike løsninger for håndtering av overvann med utgangspunkt i nedbørmengde og risiko for konsekvenser ved overskridende nedbør. Prinsippet bygger på at trinn 1 i de aller fleste tilfeller klarer å infiltrere og opprettholde den lokale vannbalansen, mens trinn 2 og 3 i så stor grad som mulig skal begrense skader forbundet med større nedbørshendelser.

## 2.2 Grønne tak

Tak som er helt eller delvis dekket med vegetasjon kalles grønne tak. Takene deles inn i tre hovedtyper; ekstensive, semi-intensive og intensive tak. Det finnes flere underkategorier, men veksttykkelsen er i stor grad styrende for hvilken hovedgruppe det er snakk om. Med dette som utgangspunkt bestemmes også forhold som vanning- og vedlikeholdsbehov, og muligheten for ferdsel (Noreng mfl., 2012).

Ekstensive tak domineres ofte av sedumarter fra bergknappfamilien (Bergknapp AS, 2020). Plantarten krever minimalt med vedlikehold, og takler næringsfattig jord og lengre tider med tørke godt. Vegetasjonsdekket overstiger sjeldent 3 - 4 cm, og anlegges ofte som ferdige vegetasjonsmatter. Noreng mfl. (2012) viser til at ekstensive tak bør anlegges med filtmatte for å øke tilbakeholdelsen av vann.

I motsetning til ekstensive tak, er intensive tak dimensjonert for menneskelig opphold og ferdsel. Hvilke type vegetasjon en ønsker på taket er i stor grad styrende for vekstlagstykkelsen, og er ofte 150-400 mm tykt (Noreng mfl., 2012). En mellomting av disse to takene refereres til som semi-intensive tak. Dette er et type tak med god vekstlagstykk-

kelse på 130-400 mm, og anlegges som regel på flate tak med muligheter for menneskelig opphold og ferdsel (Noreng mfl., 2012).

Etablering av grønne tak har som overordnet mål å redusere og fordrøye avrenning, og er en god løsning for både trinn 1 og 2 i tretrinnsstrategien. Ekstensive tak vil holde på en stor andel vann ved kortere intensive nedbørshendelser, og bidra til å redusere flomtopper (Lindholm, 2014). Ved å anlegge et magasinerende sjikt under sedummattene vil en kunne øke tilbakeholdelsen i taket betraktelig. For å forstå den fordrøyende effekten denne løsningen kan ha, er det hensiktsmessig med en begrepsavklaring (Colleuille og Gillebo, 2002):

- Feltkapasitet: Vanninnholdet etter at vanntransporten ut av materialet er tilnærmet lik null. Det vil si etter at tyngdekraften har drenert ut det den klarer.
- Porevolum: Tilgjengelig luft- og vannvolum i materialet.

## 2.3 DDD-modellen

For denne oppgaven er *DDDUrban*, en videreutviklet modell, benyttet. Dette er en versjon av DDD-modellen som i sin helhet er mer tilpasset urbane problemstillinger, der infiltrasjonskapasiteten for permeable (P), impermeable (IP) flater og våtmarker (Bog) beregnes hver for seg. For denne oppgaven benyttes modellen kun for permeable flater. I 2016 ble modellen videreutviklet ved å implementere en ny metode for beregning av magasinkapasitet. Metoden i modellen forutsetter nå at metning og avrenning følger den samme fordelingen til den observerte resesjonen for feltet. Dette ga gode resultater ved 73 ulike nedbørsfelt i Norge (Skaugen og Mengistu, 2016).

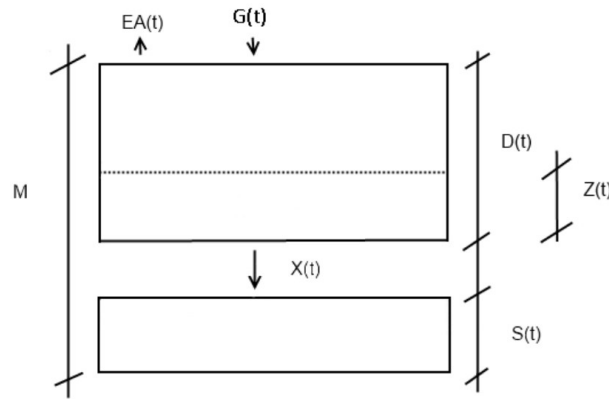
DDD-modellen er i hovedsak bygd opp av en hydrologisk modul og en modul som beskriver avrenningodynamikken. Modulene henger sammen ved at den hydrologiske modulen estimerer mengden avrenning som tilføres avrenningsmodulen. For naturlige nedbørsfelt defineres avrenningodynamikken gjennom to ulike avstandsfordelinger; fra felt til elvenettverk, og fra elvenettverk til utløp. I denne oppgaven er sluket definert til å være utløpet, og modellen opererer kun med en avstandsfordeling som ikke inkluderer elvenettverket.

I de neste underkapitlene gis det en innføring i DDD-modellens oppbygging, og hvordan den er benyttet i oppgaven. Modellen er avhengig av to input-filer; en datafil og en parameterfil. For denne oppgaven står tilpasningen av datafilen sentralt. Dette er en fil hvor observert nedbør og temperatur avgjør hvordan modellen responderer. Den observerte avrenningen benyttes til å validere modellert avrenning, og resultatet er en NSE- og KGE-verdi. Modellen er opprinnelig skrevet i programmeringsspråket R, men er

i senere tid konvert til Julia. Kjøring av modellen foregår i Jupyter Notebook.

### 2.3.1 Hydrologisk modul

Figur 2.1 illustrerer den hydrologiske modulen i modellen.



**Figur 2.1:** Illustrasjon av magasineringskapasitet i DDD-modellen (Skaugen og Mengistu, 2016).

$M$  er hele magasinkapasiteten til taket fordelt mellom mettet sone  $S(t)$  og umettet sone  $D(t)$ . Vanninnholdet i umettet sone  $D(t)$  er representert ved  $Z(t)$ . Magasinkapasiteten er konstant og resten er funksjoner av tid.

Feltkapasiteten  $R$  angir andelen porevolum tilgjengelig for lagring av vann i  $D(t)$  i taket. I modellen er feltkapasiteten satt til 30 %. Dette gir en god tilnærming for det grønne taket (Skaugen, 2020). Hvis  $Z(t)$  overstiger feltkapasiteten  $R$ , tilføres det vann til  $S(t)$  representert ved  $X(t)$ . Endringen av vanninnhold i umettet kan derfor defineres ved:

$$\frac{dZ}{dt} = G(t) - X(t) \quad (2.1)$$

Forandringen i mettet sone  $S(t)$  er differansen mellom tilført overskuddsvann fra umettet sone, og avrenning fra feltet:

$$\frac{dS}{dt} = X(t) - Q(t) \quad (2.2)$$

$Q(t)$  er avrenningen fra mettet sone  $S$ , og er grunnlaget for resesjonskarakteristikken til taket. Modellen har også en innebygd funksjon for å regne ut evaporasjon,  $E_a(t)$



og snøsmelting. Som nevnt innledningsvis er ikke de hydrologiske effektene relevant for oppgaven, og blir ikke kommentert ytterligere.

Oppsummert:

- $G(t)$  = input i form av nedbør avrenning og snøsmelting
- $S(t)$  = mettet sone / grunnvannssone
- $D(t)$  = umettet sone
- $Z(t)$  = faktisk vanninnhold i  $D(t)$
- $X(t)$  = videreført vann
- $M$  er totalkapasitet før overflateavrenning oppstår

### 2.3.2 Avrenningsmodul

Enhetshydrogrammet er definert som den tidsmessige fordelingen av vannføringen fra et definert nedbørsfelt, med en fast nedbørintensitet uniformt fordelt utover nedbørsfeltet (Chin, 2013). Varigheten (lengden) til enhetshydrogrammet avhenger av responstiden til feltet. Responstiden til taket er tiden det tar for en vanndråpe som faller ytterst i feltet å renne til utløpet. I DDD-modellen beskrives vannstrømningen gjennom taket ved hjelp av fem enhetshydrogrammer som jobber parallelt og distribuerer avrenningen i tid frem til sluket. Hvert metningslag i grunnen har sitt unike enhetshydrogram. Enhetshydrogrammet konstrueres basert på en avstandsfordeling for arealet i feltet samt en definert strømningshastighet per lag.

Avstandsfordelingen kan beskrives som en kumulativ fordeling av avstander fra punkter i taket frem til sluket. Skaugen og Mengistu (2016) har tidligere gjennomført en studie ved flere naturlige felt, og funnet ut at avstandsfordelingen samsvarer godt med eksponensialfordelingen gitt i ligning 2.3.  $\Lambda$  beskriver den konstante raten/helningen til eksponentialfunksjonen og  $d$  representerer avstanden:

$$U_f(d) = 1 - e^{-\Lambda(d-d_0)} \quad (2.3)$$

Ved å anta en konstant hastighet  $v_h$  vannet bruker i taket, så vil  $\Delta(d)$  være avstanden vannet har forflyttet seg i tidsperioden  $\Delta(t)$  (Skaugen og Onof, 2014). Avstandsfordelingen kan derfor tolkes som en fordeling av *reisetider* hvor responstiden er bestemt ved  $t_{f,maks} = d_{maks} / v(1)_f$ .

$$U_f(t) = 1 - e^{-\Lambda(t-t_0)} \quad (2.4)$$

Den deriverte til fordelingen  $U_f$  er enhetshydrogrammet til feltet gitt ved  $u_f$ . Med en gitt hastighet kan avstandsfordelingen omgjøres til en fordeling av reisetider:

$$u_f(t) = \Lambda e^{-\Lambda(t-t_0)} \quad (2.5)$$

I DDD-modellen antas det at hvert metningslag har hvert sitt enhetshydrogram basert på fordelingen av  $\Lambda$ . Ligningen for hvert enhetshydrogram er derfor:

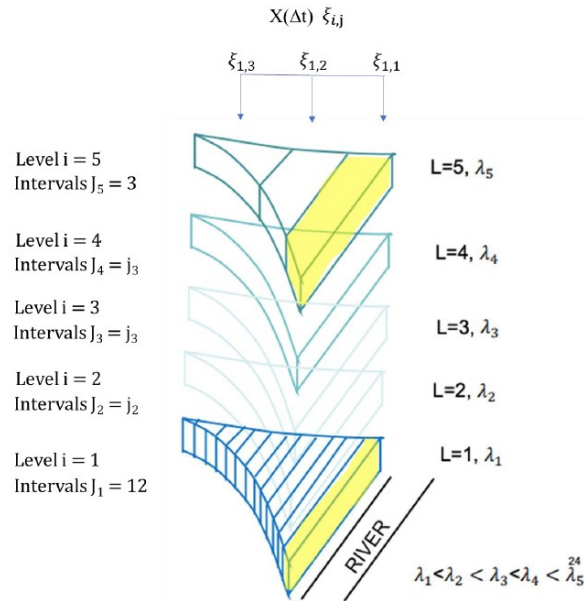
$$u_{f,i}(t) = \lambda_i e^{-\lambda_i(t-t_0)} \quad (2.6)$$

Ligning 2.6 definerer nå enhetshydrogramet til metningslag  $i$ , med sin spesifikke resejnsparameter  $\lambda_i$ . Modellen opererer med fem ulike metningslag; ett for overflateavrenning og fire for grunnvannsstrømming. Hastigheten vannet i metningslag  $i$  forflytter seg med er gitt i ligning 2.7, hvor  $\bar{d}$  er middelavstanden fra avstandsfordelingen og  $\Delta(t)$  er tidsopløsningen i modellen.

$$v(i)_f = \frac{\lambda_i \bar{d}}{\Delta t} \quad (2.7)$$

Varigheten til enhetshydrogrammet er nå bestemt ved ligningene 2.6 og 2.7 ved at  $t_{f,maks} = d_{maks} / v(i)_f$

Bidraget fra hvert enhetshydrogram i DDD-modellen illustreres best ved figur 2.2:



**Figur 2.2:** Illustrasjon av metningslagene med hvert sitt enhetshydrogram, definert av resesjonskarakteristikk  $\lambda_i$ .  $J_i$  er antall tidssteg (Stavang, 2019).

I figuren representerer det fargede området bidraget fra hvert metningslag til sluket i løpet av tiden  $\delta t$ . Størrelsen illustrerer at bidraget er størst for det øverste metningslaget, og minst for det nederste fordi avrenningen skjer raskere i de øverste lagene.

Figuren viser at:

- Metningslagene har lik form, og tidsstegene varierer for hvert metningslag ved at resesjonskarakteristikken endrer hastigheten for hvert lag.
- Hastigheten er lavest i nederste metningslaget, og høyest i det øverste.
- Metningslagene med lavest hastighet fylles opp først.

## Hastigheter

Hastighetene i de forskjellige metningslagene estimeres ved å anta at resesjonen til feltet følger en eksponential kurve med parameteren  $\Lambda$ . Resesjonskurven er gitt ved følgende ligning:

$$Q(t) = Q_0 \Lambda e^{-\Lambda(t-t_0)} \quad (2.8)$$

$Q_0$  er avrenningen ved resesjonsstart, og  $\Lambda$  beskriver helningen på resesjonskurven. Helningen,  $\Lambda(t)$ , bestemmes ved å se på den logaritmiske differansen i vannføring ved tids-

punkt  $t$  i løpet av resesjonshendelsen, under den forutsetning om at vannføringen ved tidspunkt 1 er større enn ved neste tidssteg:

$$\Lambda(t) = \log(Q(t)) - \log(Q(t + \Delta t)), Q(t) > Q(t + \Delta t) \quad (2.9)$$

Ved å samle alle verdier av  $\Lambda$  i løpet av en resesjonshendelse, viser studier gjort av Skaugen og Mengistu (2016) at dette kan tilpasses en to-parametrisert empirisk gammafordeling styrt av parametrene shape ( $\alpha$ ) og scale ( $\beta$ ). Fordelingen er gitt i ligning 2.10:

$$f(\Lambda) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \Lambda^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{\Lambda}{\beta}\right) \quad (2.10)$$

$\Lambda$ -verdier kan estimeres ved to ulike metoder:

1. Resesjonsanalyse: Beregne  $\Lambda$  fra observerte vannføringer ved bruk av ligning 2.9.
2. Kalibrering: Estimere  $\Lambda$ -verdier fra et forhåndsdefinert utvalg av verdier for parametrene Gsh (shape) og Gsc (scale) gjennom kalibreringer av modellen. Optimal parametertilpasningen oppnås ved å sammenligne NSE og KGE for de ulike parameterkombinasjonene.

Forventet gjennomsnittsverdi er  $E(\Lambda) = \alpha\beta$  og variansen er gitt ved  $\text{Var}(\Lambda) = \alpha\beta^2$ . Den forventede gjennomsnittsverdien,  $E(\Lambda)$ , benyttes til å beregne snitthastigheten til vannet, der  $\bar{d}$  representerer middelavstanden fra avstandsfordelingen:

$$\bar{v} = \frac{E(\Lambda)\bar{d}}{\Delta t} \quad (2.11)$$

## Magasinkapasitet

Magasinkapasiteten til taket beregnes i DDD-modellen ved å anta at fordelingen av grunnvannsinhold  $S$  følger den samme gammafordelingen til  $\Lambda$ . Parameteren scale er gitt ved  $\eta = \beta/c$ , der  $c = \bar{\Lambda}/m_s$ , og fordelingen deler den samme shape-parameteren  $\alpha$ . Middelveien  $\bar{\Lambda}$  er resesjonskarakteristikken til taket ved gjennomsnittlig metningsinnhold. Med et estimat på den årlige gjennomsnittlige avrenning fra taket er det mulig å estimere den gjennomsnittlige metningen for taket, representert ved  $m_s$  (Skaugen mfl.,

2020).

### 2.3.3 NSE og KGE

Ved bruk av hydrologiske modeller er målet alltid å se om den modellerte avrenningen stemmer med den observerte, og modellen må derfor kalibreres i form av en parametertilpassning. Hvor godt den modellerte avrenningen samsvarer med den observerte måles i form av en fitness-verdi, som beskriver avviket mellom målt og observert verdi. DDD-modellen beregner dette ved to ulike metoder: *Nash-Sutcliffe Efficiency* (Nash og Sutcliffe, 1970) og *Kling-Gupta Efficiency* (Gupta mfl., 2009).

NSE-verdien varierer fra  $-\infty$  til 1, hvor sistnevnte indikerer perfekt samsvare mellom modellert/simulert av observert avrenning. NSE-verdien er gitt ved følgende ligning:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{t=T} (Q_{sim,t} - Q_{obs,t})^2}{\sum_{t=1}^{t=T} (Q_{obs,t} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (2.12)$$

der

$Q_{sim,t}$ : Simulert/modellert avrenning ved tiden  $t$

$Q_{obs,t}$ : Observert avrenning ved tiden  $t$

$\bar{Q}_{obs,t}$ : Observert gjennomsnittlig avrenning ved tiden  $t$

En av ulempene ved å benytte NSE for estimering av fitness-verdi, er at den gjennomsnittlige observerte avrenningen,  $\bar{Q}_{obs,t}$ , er kvadrert og benyttes som referanse. Dette kan gi overestimerte verdier ved sesongvariasjoner og ekstreme nedbørshendelser (Ritter og Muñoz-Carpena, 2013; Gupta mfl., 2009).

De senere årene har Kling-Gupta Efficiency blitt mer benyttet for å beskrive en modells treffsikkerhet og fitness-verdi. Ligningen for KGE er gitt under, og baseres på en nedkomponering av NSE (Knoben mfl., 2019):

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2} \quad (2.13)$$

Her beskriver  $r$  korrelasjonen mellom simulert og observert avrenning. Verdiene  $\sigma_{sim}$  og  $\sigma_{obs}$  er standardavviket for simulert og observert avrenning, og  $\mu_{sim}$  og  $\mu_{obs}$  er gjennomsnittet av simulert og observert avrenning. På lik linje med NSE er 1 den høyeste verdiene en kan oppnå.

I etterkant av en kalibrering er det viktig å validere modellparameterne mot flere hendelser, slik at sammenhengen mellom input og output blir vurdert. Hvilke verdier som indikerer en god modellytelse er diskutert, og avhenger av tidsoppløsning og modellprogram (Knoben mfl., 2019; Moriasi mfl., 2007). Ved en tidsoppløsning på en måned, foreslår Moriasi mfl. (2007) følgende kategorisering av NSE-verdier:

- Tilfredsstillende: 0.5 - 0.65
- Akseptabel/god: 0.65 - 0.75
- Veldig god: 0.75 - 1.00

## 2.4 Tidligere forskning

For å forstå denne oppgavens motivasjon og vinkling, er det nødvendig med en kort gjennomgang av tidligere studier gjort ved de aktuelle takene ved NMBU.

### Eablering av takene

Høsten 2017 startet Astri Sommer Øyre og Julie Trommald sitt arbeid med forskningsinfrastrukturen Bia ved NMBU. Formålet med oppgaven var å etablere en arena som over en tidsperiode på minst fem år kunne danne grunnlag for effekten og videre forskning på grønne tak (Øyre og Trommald, 2018). I løpet av våren 2018 ble det bygd totalt tre forskningstak ved NMBU, to grønne og et svart referansetak. I samtaler og møter med flere aktører ble det besluttet at to av de grønne takene skulle anlegges med et magasinerende sjikt bestående av fordrøyende materialer under seddumattene. Finknust LECA ble valgt som materiale til det fordrøyende sjiktet, med en oppgitt feltkapasitet på 50%.

### Effekten av takene

Høsten 2018 undersøkte Jogeir Stenhaug Ueland (2018) effekten av de grønne takene i perioden etter etablering. Funnene viser til en redusert maksavrenning på 41% og god utjevning av flomtoppene ved kraftige nedbørshendelser. Takene fungerer godt i sommermånedene ved korte og intensive nedbørshendelser, men effekten reduseres utover høsten med kaldere temperaturer og lengre nedbørshendelser med lavere intensitet.

Eivind Fordal (2018) har i sin oppgave undersøkt de hydrologiske effektene ved å modellere avrenningen i EPA's Storm Water Management Model (SWMM). Oppgaven viser at tilbakeholdelsen på takene er god, men at SWMM-modellen er for enkel til å predikere avrenningen tilfredsstillende. Dette skyldtes inngangsdata og parametre som vanskelig lot seg bestemme på grunnlag av takets utførelse.

### Avrenningsmodellering av takene

Ane Wiker-Walsøe og Jon Sivert Valle kalibrerte DDD-modellen for de to grønne takene i sin masteroppgave våren 2020 (Viker-Walsøe og Valle, 2020). De ønsket å undersøke hvordan modellen estimerte de hydrologiske effektene ved taket, og hvordan modellen simulerte avrenning sammenlignet med observert avrenning. Ved å kalibrere modellen mot to ulike avstandsfordelinger og to ulike nedbørshendelser ble modellen validert mot fire naturlige nedbørshendelser. Resultatene for en av avstandsfordelingene er gjengitt i tabell 2.1:

**Tabell 2.1:** Resultater fra tidligere studier (Viker-Walsøe og Valle, 2020)

Kalibrering	Hendelse	NSE	KGE
September	Mai	0.62	0.80
	Juni	0.47	0.48
	Oktober	0.73	0.75
Juni	Mai	0.69	0.83
	September	0.52	0.49
	Oktober	0.58	0.63

Resultatene fra studien viser at DDD-modellen klarer å predikere avrenningen fra taket med tilfredsstillende NSE- og KGE-verdier. Funnene i deres oppgave baner vei for min oppgave og videre forskning





## 3. Metode

I dette kapitlet gis det en kort beskrivelse av taket og den praktiske gjennomføringen av forsøkene. Til slutt blir tilpasningen av DDD-modellen presentert.

### 3.1 Takets utforming og instrumentering

Forarbeidet og prosjekteringsprosessen ble som nevnt innledningsvis startet høsten 2017, og hele forskningsinfrastrukturen stod ferdig våren 2018. Figur 3.1 viser alle de tre takene, hvor takene er nummeret 1 til 3 fra venstre. Involverte samarbeidspartnere er LECA Norge, Bergknapp, NVE og Protan, hvor fakultet for *landskap og samfunn* står som eier og fakultet for *realfag og teknologi* har bruksrettigheter (Øyre og Trommald, 2018).



**Figur 3.1:** Oversiktsbilde av Bia tatt mot vest. Oppgaven tar kun for seg taket lengst til høyre i bildet (tak 3). Foto: S. Nyborg (Øyre og Trommald, 2018).

Begge de grønne takene har lik oppbygging, og er prosjektert med 40 mm sedum over et 150 mm tykt lag med finknust LECA adskilt av to filtduker, se figur 3.2. Mengden

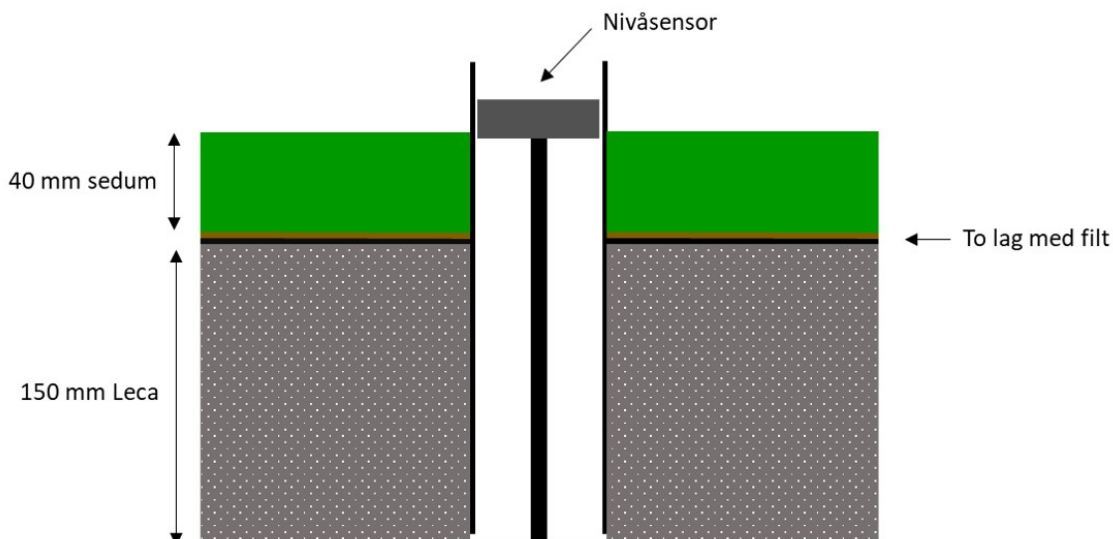
LECA tilført taket er  $7.96 \text{ m}^3$ , og er av typen lettklinker knust til graderingsstørrelse 0 - 6 mm. Den effektive porøsiteten er satt til 50 % (Øyre og Trommald, 2018).



**Figur 3.2:** Skissert taktverrsnitt. Inspirert av Viker-Walsøe og Valle (2020).

Forskningsinfrastrukturen er utstyrt med tekniske installasjoner som gjør det mulig å måle avrenning, nedbør, kort- og langbølget stråling (radiometre), vekt, temperatur og fuktighet i og på takene. I denne oppgaven ble ikke disse benyttet ved datainnhenting, og de tekniske detaljene relatert er godt beskrevet i tidligere studier (Øyre og Trommald, 2018; Viker-Walsøe og Valle, 2020).

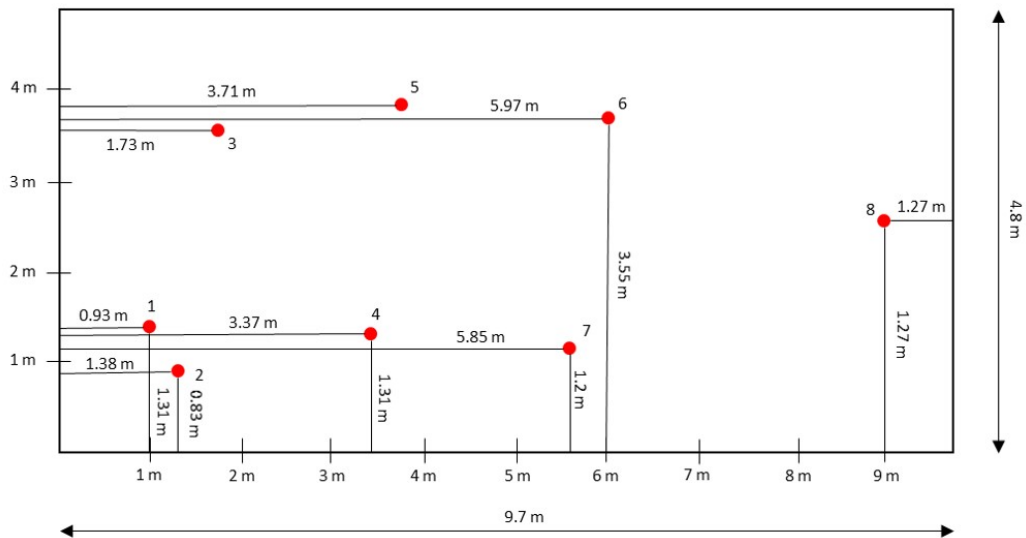
I løpet av september 2020 ble taket ytterligere utstyrt med en ny og mer presis vannføringsmåler basert på ultralyd, samt åtte nivåsensorer i regi av NVE v/ Knut Møen. Sensorene er gjennomgående i tverrsnittet, se figur 3.3.



**Figur 3.3:** Nivåsensor i taksverrsnittet. Illustrert av: Peter Andreas Bassøe.

Formålet med nivåsensorene var å hente ut måledata fra kontinuerlige registreringer av

vannivået i taket. På denne måten kunne transporten og fordelingen av vann i taket måles ved de planlagt forsøkene, og ved naturlige nedbørshendelser. Figur 4.1 viser sensorenes plassering. Målene er fra innsiden av taket.



**Figur 3.4:** Målsatt sensorplassering med innvendig takmål. Uten målestokk. Illustrert av: Peter Andreas Bassøe.

I forkant av de planlagte fylling- og tømmeforsøkene ble utstyret kontrolltestet. Dette ble gjort for å kontrollere om loggførte data stemte overens med virkeligheten, og i hvilket format vi kunne forvente å få dataene i. Nivåsensorene ble satt i en bøtte med vann og vanddybden ble målt manuelt, se figur 3.5. For å bekrefte vanddybden hadde vi løpende dialog med Knut Møen som leste av målingene i sanntid.



**Figur 3.5:** Manuell test av nivåsensor. Foto: Peter Andreas Bassøe.

Vannføringsmåleren er montert mellom takets utløp og IBC-containeren, se figur 3.6.



**Figur 3.6:** Plassering av flowmåler. Foto: Peter Andreas Bassøe.

### Excel - måledatabehandling

Både nivåsensorene og flowmåleren ble satt til å loggføre data med minuttsoppløsning i forsøksperioden. Tilsendte data fra NVE krevde noe bearbeidelse i etterkant av forsøkene, og Microsoft Excel ble benyttet som verktøy for analyse og presentasjon av dataene. Dataene fra vannføringsmåleren krevde noe bearbeidelse.

## 3.2 Gjennomføring av fyller-/tømmeforsøk

Samtlige forsøk ble gjennomført i samarbeid med Ingrid K. Ydse. Det ble ført forsøkslogg etter hvert forsøk som ble gjennomgått av begge. På den måten kunne vi ettergå notatene og sette lys på eventuelle avvik. Gjennomføringen av forsøkene presenteres samlet som en del av metodekapitlet. Resultater og relevante observasjoner for hvert forsøk blir presentert individuelt i kapittel 4. Forsøk nr. 1 ble gjennomført i perioden 29.09 - 01.10, og forsøk nr. 2 ble gjennomført 01.10 - 03.10.

For å kunne undersøke det grønne takets resesjonsforløp ved tømming fra mettet tilstand ble det tidlig i prosessen bestemt å gjennomføre kontrollerte fylling- og tømmeforsøk. Ønsket var å måle begge samtidig for å studere sammenhengen mellom nivå og vannføring ut av taket. Vi fant det lite sannsynlig og veldig usikkert at flere naturlige nedbørshendelser ville fylle taket tilstrekkelig i løpet av høsten. Det ble totalt gjennomført tre forsøk i perioden 29.09 til 09.11. To resesjonsforsøk, og et forsøk med stasjonære forhold hvor vi fulgte samme prosedyre som ved resesjonsforsøkene, men med kontinuerlig vanning etter resesjonsstart. Det sistnevnte forsøket blir ikke presentert som en del av resultatene og heller ikke diskutert, da resultatene primært er mer relevant for Ingrid sin oppgave.

### Tetting av sluk

Under fylling ble sluket tett med en propp av typen *UPONOR PROPP 75 mm m/pakning*, se figur 3.7.



**Figur 3.7:** Tetningspropp.

Under forsøkene ble det lagt en tyngre stein over proppen for å sikre at pakningen tettet ordentlig. Vannføringsmåleren viste tilnærmet null vannføring under fylling av taket. Dette ble også bekreftet ved oversendte data.

### Fylling av taket

Det ble vurdert flere alternativer for fylling av taket. Etersom fyllingsprosessen ikke påvirker den faktiske resesjonshendelsen, var ikke tidshorizonten eller vannføringen inn på taket av betydning. Vi besluttet derfor å punktbelaste taket med det lokale vanningsanlegget ved Planteskolen. Vannet pumpes opp fra Årungen og fordeles til flere kranpåkoblinger, se figur 3.8.



**Figur 3.8:** Tilkoblingspunkt for fylling. Foto: Peter Andreas Bassøe.

Det ble brukt en standard hageslange med dimensjon 3/4 "uten hurtigkobling i enden. Vannføringen ble målt ved gjentatte bømte-målinger.

Etterhvert som vannivået i taket økte ble det oppdaget en betydelig lekkasje i taket. Lekkasjen ble målt ved ulike tidspunkt og med ulike tidsintervall for å dokumentere eventuelle endringer. Figur 3.9 viser metoden.



**Figur 3.9:** Måling av lekkasje. Foto: Peter Andreas Bassøe.

Denne type måling kan ha påvirket resultatet, da det avhenger av at alle dråpene treffer bøtta. Dette var derimot det utstyret som var tilgjengelig. Ved fritt vannspeil ble lekkasjen ut av taket målt til å være 0.0083 l/s for forsøk 1 og 0.0079 l/s for forsøk 2. Etter endt overflateavrenning ble lekkasjen målt til 0.00037 l/s for forsøk 1 og 0.00025 l/s for forsøk 2. Hendelser og observasjoner ved gjennomføringen av forsøkene er presentert i vedlegg [E](#).

### Punktbelastning av taket - valg av plassering

Vannslangen ble plassert i det nordlige hjørnet av taket, se figur 3.10. Dette er takets høyeste punkt relativt til bunnen, og ble valgt for at vannet skulle få en naturlig strømningsvei mot sluket. På den måten kunne vi enklere observere hvor lang tid det tok før vannet hadde blitt transport ned til slukboksen, og når fyllingen var gjennomgående i taket.



**Figur 3.10:** Plassering av punktbelastning. Foto: Peter Andreas Bassøe.



**Kontroll av vannivå og tømning av taket**

Metningen/vannstanden i LECA-sjiktet ble visuelt bekreftet ved å løfte på sedummatene i hvert hjørne på taket under fylling, se figur 3.11.



**Figur 3.11:** Metning i LECA. Foto: Peter Andreas Bassøe.

For å forsikre oss om at vannet var likt fordelt og at vannspeilet lå horisontalt, ble avstanden fra underkant trebord til vannspeil målt, se figur 3.12.



**Figur 3.12:** Avstand fra underkant trebord til vannspeil. Foto: Peter Andreas Bassøe.

Da det ble observert fritt vannspeil på store deler av taket ble fyllingen avsluttet, se figur 3.13.



**Figur 3.13:** Fritt vannspeil ved fylling. Foto: Peter Andreas Bassøe.

Ved lik vannstand i samtlige hjørner ble proppen tatt ut, og tømningen kunne starte. Krana på IBC-containeren stod åpen under store deler av tømningen av taket for å forhindre oppstuvning, se figur 3.14. Taket tømmes for overflateavrenning i løpet av 24 minutter for begge forsøkene. Det er en nær sammenheng mellom vannhøyde over sluket og vannføringen ut av taket.



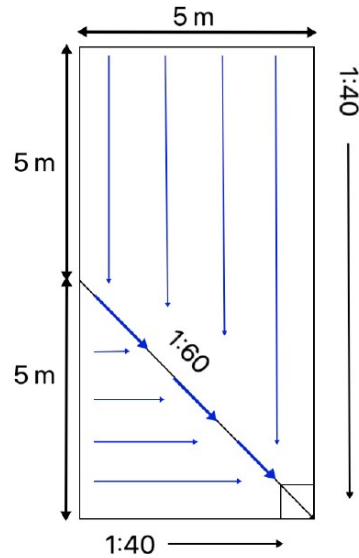
Figur 3.14: IBC-container. Foto: Peter Andreas Bassøe.

### 3.2.1 Inngangsfiler og tilpassing av DDD-modellen

DDD-modellen er avhengig av inngangsdata i form av en parameterfil og en datafil. Parameterfilen med beskrivelse av de ulike parameterne er vist i vedlegg A.

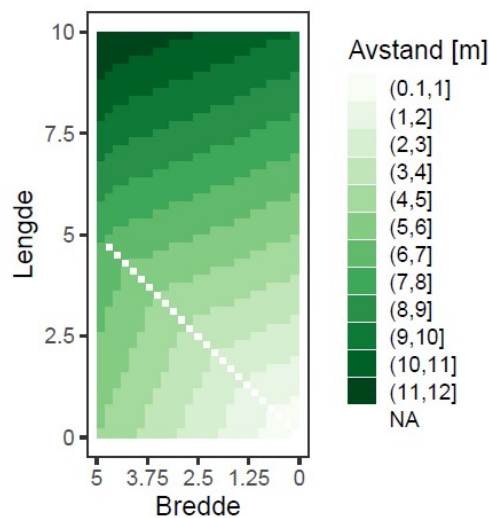
#### Parameterfil og avstandsfordeling

En av verdiene som må defineres er middel- og maksavstanden en vandråpe bruker gjennom taket. For større naturlige nedbørsfelt hentes avstandene fra geografiske informasjonssystemer, men for det grønne taket må dette beregnes manuelt. Etter samtaler med hoved- og biveileder ble det besluttet å benytte en av avstandsfordelingene Viker-Walsøe og Valle (2020) beregnet i sin oppgave våren 2020. De kalibrerte to ulike avstandsfordelinger basert på hvordan et naturlig felt dreneres, og takets bunntopografi. Konklusjonen var at avstandsfordelingen basert på takets bunntopografi (avstandsfordeling 2) ga best resultater. Denne avstandsfordelingen forutsetter at vannet følger takets lengderetning til det treffer den diagonale helningen i taket, og transporteres videre til sluket. Antakelsene i beregningene er vist i figurene under.



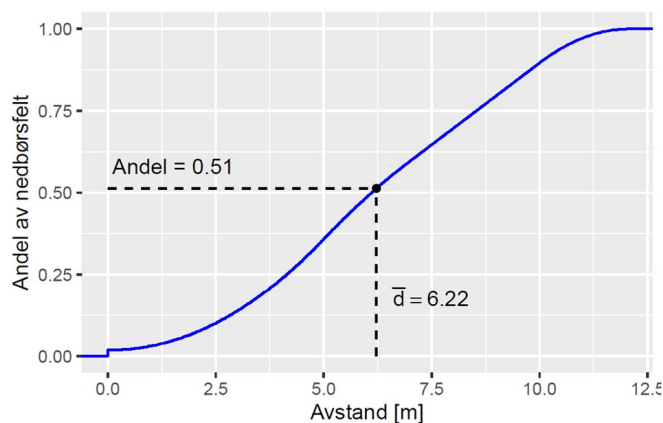
**Figur 3.15:** Bunntopografi (Viker-Walsøe og Valle, 2020).

For å beregne avstanden fra hvert enkelt punkt i taket frem til sluket, ble det konstruert en matrise med 25\*50 kvadratiske ruter. Matrisen er tenkt til å være en etterligning av taket, der fargekodene viser avstandsintervallet rutene har til sluket:



**Figur 3.16:** Avstander i taket (Viker-Walsøe og Valle, 2020).

Avstandsfordelingen er en kumulativ fordeling som beskriver hvor stor andel av taket som er representert ved en reisetid mindre eller lik middelværdien til sluket. For denne avstandsfordelingen er 51 % av arealtet til taket representert, se figur 3.17:



**Figur 3.17:** ECDF (Viker-Walsøe og Valle, 2020).

Øvrige parametere i parameterfilen er beskrevet i vedlegg A.

### Datafil

Sentralt for denne oppgaven står datafilen som beskriver nedbør, temperatur og observert avrenning. For større nedbørsfelt og i den tiltenkte bruken av DDD-modellen, er dette observert data fra måleinstrumenter i og rundt et nedbørsfelt. I tømme-forsøket i denne oppgaven var taket mettet ved starten av forsøket og det ble ikke tilført vann/nedbør underveis i tømningen. Ettersom det ikke er mulig å eksplisitt spesifisere feltets metningstilstand ved simuleringstart i DDD-modellen, ble utfordringen i denne oppgaven å legge inn et nedbørforløp som kunne gi en riktig starttilstand for tømme-fasen av simuleringen. To ulike nedbørscenariorer ble vurdert:

1. Stasjonær nedbør: Hendelse som skal samsvare med den praktiske fyllingen. Her ble nedbøren satt til 0.036 mm/min for å illustrere stasjonær nedbør, med en varighet på 24 timer. Bakgrunnen for dette skyldes flere prøvesimuleringer hvor valgt tidsintervall sørget for fullstendig metning med minimal overflateavrenning i DDD-modellen.
2. Ekstrem nedbør: Fiktiv ekstremhendelse med nedbør satt til 60 mm/min med varighet på et minutt. I dette tilfellet skulle nedbøren være så stor at magasin-kapasiteten ble oversteget i første tidssteg, og at resesjonen kunne starte i neste tidssteg.

Vedlegg B viser et generelt oppsett av datafilen, hvor de fem første kolonnene beskriver dato og tid for hvert tidssteg. De ti neste kolonnene beskriver nedbøren for ti ulike høydesoner, og tilsvarende for temperatur. For mindre nedbørsfelt antas det en mindre romlig variasjon, og verdiene settes til det samme. Observert avrenning legges inn i den siste kolonnen. Temperaturen ble satt til 2 C for å neglisjere fordampning fra taket.

For begge scenarioene ble resesjonshendelsene fra forsøk 1 og 2 lagt inn i datafilen som observert avrenning i tidssteget etter endt nedbør. Totalt ble det gjennomført fire kalibreringer hvor notasjonene er som følger:

- Kalibrering 1/Stasjonær R1: Stasjonær nedbør med resesjonshendelse fra forsøk nr.1
- Kalibrering 2/Stasjonær R2: Stasjonær nedbør med resesjonshendelse fra forsøk nr.2
- Kalibrering 3/Ekstrem R1: Ekstrem nedbør med resesjonshendelse fra forsøk nr.1
- Kalibrering 4/Ekstrem R2: Ekstrem nedbør med resesjonshendelse fra forsøk nr.2

### 3.2.2 Kalibreringsrutine

I DDD-modellen foregår kalibreringsprosessen ved å finne den parameterkombinasjonen som gir størst KGE-verdi av et utvalg parametere med et definert intervall, gjennom et gitt antall simuleringer. For denne oppgaven var det kun interessant å kalibrere parametrene  $G_{sh}$  (shape) og  $G_{sc}$  (scale) til den gammafordelte  $\Lambda$ . Modellen ble kjørt med 200 simuleringer pr. kalibrering. Resultatene vises i form av kalibrerte verdier for  $G_{sh}$  og tilhørende NSE- og KGE-verdier.

Øvre og nedre grense for intervallet til parametrene ble valgt ut i fra best oppnådde NSE- og KGE-verdier fra tidligere studier på taket. Ettersom det kun er utført ett lignende forsøk tidligere, ble intervallet satt ut i fra beste oppnådde resultater fra oppgaven til Viker-Walsøe og Valle (2020):

- $G_{sh}$ : [0.7360, 1.1614]
- $G_{sc}$ : [0.000160, 0.000255]

I tidligere oppgaver relatert til DDD-modellen (Stavang, 2019) og (Viker-Walsøe og Valle, 2020) har kalibreringene i modellen startet i første tidssteg fra datafilen. Denne tilnærmingen er ikke mulig å gjøre ved kalibrering mot en resesjonshendelse, da fyllingen før resesjonen blir med i kalibreringsrutinen. På grunn av dette måtte initialbetingelsene i modellen endres, og modellen brukte kun hendelsene fra et forhåndsdefinert starttidspunkt til å gjøre kalibreringer. Det er denne tidsperioden som blir brukt for å beregne og optimalisere KGE og NSE i kalibreringsrutinen. Tidspunktet ble satt til tidssteget etter endt nedbør, og hvor den observerte resesjonshendelsen fra den praktiske gjennomføringen startet.

### 3.2.3 Validering

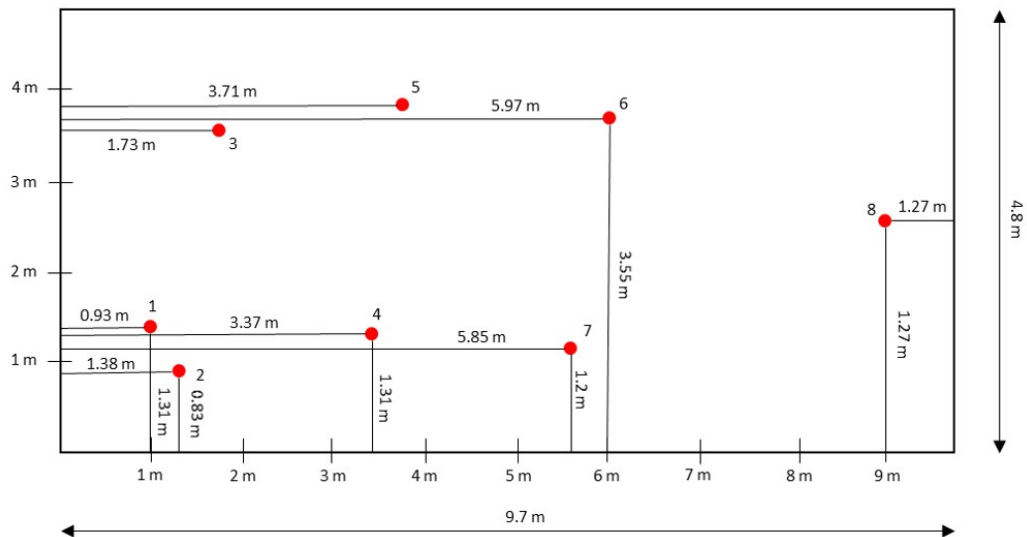
For å undersøke hvor godt DDD-modellen estimerer avrenning og magasinkapasitet med de kalibrerte parameterne  $G_{sc}$  og  $G_{sh}$ , er det valgt ut tre nedbørshendelser fra målestasjonen ved NMBU for validering. Valgte nedbørshendelser er de samme som Viker-Walsøe og Valle (2020) benyttet i sin valideringsprosess. Nedbørhendelsene er valgt for å sammenligne i hvilken grad en kalibrering mot et resesjonsforløp fra et kontrollert tømmeforsøk, gir modellparametre som kan beskrive avrenningen fra en naturlig nedbørshendelse. Valideringshendelsene er presentert i vedlegg D, og blir videre omtalt som nedbørshendelse mai, september og oktober.





## 4. Resultater

I dette kapitlet presenteres resultatene fra de gjennomførte fylling- og tømmeforsøkene, samt kalibrering og valideringen av DDD-modellen. Resultatene presenteres i form av grafer og tabeller. Nivåsensorenes plassering blir på nytt presentert innledningsvis i dette kapitlet.



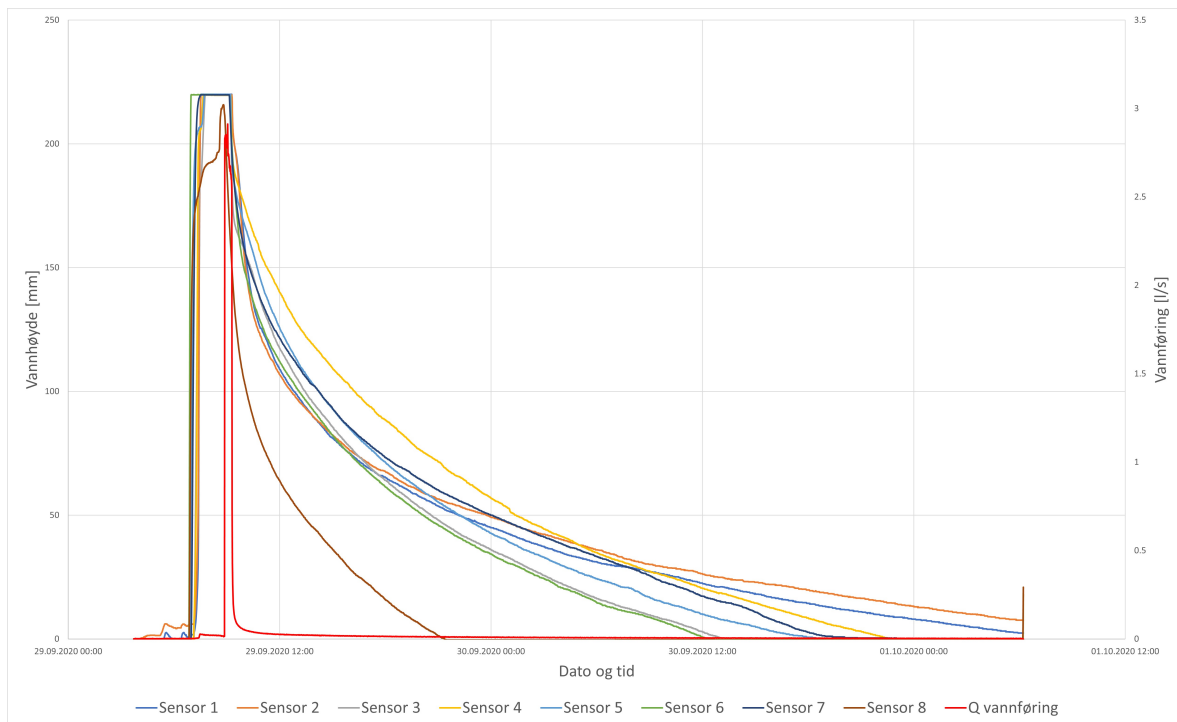
**Figur 4.1:** Målsatt sensorplassering med innvendig takmål. Uten målestokk. Illustrert av: Peter Andreas Bassøe.

### 4.1 Oppfylling og tømming av taket

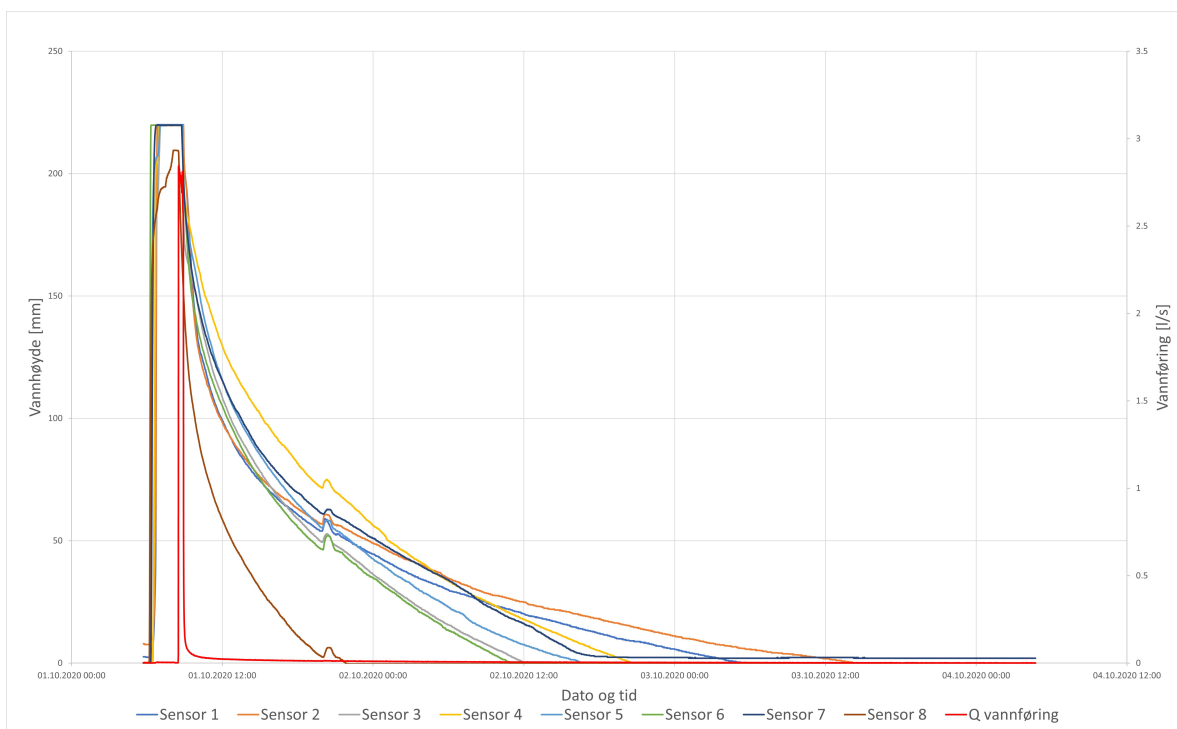
Resultatene fra de to gjennomførte oppfylling- og tømmeforsøkene presenteres i dette kapitlet. Hendelser og observasjoner underveis i forsøkene er oppsummert i vedlegg [E](#).

#### 4.1.1 Vannivå i taket

Forandringen i vannivå i taket ved gjennomføring av forsøkene vises i sin helhet i figur [4.2](#) og [4.3](#)

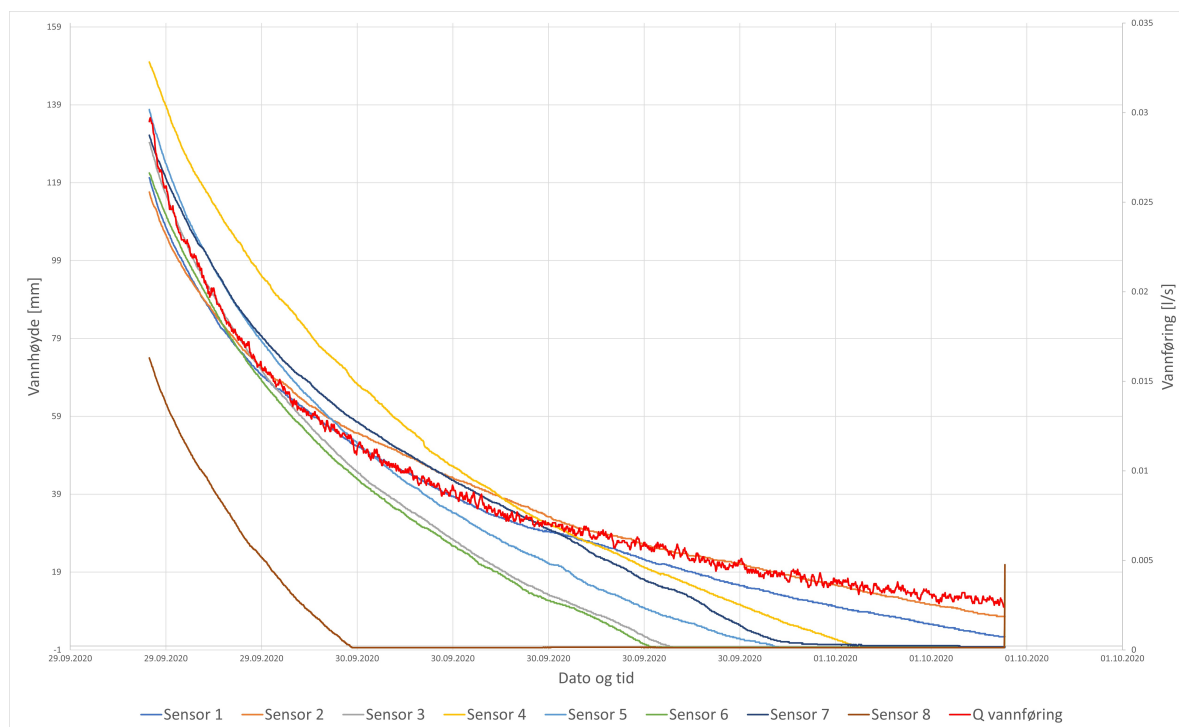


Figur 4.2: Oppfylling- og tømmeforsøk nr. 1.



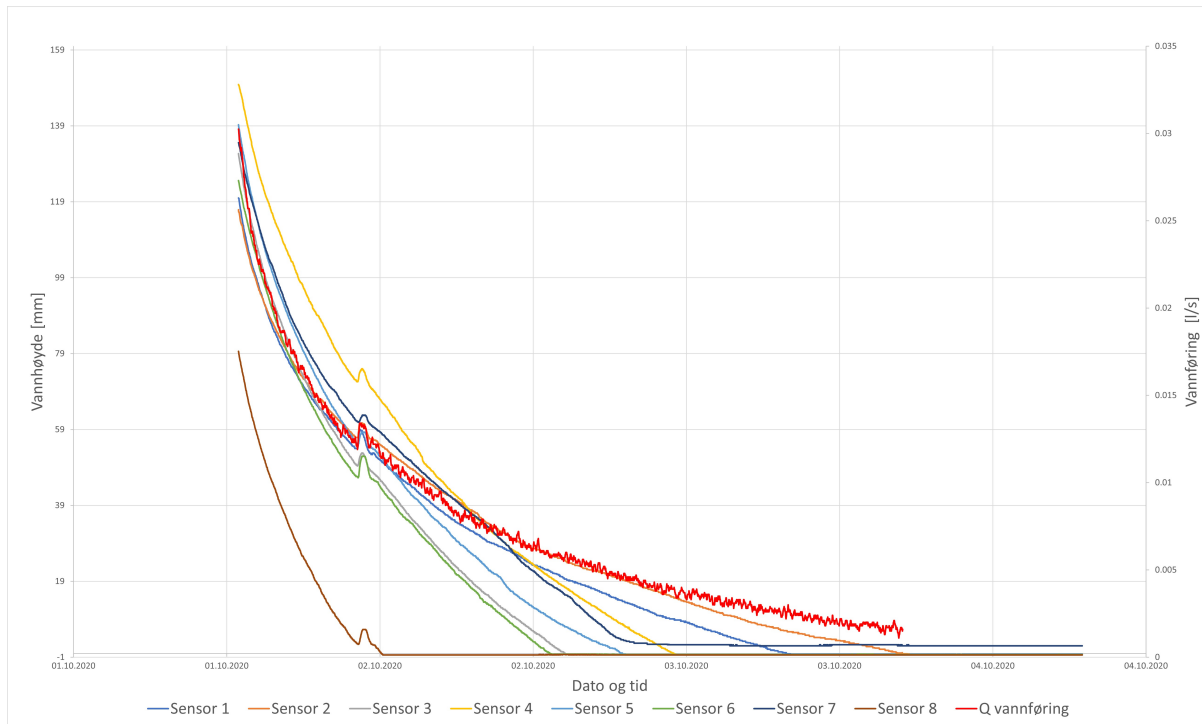
Figur 4.3: Oppfylling- og tømmeforsøk nr. 2.

Etter som det kun er interessant med resesjonen i det magasinerende sjiktet bestående av LECA, er figur 4.4 og 4.5 skalert ned til å vise hendelsesforløpet fra det tidspunktet alle nivåsensorene har et nivå på  $h \leq 150$  mm, som er tykkelsen til LECA-laget:



**Figur 4.4:** Vannhøyde under resesjonshendelse 1.

Sensor 1 og 2 i figur 4.4 indikerer at taket fortsatt var under resesjon i det forsøk nr. 2 ble startet. Dette skyldes en feilestimering på hvor lenge resesjonen faktisk ville foregå, og at data fra nivåsensorene ikke ble mottatt før forsøkene ble avsluttet. Sensor 8 får en økning på slutten av resesjonshendelsen, og det er da forsøk nr. 2 ble satt i gang.

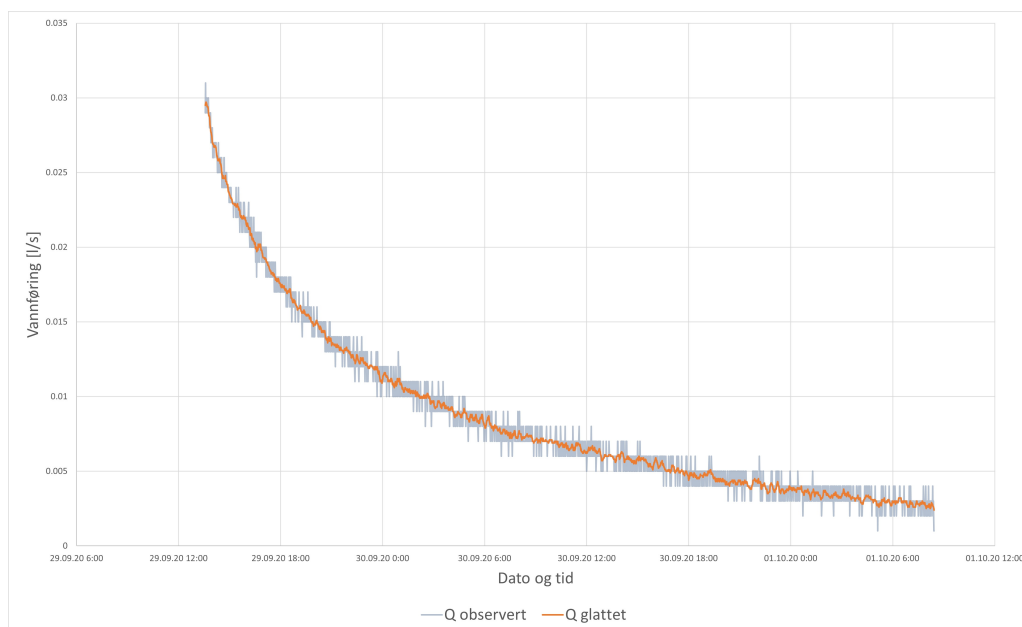


**Figur 4.5:** Vannhøyde under resesjonshendelse 2.

Det ble registrert en mindre nedbørshendelse under gjennomføringen av forsøk nr. 2, se figur 4.5. Dette ga utslag på samtlige nivåsensorer. Nedbørshendelsen er stor nok til å øke nivået i taket for en periode. Resesjonen ble ansett som ferdig da samtlige nivåsensorer stod i null. Sensor 7 går aldri helt i null, men holder seg stabilt på et nivå. Dette kan skyldes en teknisk feil på nivåsensoren, eventuelt en forsenkning eller grop i taket.

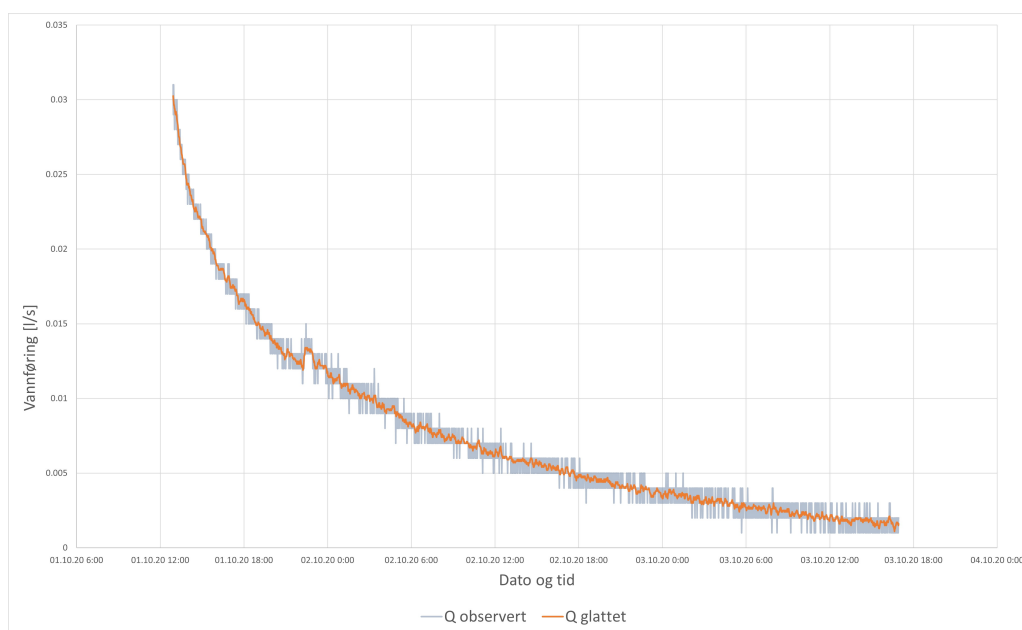
### 4.1.2 Vannføring ut av taket

Data fra vannføringsmåleren inneholdt en del støy, og dataene ble derfor glattet ut ved å beregne middelveidien i et tidsvindu på ti minutter, der middelveidien er sentrert i tidsvinduet. Figur 4.6 og 4.7 viser hvordan denne tilnærmingen passer til observert vannføring i utløpet:



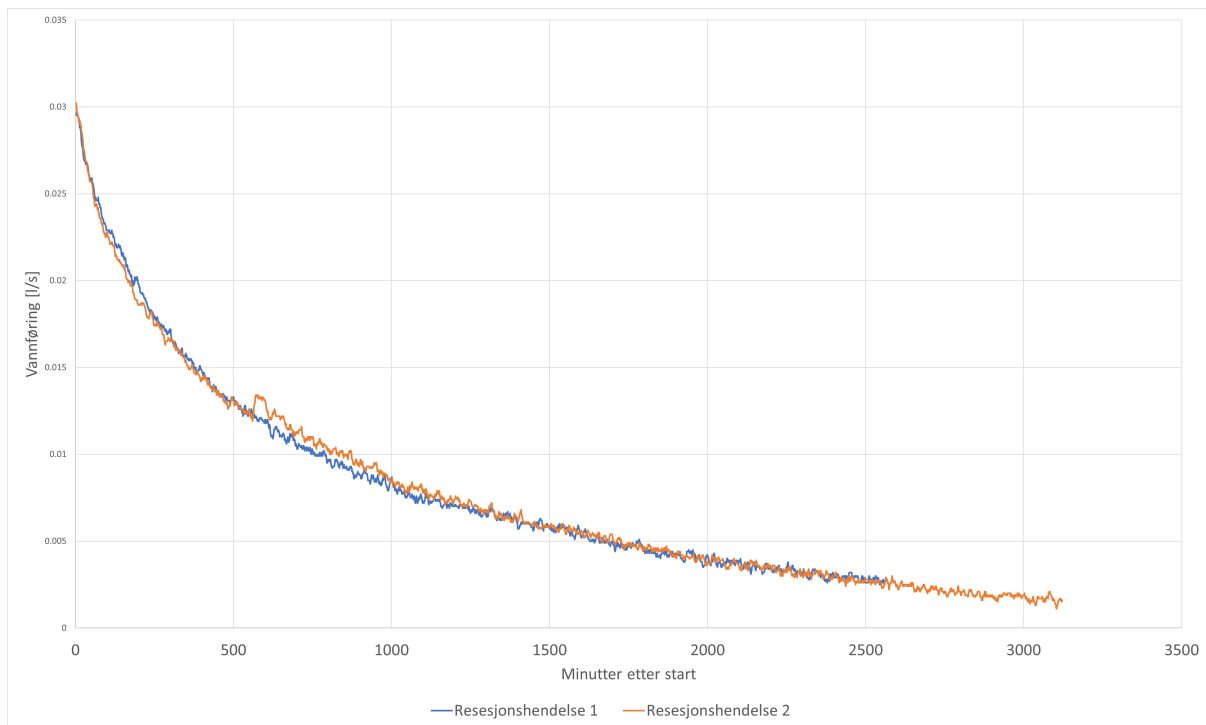
**Figur 4.6:** Vannføring i resesjonshendelse 1.

Forsøk nr. 1 ble som nevnt tidligere avsluttet rett i forkant av starten på forsøk nr. 2. Det resulterer i at vannføringskurven ikke flater helt ut.



**Figur 4.7:** Vannføring i resesjonshendelse 2.

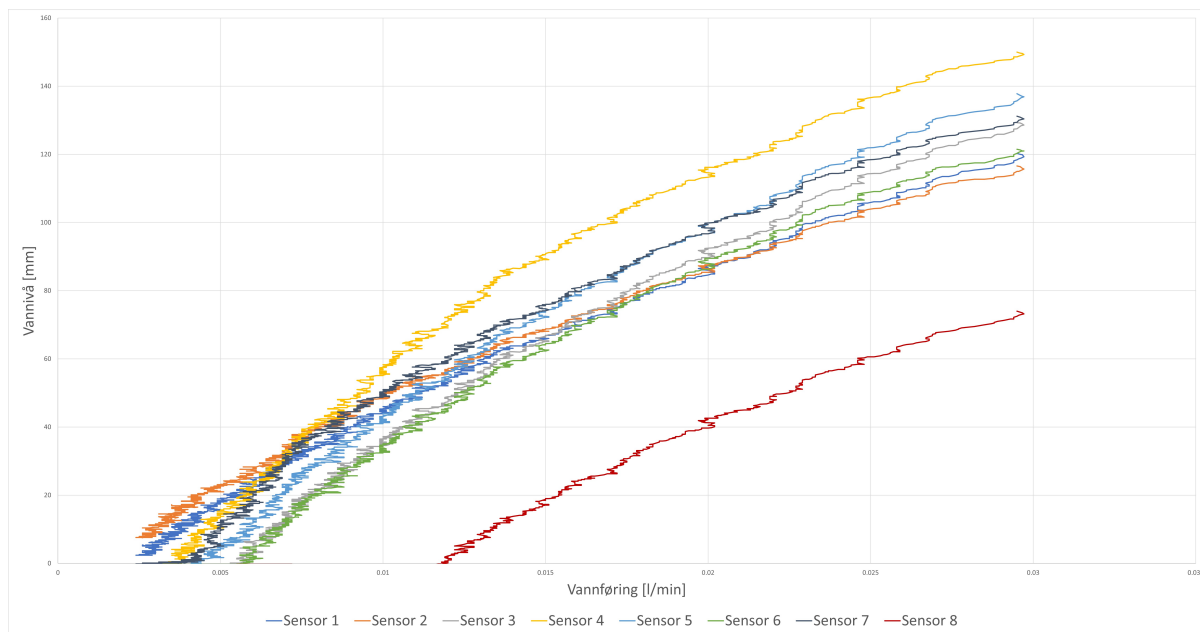
Repeterbarheten til forsøkene er vist i figur 4.8:



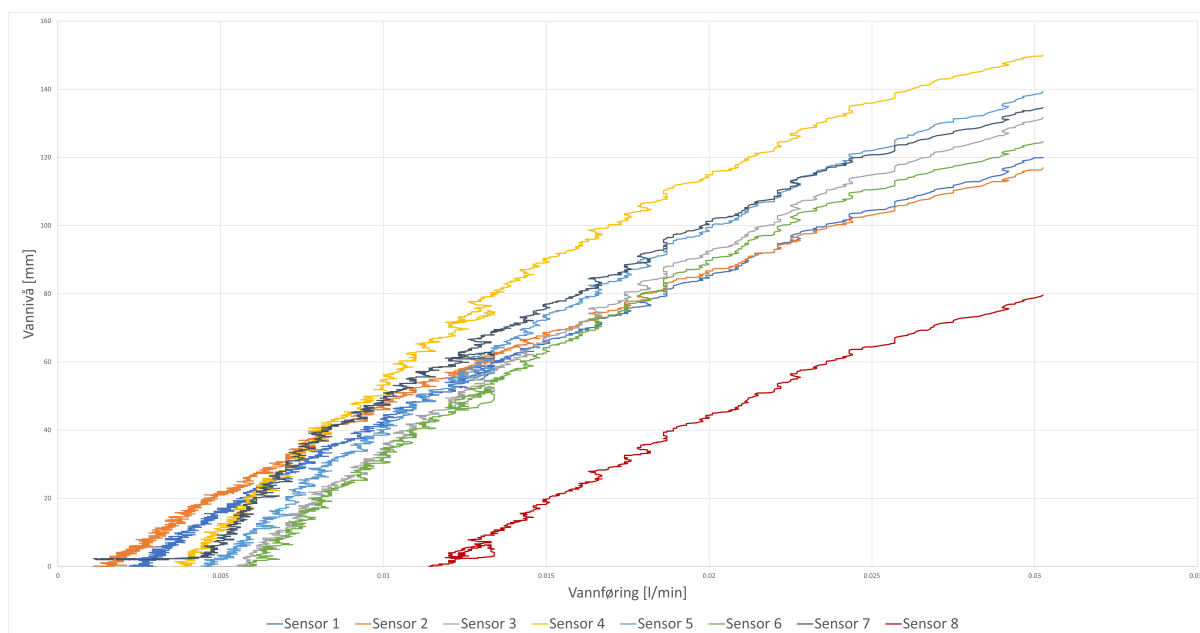
**Figur 4.8:** Vannføring for begge resesjonshendelsene.

Grafene følger hverandre i stor grad, og nedbørshendelsen registrert under gjennomføringen av forsøk nr. 2 forskyver vannføringen noe.

I figur 4.9 og 4.10 er vannivået i taket plottet mot vannføring ut av taket. Grafene viser at det er en klar sammenheng mellom vannivå og vannføring ut av taket for samtlige nivåsensorer, og at begge resesjonshendelsene er tilnærmet like.



**Figur 4.9:** Vannivå mot vannføring for resesjonshendelse 1.



**Figur 4.10:** Vannivå mot vannføring for resesjonshendelse 2.

## 4.2 DDD-modellen

I dette kapittelet presenteres resultatene fra kalibreringene og valideringene gjort i DDD-modellen.

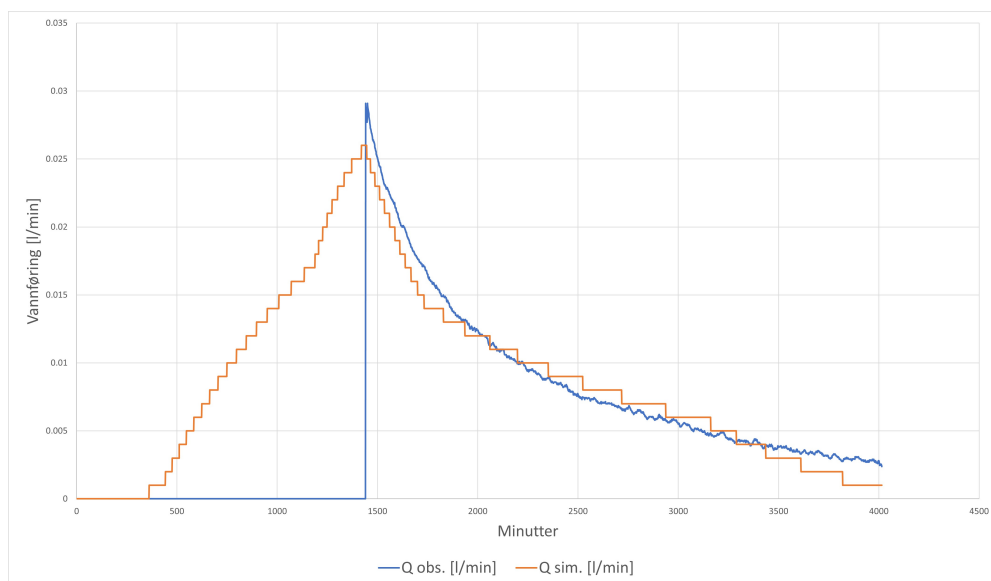
### 4.2.1 Kalibrering

Målet med kalibreringen er å bestemme takets snitthastighet og indirekte magasinkapasiteten ved å kalibrere parameterne  $G_{sh}$  og  $G_{sc}$ . Modellen ble kalibrert mot avrenning, men den ble kalibrert ved hjelp av to ulike former for nedbørsinput for å generere stat-tilstanden. Modellen oppnår gode resultater for den stasjonære nedbøren, med tilfredsstillende resultater for både resesjonshendelse 1 og 2. Resultatene for den konstruerte ekstrem hendelsen blir kommentert i eget kapittel. Resultatene er presentert i tabell 4.1:

**Tabell 4.1:** Kalibreringsresultater

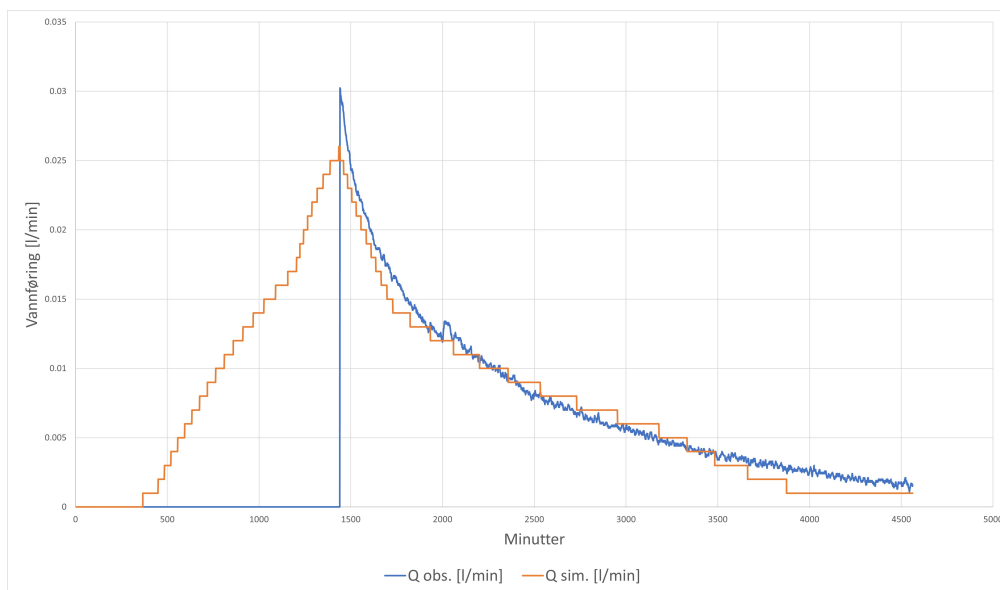
Kalibrering	Hendelse	Snitthastighet ( $m/s$ )	$G_{sh}$	$G_{sc}$	NSE	KGE
Kalibrering 1	Stasjonær R1	1.997E-05	0.761588	0.000252962	0.9615	0.9470
Kalibrering 2	Stasjonær R2	1.960E-05	0.767473	0.000246374	0.9659	0.9230
Kalibrering 3	Ekstrem R1	2.905E-05	1.12813	0.000248421	-38.8590	-1.9957
Kalibrering 4	Ekstrem R2	3.010E-05	1.13942	0.00025484	-32.7562	-1.8893

I figur 4.11 og 4.12 presenteres vannføringen for kalibreringene med stasjonær nedbør.



**Figur 4.11:** Vannføring, kalibrering 1.

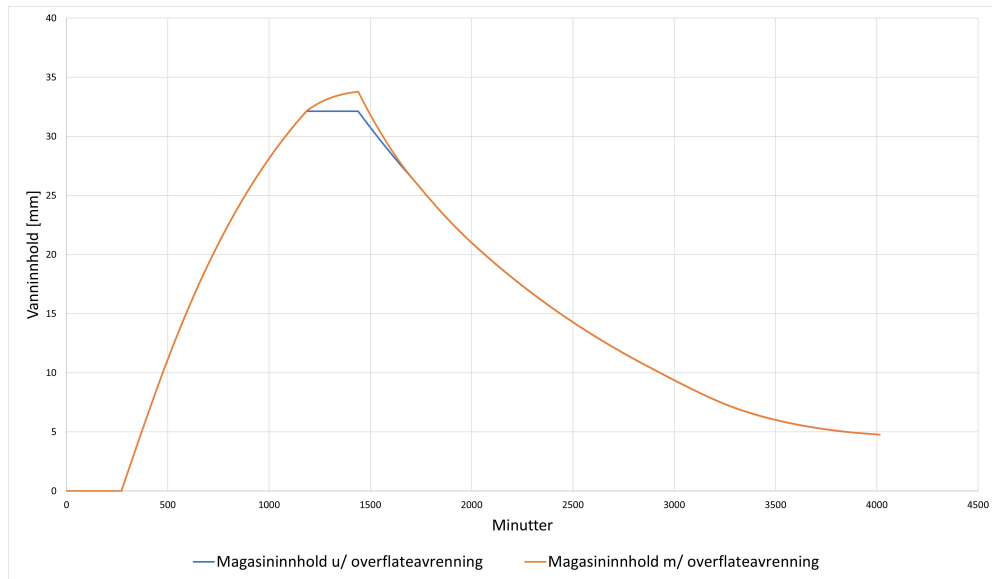




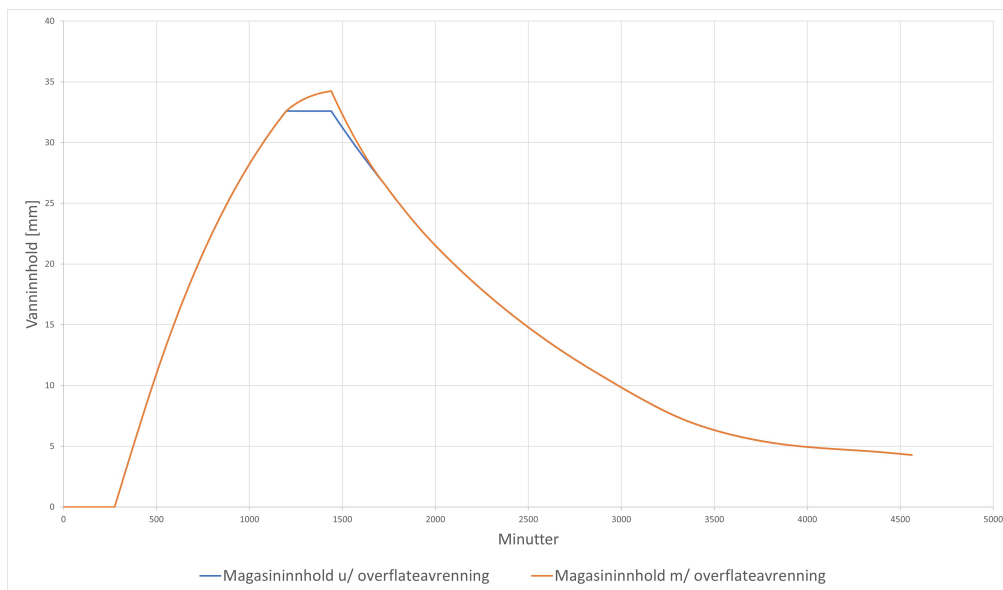
**Figur 4.12:** Vannføring, kalibrering 2.

Figurene viser at taket gradvis fylles opp i modellen, hvor observert resesjon starter i tidspunktet etter endt nedbør. Simulert resesjon tenderer til å ha en brattere helning og lavere vannføring i starten sammenlignet med observert resesjon. Ved endt resesjon er differansen mellom simulert og observert resesjon størst for hendelse 1, og tilnærmet lik for hendelse 2.

Modellens estimering av magasinkapasitet er der den blå kurven flater ut i figur 4.13 og 4.14.



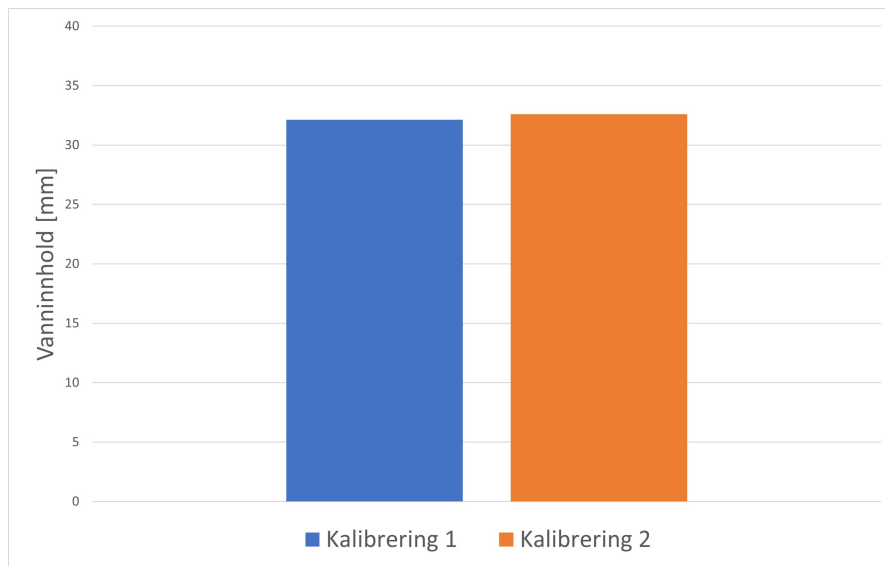
**Figur 4.13:** Magasinkapasitet, kalibrering 1.



**Figur 4.14:** Magasinkapasitet, kalibrering 2.

Det oppstår overflateavrenning for begge kalibreringene. Denne avtar fort og er å anse som neglisjerbar.

Kalibreringene estimerer en magasinkapasiteten på henholdvis 32.12 mm og 32.59 mm, se figur 4.15

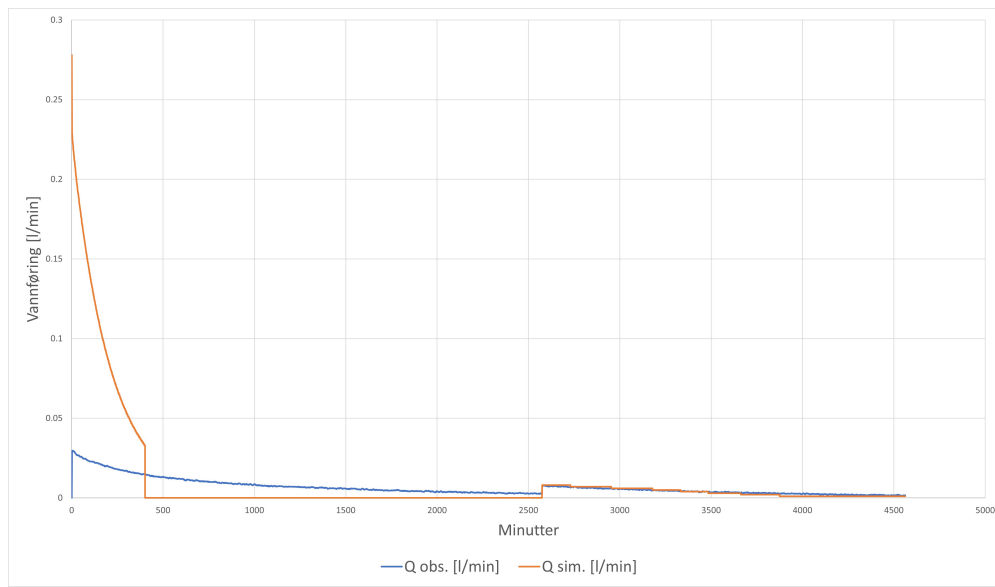


**Figur 4.15:** Estimert magasinkapasitet.

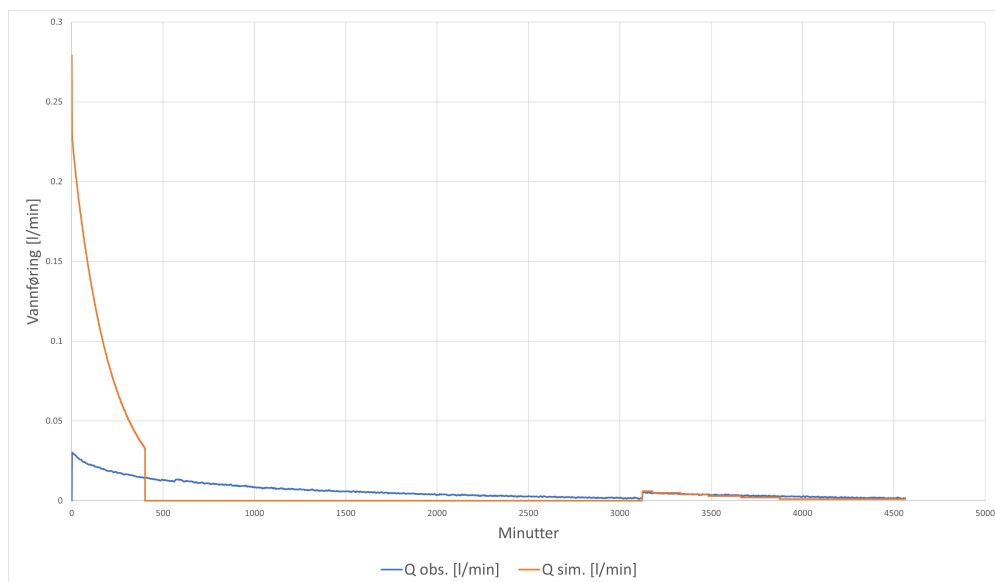
Tidligere studier fra taket viser til en estimert magasinkapasitet på 33.5 mm (Viker-Walsøe og Valle, 2020). Kalibreringene i denne oppgaven stemmer derfor bra med tidligere studier.

### Ekstrem hendelse

Figur 4.16 og 4.17 viser en grafisk fremstilling av simulert og observert resesjonen for den konstruerte ekstrem hendelsen. Modellen reagerer akutt på nedbøren og produserer avrenning langt over det som er observert. Negative NSE-verdier (tabell 4.1) indikerer at gjennomsnittet av observerte verdier er et bedre estimat enn det modellen klarer å simulere. Det er derfor ikke gjennomført validering av den ekstreme hendelsen.

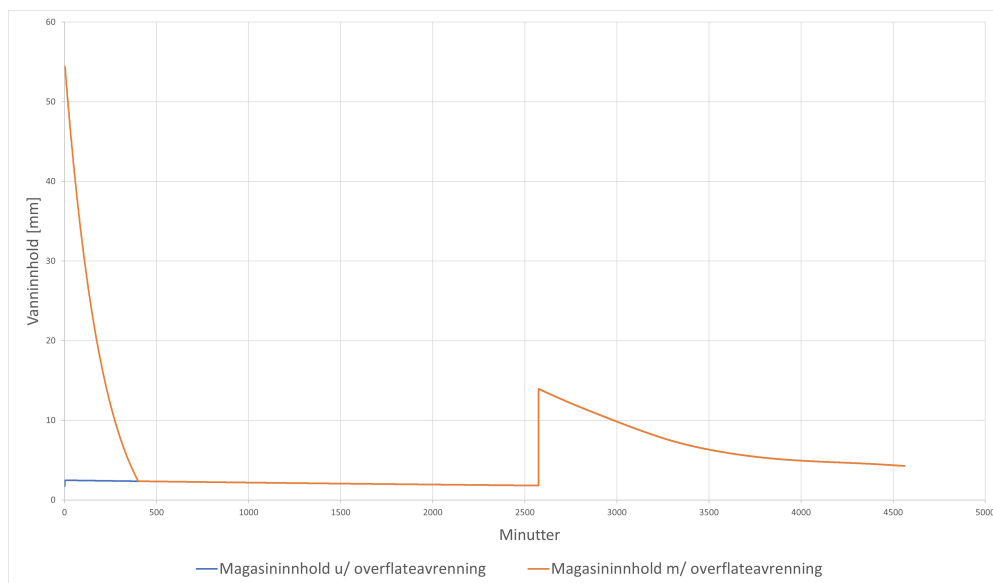


**Figur 4.16:** Vannføring, kalibrering 3.

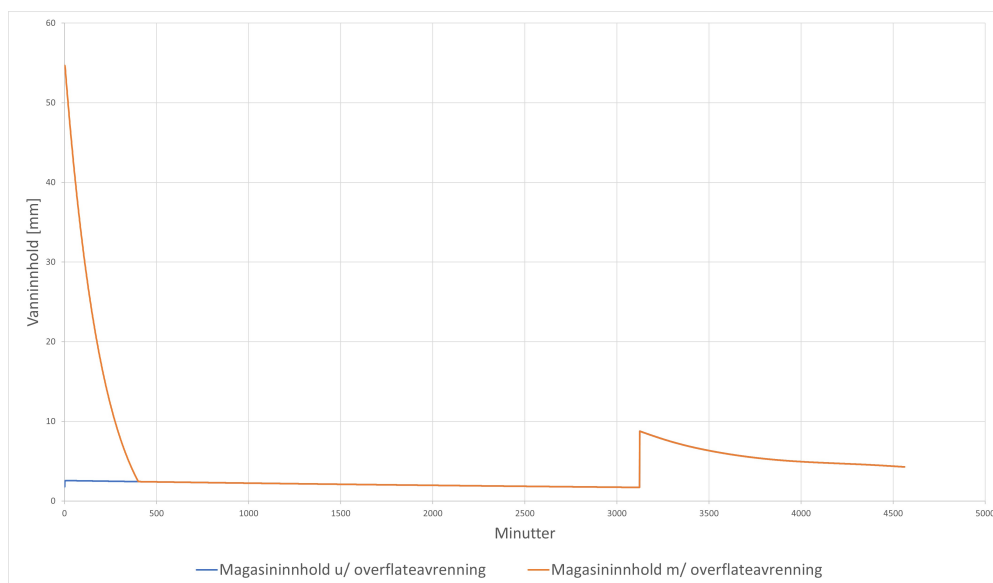


**Figur 4.17:** Vannføring, kalibrering 4.

Resultatene for estimert magasinkapasitet er vist i figur 4.18 og 4.19.



**Figur 4.18:** Magasinkapasitetskapasitet, kalibrering 3.



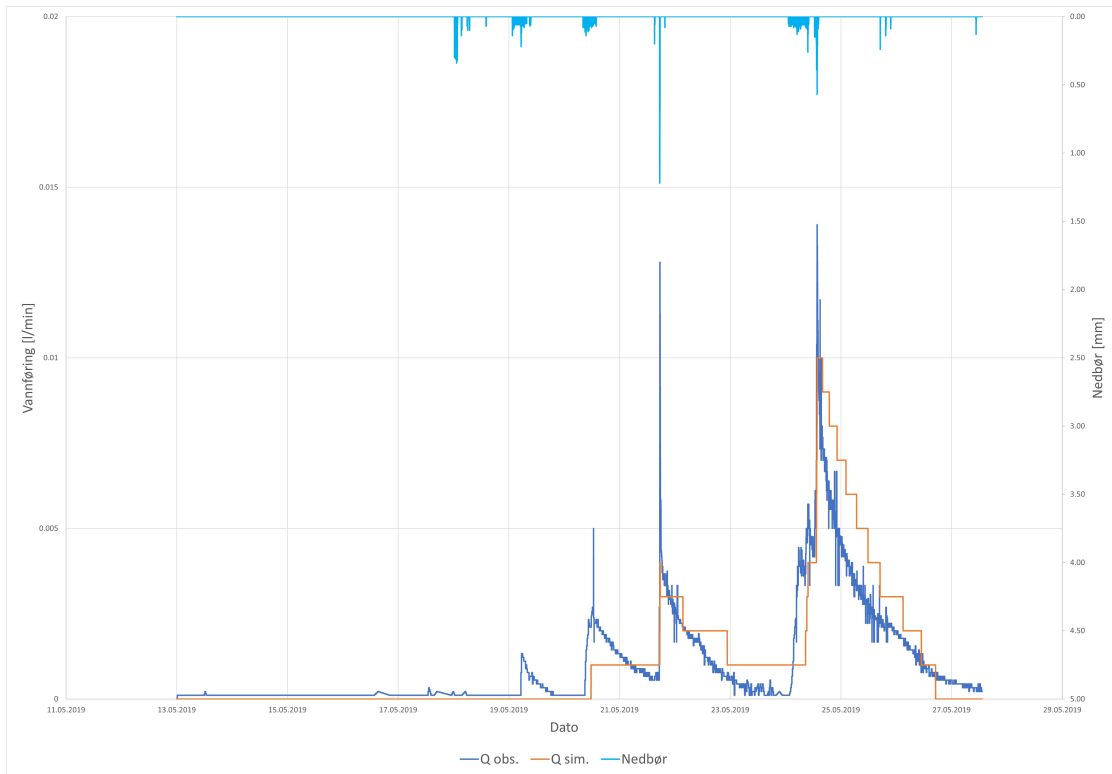
**Figur 4.19:** Magasinkapasitetskapasitet, kalibrering 4.

## 4.2.2 Validering

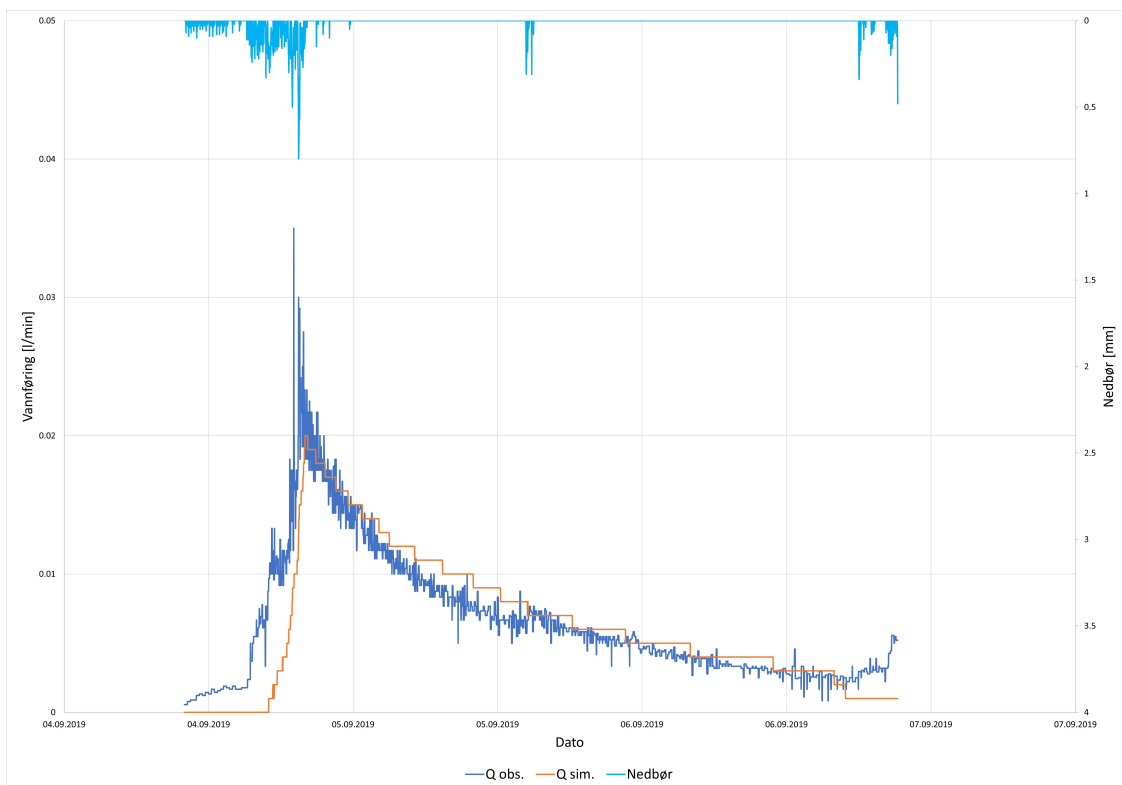
I dette kapitlet presenteres resultatene fra valideringen med tabeller og grafer. Det er kun kalibreringene for stasjonær nedbør som blir presentert.

### Avrenning/vannføring

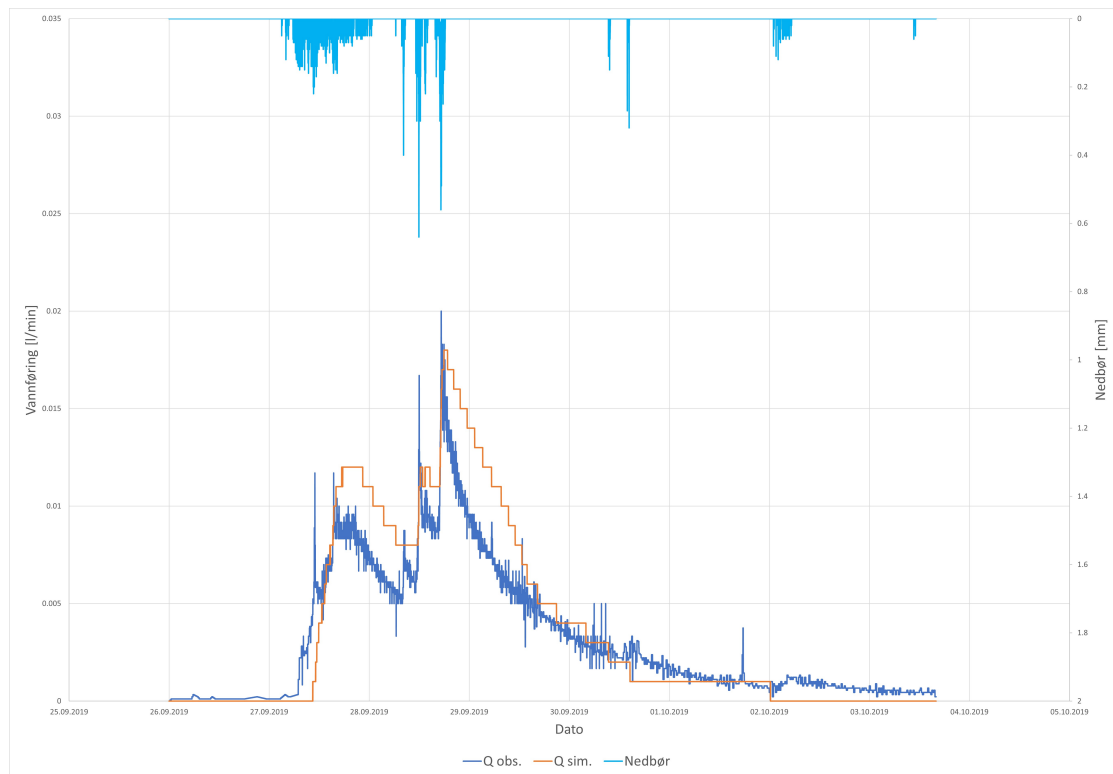
Validering er gjort med Gsh og Gsc parametre fra de kalibrerte hendelsene presentert i tabell 4.1. Valideringsresultatene for kalibrering 1 er vist i figur 4.20, 4.21 og 4.22.



Figur 4.20: Validering mai, kalibrering 1.

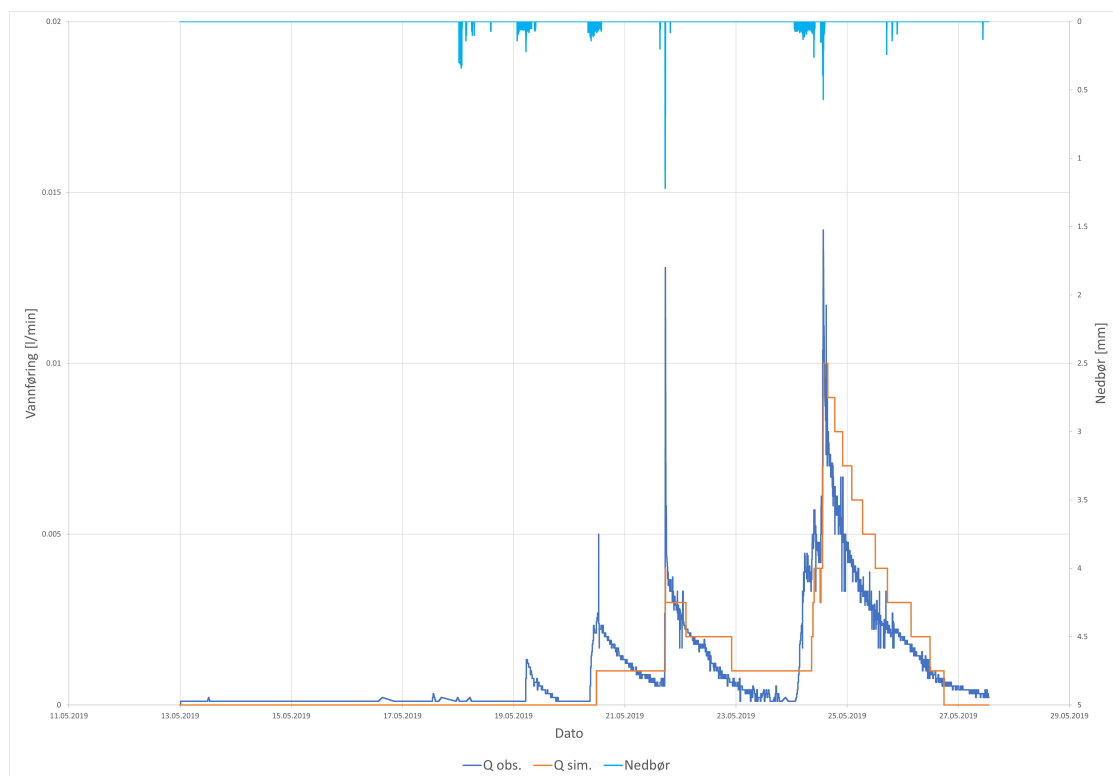


Figur 4.21: Validering september, kalibrering 1.

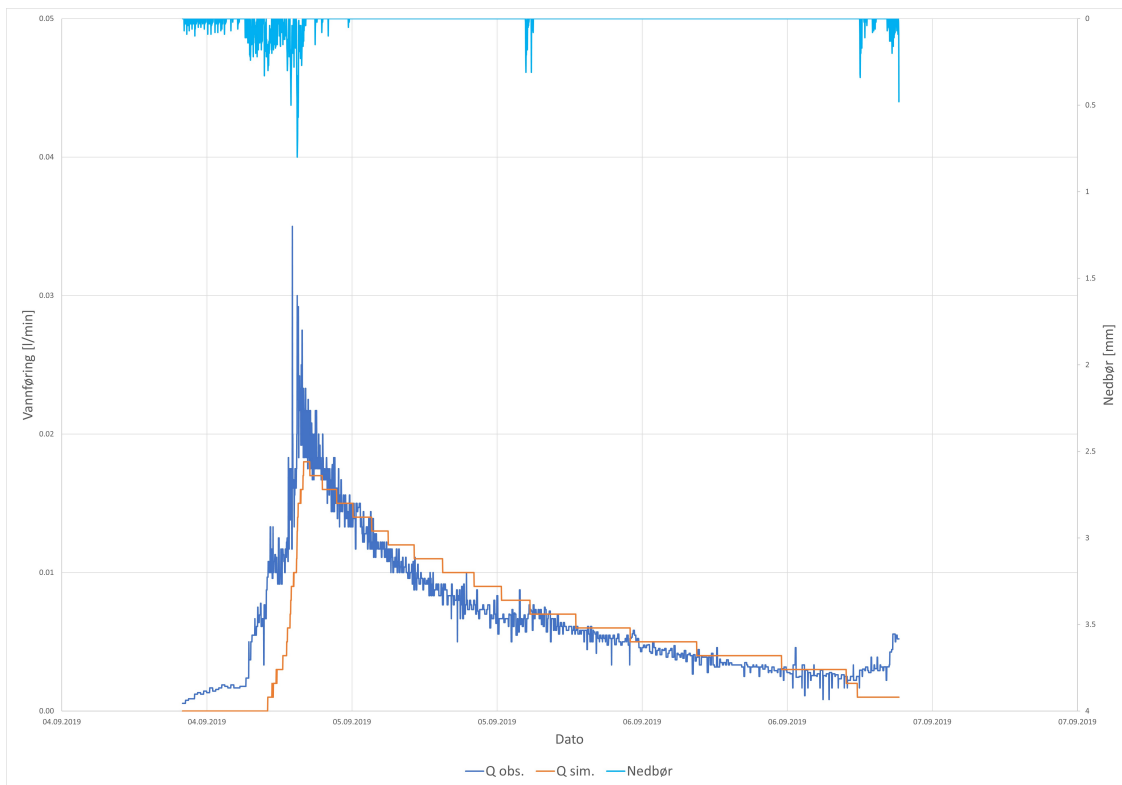


**Figur 4.22:** Validering oktober, kalibrering 1.

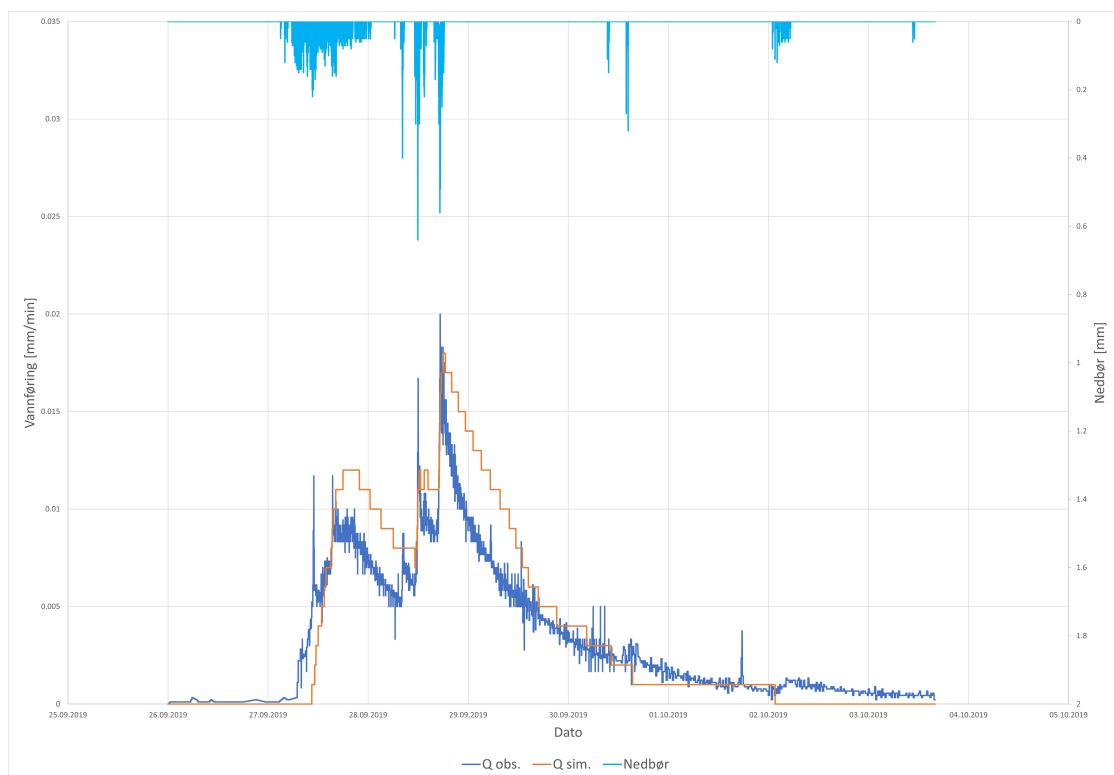
Valideringsresultatene for kalibrering 2 er vist i figur 4.23, 4.24 og 4.25.



**Figur 4.23:** Validering mai, kalibrering 2.



**Figur 4.24:** Validering september, kalibrering 2.



**Figur 4.25:** Validering oktober, kalibrering 2.

Modellene treffer godt på tidspunktene for avrenningstoppene, men sliter med å oppnå



de samme avrenningsmengdene. Modellen er heller ikke like nøyaktig for lavere vannføringer som gjenspeiles av hakkete grafer. Ved å sammenligne Gsh og Gsc parametrene for begge kalibreringene er det minimale forskjeller. Dette blir også bekreftet ved validering for de naturlige nedbørshendelsene. Resultater fra valideringene er gitt i tabell 4.2.

**Tabell 4.2:** Validering mot nedbørshendelser

<b>Kalibrering</b>	<b>Valideringshendelse</b>	<b>NSE</b>	<b>KGE</b>
Kalibrering 1			
	Mai	0.692	0.810
	Sept	0.722	0.832
	Oktober	0.713	0.733
Kalibrering 2			
	Mai	0.691	0.813
	Sept	0.708	0.842
	Oktober	0.723	0.742



## 5. Diskusjon

I dette kapitlet diskuteres resultatene fra gjennomføring av forsøkene, og kalibrering og validering av DDD-modellen.

### 5.1 Gjennomføring av fyll- og tømme-forsøk

Gjennomføringen av forsøkene ble som nevnt innledningsvis utført i samarbeid med Ingrid K. Ydse. Det ble fort konkludert med at en forsøkslogg i stor grad ville hjelpe oss, da observasjonene underveis ville ha stor verdi for videre studier og etterprøving av resultatene. I forkant av forsøkene var det stor usikkerhet rundt hvor mye vann og hvor lang tid det ville ta å fylle taket, og om det var gjennomførbart. Resultatene viser at et fylling- og tømme-forsøk av taket er gjennomførbart, og at vannivå i taket fint kan måles ved hjelp av de nyinstallerte nivåsensorene. En av svakhetene ved metoden er at vi ikke hadde god oversikt over metningen i taket under gjennomføringen av forsøkene, annet enn ved visuell observasjon. I etterkant av forsøkene ble nivåsensorene koblet opp for avlesing i sanntid via [www.sildre.nve.no](http://www.sildre.nve.no).

#### Oppfylling og tømming

Det ble vurdert to metoder for oppfylling: punktbelastning og jevnt fordelt oppfylling med svetteslanger. Etersom taket både har lengde- og breddefall mot sluket antok vi at vannet ville fordele seg jevnt hvis vi tilførte vann fra takets høyeste punkt. Resultatene viser at full metning ble oppnådd ved fylling, og at vannspeilet i taket lå horisontalt da proppen ble tatt ut. Dette ble målt i samtlige hjørner før proppen ble tatt ut, og senere bekreftet ved data fra nivåsensorene. Det ble observert en tydelig sammenheng mellom overflateavrenning og lekkasje. Etersom lekkasjen var tilnærmet lik null ved endt overflateavrenning anses ikke dette som en tydelig feilkilde ved gjennomføringen av forsøkene, men en mulig forbedring av eksisterende takstruktur bør vurderes for å eliminere langtidseffekten.

## Resesjon

Nivåsensorene går aldri helt i null for forsøk nr. 1 og resesjonen pågår i det oppfyllingen for forsøk nr. 2 starter. Denne observasjonen ble ikke oppdaget før tilsendte data fra nivåsensorene ble analysert og bearbeidet. Under gjennomføringen av forsøk nr. 2 ble det registrert en mindre nedbørshendelse, og det antas derfor at dette forskjøvet resesjonen til taket. En viktig observasjon her er at taket responderer umiddelbart på nedbøren. Ved å sammenligne forsøk 1 og 2 kan det konkluderes med at resesjonshendelsene representerer takets resesjonskarakteristikk godt, da grafene er tilnærmet like. Resultatene presentert i figur 4.9 og 4.10 viser at det er en tydelig sammenheng mellom vannivå i taket og vannføring ut av taket ved at områdene lengst unna sluket tømmes først.

Den antatte strømningsveien i avstandsfordelingen kan bekreftes ved å se på resesjonsforløpet for begge forsøkene. Dette begrunnes med at nivåene i sensor 3 og 6 i stor grad følger hverandre gjennom resesjonsforløpet, og at differansen i nivå kan skyldes den relative avstanden til den diagonale helningen i taket. Legges denne antakelsen til grunn kan en tolke det dit at vannstrømningen følger lengdefallet ved at sensor 4, 5 og 7 får tilførsel av vann så lenge det står vann lenger opp i taket. Sensor 4 har det høyeste vannivået gjennom begge resesjonshendelsene, men vannivået synker drastisk etter at sensorer 5 og 7 går mot null. Sensor 4 er også den nivåsensoren som er tilnærmet sentrert i taket, og får mest bidrag fra omkringliggende områder hvis lengdefallet legges til grunn.

## 5.2 DDD-modellen

Oppsettet av DDD-modellene viste seg mer tidkrevende enn først antatt, og kalibreringsrutinene måtte gjennomgå en omfattende prøve-feile-syklus før, under og i etterkant av kalibreringene. Mangel på maskinkapasitet ble avgjørende for antall kalibreringer og valideringer. Det ble derfor gjort en rekke antakelser med utgangspunkt i tidligere studier fra Viker-Walsøe og Valle (2020).

### 5.2.1 Kalibrering

For kalibrering av DDD-modellen ble det lagd to fiktive nedbørshendelser som hadde til hensikt å gi en god starttilstand for simulering av resesjon. Det er kun den stasjonære hendelsen som estimerer full magasinkapasitet i modellen, og er den eneste hendelsen som blir vurdert og validert i oppgaven. Det er mulig en ekstrem hendelse ville gitt gode resultater dersom nedbørintensiteten hadde blitt skrudd ned for denne type hendelse. Kalibrering av modellen hadde til hensikt å kalibrere et sett av parameterne  $G_{sh}$  og  $G_{sc}$  som kunne representere takets resesjonskarakteristikk. For de stasjonære nedbørshendelsene gir modellene veldig gode NSE- og KGE-verdier, og observert og simulert

avrenning samsvarer godt for begge kalibreringen.

DDD-modellen bygger på antakelsen om at innholdet i mettet sone  $S$  og  $\Lambda$  deler den samme gammafordelingen, hvor  $G_{sh}$  er lik for begge fordelingene. Denne antakelsen gjør at vi ved å kalibrere parameterne  $G_{sh}$  og  $G_{sc}$  antar en direkte sammenheng mellom resesjonskarakteristikken og metningsinnholdet i taket. Ulempen med denne antakelsen er at takets faktiske magasinkapasitet, basert på utforming, ikke blir tatt hensyn til.

Differansen mellom simulert og modellert resesjon er størst for kalibrering 1. Felles for begge kalibreringene er at modellen tenderer til å ha en brattere resesjonskurve i starten enn hva som er observert fra taket. Dette viser at de kalibrerte verdiene  $G_{sh}$  og  $G_{sc}$  som benyttes i ligning 2.11 for å estimere takets snitthastighet, er høyere enn den observerte.

En viktig observasjon er at de kalibrerte parameterene  $G_{sh}$  og  $G_{sc}$  oppnår en verdi som beveger seg mot ytterkantene av intervallet satt i forkant av kalibreringene. Det betyr at de optimale parametrene for å beskrive resesjonshendelsen sannsynligvis ligger utenfor intervallet. Det betyr at det ikke kan konkluderes med at en modell kalibrert mot en resesjonshendelse egner seg til å beskrive avrenning fra naturlig nedbør.

### 5.2.2 Validering

For begge kalibreringene oppnås det veldig gode NSE- og KGE-verdier, og den stasjonære nedbøren fyller magasinkapasiteten til taket. Dette isolert sett viser at modellen i stor grad klarer å simulere en faktisk resesjonshendelse godt, og at dette har nær sammenheng med virkeligheten. I analysen av datamaterialet ble det vurdert hvorvidt disse resultatene alene kunne konkludere med at parameterne  $G_{sh}$  og  $G_{sc}$  var optimalisert. Kalibreringsrutinen plukker ut parametre i endepunktene av intervallet, og det ble derfor besluttet å gjennomføre valideringer mot naturlige hendelser. Dette ble gjort for å gi et bedre grunnlag for hvorvidt resultatene fra kalibreringene er representative eller ikke. Utvalgte hendelser er de samme som Viker-Walsøe og Valle (2020) benyttet i sine valideringer. Resultatene viser at det ikke nødvendigvis oppnås bedre NSE- og KGE-verdier ved validering mot naturlige nedbørshendelser, men at de i høyeste grad er tilfredsstillende. Valideringen reagerer godt på nedbørshendelsene, men treffer ikke avrenningstoppene.



## 6. Konklusjon

I denne oppgaven er det gjennomført to kontrollerte fylling- og tømmeforsøk på et av de grønne takene ved NMBU. Resesjonen til det magasinerende laget bestående av LECA er godt dokumentert, og sammenhengen mellom vannivå i taket og vannføring i utløpet viser at taket i stor grad følger den antatte strømningsveien bestemt i avstandsfordelingen. Områdene med lengst avstand til sluket tømmes først. Forsøkene gir et godt bilde på takets resesjonen da forsøkene viser til god repeterbarhet for begge resesjonshendelsene.

Ved å bruke en stasjonær nedbørhendelse for å generere en starttilstand med full metning i DDD-modellen beregnes det gode NSE- og KGE-verdier, og dette isolert sett vitner om at DDD-modellen estimerer avrenning godt for en hendelse med fullstendig metning. Verdiene NSE og KGE er begrenset av intervallet som er satt for parametrene i kalibreringsrutinen, og basert på det som er gjort så langt er det vanskelig å si sikkert om kalibrering mot resesjon gir en god modell for å beskrive naturlig avrenning og resesjon. For de naturlige hendelsene oppnås det gode NSE- og KGE-verdier, men dette alene er ikke nok til å konkludere med at kalibrerte parametre er optimalisert.

### 6.1 Videre arbeid

Ingrid K. Ydse vil i sin oppgavene ta for seg en fysisk basert strømningsmodell som kan gi bedre tolkninger av lambdaverdiene, og hvilken sammenheng det er mellom lambda-verdiene og hydrauliske gradienter i taket. Det nevnes enkeltpunkter for videre arbeid nedenfor. Dette er punkter jeg mener det er relevant å forske videre på, og som vil videreutvikle DDD-modellen og forskningen på de grønne takene ytterligere.

- Definere magasinkapasiteten i DDD-modellen basert på den faktiske utformingen av taket.
- Flere kalibreringer med et bredere intervall for parametrene
- Analyse av feltkapasiteten til det aktuelle taket





# Referanser

- Bergknapp AS (2020). *Grønt på taket*. URL: <https://www.bergknapp.no/produkter/gr%7B%5C%7Dnne-tak>.
- Chin, D. A. (2013). *Water-resources engineering*. Third Edition. Essex, England: Pearson Education Limited.
- Colleuille, H. og Gillebo, E. (2002). *Nasjonalt observasjonsnett for markvann*. Tekn. rapp. Oslo: NVE. URL: <https://publikasjoner.nve.no/rapport/2002/rapport2002%7B%5C%7D06.pdf>.
- Fordal, E. (2018). Avrenning fra to grønne tak ved forskningsinfrastrukturen Bia"i Ås kommune. Masteravhandling. NMBU.
- Fremtidens byer (2016). *Hovedrapport Framtidens byer*. Tekn. rapp. Regjeringenn. URL: <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/hovedrapport-for-framtidens-byer-2008-2014/id2474215/>.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K. og Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2009.08.003](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003).
- Holden, J., Kirkby, M. J., Lane, S. N., Milledge, D. G., Brookes, C. J., Holden, V. og McDonald, A. T. (2008). Overland flow velocity and roughness properties in peatlands. *Water resources research* 44. DOI: [10.1029/2007WR006052](https://doi.org/10.1029/2007WR006052).
- Knoben, W. J. M., Freer, J. E. og Woods, R. A. (2019). Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash-Sutcliffe and Kling-Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences*. DOI: [10.5194/hess-23-4323-2019](https://doi.org/10.5194/hess-23-4323-2019).
- Lindholm, O. (2014). Vann- og miljøteknikk. I: 2. utgave. Hamar. Kap. 12.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D. og Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*.
- Nash, J. E. og Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part 1 - A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10. DOI: [10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6).
- Noreng, K., Kvalvik, M., Busklein, J. O., Ødegård, I. M., Clewing, C. S. og French, H. K. (2012). *Grønne tak. Resultater fra et kunnskapsinnhentingsprosjekt*. Tekn. rapp. Trondheim: SINTEF Byggforsk.
- NOU2010:10 (2010). *Tilpassing til eit klima i endring*. Oslo. URL: <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/nou-2010-10/id624355/>.
- NOU2015:16 (2015). *Overvann i byer og tettsteder. Som problem og ressurs*. Oslo: Klima- og miljødepartementet. URL: <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/nou-2015-16/id2465332/>.

- Paus, K. H. (2020). *Kunnskapsbehov innen overvann og klimatilpasning*. Tekn. rapp. Hamar: Norsk vann. URL: <https://www.norskvann.no/index.php/component/hikashop/produkt/866-b26-kunnskapsbehov-innen-overvann-og-klimatilpasning?Itemid=780>.
- Ritter, A. og Muñoz-Carpena, R. (2013). Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. *Journal of Hydrology X*. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2012.12.004](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.004).
- Skaugen, T. og Onof, C. (2014). A rainfall-runoff model parameterized from GIS and runoff data. *Hydrological processes* 28. DOI: [10.1002/hyp.9968](https://doi.org/10.1002/hyp.9968).
- Skaugen, T. og Mengistu, Z. (2016). Estimating catchment-scale groundwater dynamics from recession analysis - Enhanced constraining of hydrological models. *Hydrology and Earth System Sciences* 20. DOI: [10.5194/hess-20-4963-2016](https://doi.org/10.5194/hess-20-4963-2016).
- Skaugen, T., Lawrence, D. og Ortega, R. Z. (2020). A parameter parsimonious approach for catchment scale urban hydrology - Which processes are important? *Journal of Hydrology X*. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2020.100060](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.100060).
- Skaugen, T. (2020). Personlig kommunikasjon. Møte 17.09.2020. Norges vassdrags- og energidirektorat.
- Stavang, A. E. (2019). Rainfall-runoff modelling with high temporal resolution on the arable catchment Skuterud - Assessing the performance of the Distance Distribution Dynamics model. Masteravhandling. NMBU.
- Ueland, J. S. (2018). Effekten av Bia, en forskningsinfrastruktur med grønne tak, innledende studier. Masteravhandling. NMBU.
- Viker-Walsøe, A. og Valle, J. S. (2020). Grønne tak med magasinerende sjikt - hydrologisk effekt og avrenningsmodellering med DDD-modellen. Masteravhandling. NMBU.
- Øyre, A. S. og Trommald, J. (2018). Etablering av Bia, en forskningsinfrastruktur med grønne tak. Masteravhandling. NMBU.

# Vedlegg A. Parameterfil

**Tabell A.1:** Oversikt over parametre

Parameter	Verdi	Beskrivelse	Kilde/Metode
Urban	1	Verdi uten betydning	Brukerveiledning
a00-a10	97	Hypsografiske kurve. Lik for hele taket	seNorge.no
xcor, ycor	59.67015, 10.7697	Koordinater	norgeskart.no
pkorr, skorr	1	Korreksjon av nedbør	Brukerveiledning*
u	0.56	Gjennomsnittlig vindhastighet [m/s]	(Viker-Walsøe og Valle, 2020)
pro	0.05	Fritt vann i snø	Brukerveiledning
TX	0.5	Skilletemperatur regn/snø [C]	Brukerveiledning
a0P, a0IP	42.36	Snøfordelingsparameter P-/IP-areal	Brukerveiledning
dP, dIP	413	Snøfordelingsparameter P-/IP-areal	Brukerveiledning
AprimP, AprimIP	0.86	Verdi uten betydning	Brukerveiledning
tauxP, tauxIP	0	Verdi uten betydning	Brukerveiledning
Timeresinsec	60	Tidsoppløsning i sekunder for modellen [s]	Satt til 60
MADP, MADIP	1.32E-06	Midlere årsavrenning for taket [m <sup>3</sup> /s]	(Viker-Walsøe og Valle, 2020)
area	45.59	Innvendig areal av taket [m <sup>2</sup> ]	Målt
NoL	5	Antall lag i modellen - 4 grunnvannslag og et overflatelag	Brukerveiledning
R	0.3	Feltpasitet	Satt til 30%
Pcritflux, IPCritflux	5.1, 10.0	Kritisk flux for dynamisk elvenettverk P-areal	(Viker-Walsøe og Valle, 2020)
Pfrac, Ifrac, Bogfrac	0.999, 0.001, 0.0	Fraksjon P-areal	(Viker-Walsøe og Valle, 2020)
Pmax, Ipmx, Bogmax	12.01, 12.01, 0.0	Max avstand P-areal	(Viker-Walsøe og Valle, 2020)
Pmid, IPmid, Bogmid	6.22, 6.22, 0.0	Middel avstand P-areal	(Viker-Walsøe og Valle, 2020)
Pz, IPz, Bogz	0.001	Arealfraksjon med 0 m avstand til elvenettverket P-areal	Ikke relevant for taket
midFl	1	Gjennomsnittsavstand, elvenettverk	Ikke relevant for taket
stdFl	1	Standardavvik for avstander i elvenettverk	Ikke relevant for taket
maxFl	1	Maks. avstand i elvenettverk	Ikke relevant for taket
OFVP, OFVIP	0.0005, 0.01	Hastighet overflateavrenning P-/IP-areal [m/s]	(Holden mfl., 2008)
GshInt	-	Shapeparameter i gammafordeling	Kalibrerte verdier
GscInt	-	Scaleparameter i gammafordeling	Kalibrerte verdier
rv	1.5	Hastighet i elvenettverk	Brukerveiledning
Persons	0	Antall personekvivalenter for spillvannsanlegg	Brukerveiledning

\*P : permeable flater

\*IP : impermeable flater

\*Brukerveiledning : Verdier fra oversendt modelloppsett



## Vedlegg B. Datafil

Tabell B.1: Generelt oppsett av datafil

År	Måned	Dag	Time	Min	Nedbør_HS1-HS10 <sup>1</sup>	Temp._HS1-HS10 <sup>1</sup>	Q observert
2020	10	1	8	0	mm/tidssteg	Temperatur	0
2020	10	1	8	1	mm/tidssteg	Temperatur	0
2020	10	1	8	2	mm/tidssteg	Temperatur	0
2020	10	1	8	3	mm/tidssteg	Temperatur	0
2020	10	1	8	4	mm/tidssteg	Temperatur	0
2020	10	1	8	5	mm/tidssteg	Temperatur	0
2020	10	1	8	6	mm/tidssteg	Temperatur	0
2020	10	1	8	7	mm/tidssteg	Temperatur	0
2020	10	1	8	8	mm/tidssteg	Temperatur	0
2020	10	1	8	9	mm/tidssteg	Temperatur	0
2020	10	1	8	10	mm/tidssteg	Temperatur	0
2020	10	1	8	11	mm/tidssteg	Temperatur	0
2020	10	1	8	12	mm/tidssteg	Temperatur	0
2020	10	1	8	13	mm/tidssteg	Temperatur	0
2020	10	1	8	14	mm/tidssteg	Temperatur	0
2020	10	1	8	15	mm/tidssteg	Temperatur	0
2020	10	1	8	16	mm/tidssteg	Temperatur	0
2020	10	1	8	17	mm/tidssteg	Temperatur	0
2020	10	1	8	18	mm/tidssteg	Temperatur	0
2020	10	1	8	19	mm/tidssteg	Temperatur	0
2020	10	1	8	20	mm/tidssteg	Temperatur	0
2020	10	1	8	21	mm/tidssteg	Temperatur	0
2020	10	1	8	22	mm/tidssteg	Temperatur	0
2020	10	1	8	23	mm/tidssteg	Temperatur	0
2020	10	1	8	24	mm/tidssteg	Temperatur	0
2020	10	1	8	25	mm/tidssteg	Temperatur	0
2020	10	1	8	26	mm/tidssteg	Temperatur	0
2020	10	1	8	27	mm/tidssteg	Temperatur	0
2020	10	1	8	28	mm/tidssteg	Temperatur	0
2020	10	1	8	29	mm/tidssteg	Temperatur	0
2020	10	1	8	30	mm/tidssteg	Temperatur	0

<sup>1</sup> : Antas liten romlig variasjon for små nedbørsfelt, og verdien settes lik for alle høyde-soner



## Vedlegg C. Resultatfil

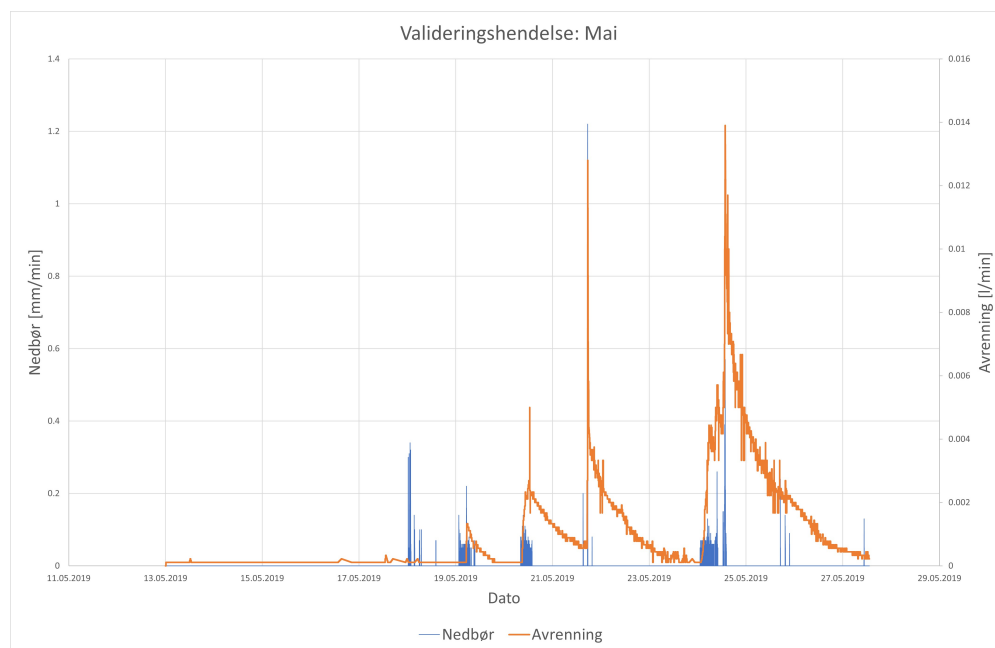
Tabell C.1: Oppsett av resultatfil

Kolonnenr.	Type data	Enhet
1-5	År, måned, dag, time og minutt	-
6	Nedbør	mm
7	Temperatur	Celsius
8	Observerte vannføring	m <sup>3</sup> /s
9	Simulert total vannføring	m <sup>3</sup> /s
10	Simulert vannføring P-areal	m <sup>3</sup> /s
11	Simulert vannføring IP-areal	m <sup>3</sup> /s
12	Simulert vannføring for myr	m <sup>3</sup> /s
13	Snødekningsgrad P-areal	fraksjon
14	Snøens vannekvivalent P-areal	mm
15	Grunnvannsinhold P-areal, inkl. overflateavrenning	mm
16	Grunnvannsinhold IP-areal, inkl. overflateavrenning	mm
17	Underskudd, grunnvann P-areal	mm
18	Underskudd, grunnvann IP-areal	mm
19	Markvann P-areal	mm
20	Markvann IP-areal	mm
21	Aktuell fordampning P-areal	mm
22	Aktuell fordampning IP-areal	mm
23	Total avløp	mm
24	Markvann i myr	mm
25	Fordampning i myr	mm
26	Vann i elvenettverk	mm
27	Grunnvann i myr	mm
28	Snødekningsgrad IP-areal	fraksjon
29	Snøens vannekvivalent IP-areal	mm
30	Fritt vann i snø, P-areal	mm
31	Fritt vann i snø, IP-areal	mm
32	Grunnvannsinhold, u/ overflateavrenning P-areal	mm
33	Grunnvannsinhold, u/ overflateavrenning IP-areal	mm
34	Vannføring overflateavrenning	mm

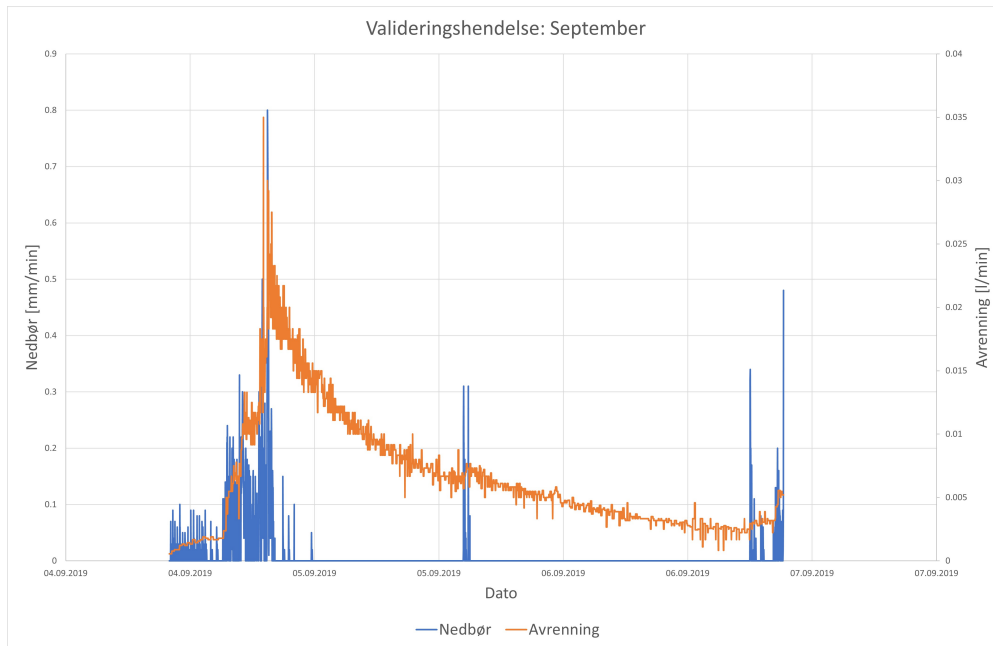
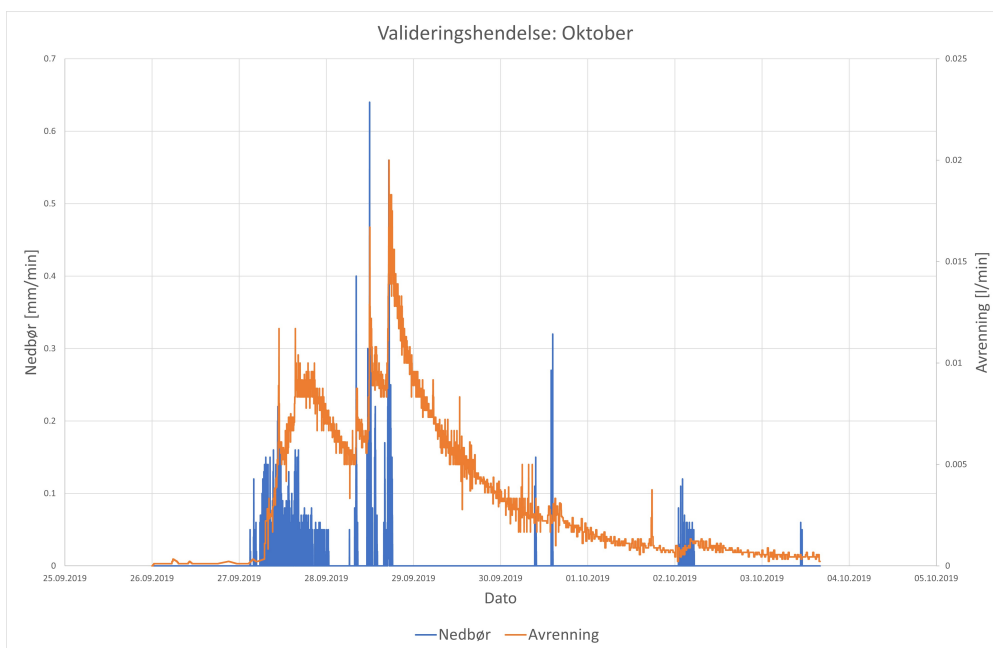




## Vedlegg D. Valideringshendelser



**Figur D.1:** Nedbørhendelse mai

**Figur D.2:** Nedbørshendelse september**Figur D.3:** Nedbørshendelse oktober

## Vedlegg E. Forsøksnotater

**Tabell E.1:** Gjennomføring av forsøk nr. 1

Kl.	Hendelse/observasjon	Q [l/s]	Notat
10:01	Start oppfylling	0.88	
10:31	Lekkasjemåling	0.015	
10:37	Vannspeil rett under sedum	-	
10:44	Synlig overflateavrenning	-	
10:52	Lekkasjemåling	0.00167	
11:01	Målt vannføring	0.88	
11:35	Vannspeil 12 cm under topp bord	-	
12:00	Lekkasjemåling	0.0083	
12:06	Stopp oppfylling	-	Kontrollerer vannspeil
12:09	Propp fjernes	-	
12:12	Lekkasjemåling	0.0081	
12:33:50	Vannspeil flukter med topp slukboks	-	
12:34:15	Avrenning fra bunn slukboks	-	Fullt tverrsnitt
12:34:40	Avrenning fra bunn slukboks	-	Delfylt tverrsnitt
12:37	Lekkasjemåling	0.0073	
12:50	Lekkasjemåling	0.0012	
13:35	Lekkasjemåling	0.00037	Observasjon avsluttes
13:35	Volumberegning		6600 m <sup>3</sup>

I forkant av forsøket ble det målt og observert betydelige mengder nedbør. Det gjorde at taket var godt mettet før oppfyllingen startet, og slukkassen fikk tilsig av vann etter kort tid.

Fra observasjonene kan en tydelig se at lekkasjen ut av taket er av en betydelig karakter under oppfylling, og like etter at proppen er tatt ut. Metoden for lekkasjemåling er beskrevet tidligere og målenøyaktigheten bærer preg av en primitiv løsning. Likevel viser målingene at lekkasjeandelen ut av taket avtar med mengden overflateavrenning.

Tabell E.2: Gjennomføring av forsøk nr. 2

<b>Kl.</b>	<b>Hendelse/observasjon</b>	<b>Q [l/s]</b>	<b>Notat</b>
09:23	Start oppfylling	0.83	
09:58	Synlig vannlekkasje	-	
09:58	Synlig overflateavrenning	-	
09:58	2.5 cm vannhøyde i slukkasse	-	
10:03	Full slukkasse	-	
10:04	Målt vannføring	0.83	
10:41	Lekkasjemåling	0.002137	
11:23	Stopp oppfylling	-	Kontrollerer vannspeil*
11:25	Lekkasjemåling	0.0079	
11:47	Propp fjernes	-	
12:11:06	Vannspeil flukter med topp slukkboks	-	
12:11:30	Avrenning fra bunn slukkboks	-	Fullt tverrsnitt
12:11:50	Avrenning fra bunn slukkboks	-	Delfylt tverrsnitt
12:13	Vann på overflaten	-	Antakelig gropmagasinering
13:16:00	Lekkasjemåling	0.00025	Observasjon avsluttes
13:16	Volumberegning		5976 m <sup>3</sup>





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

Postboks 5003  
NO-1432 Ås  
Norway