



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2020 30 stp
Fakultet for realfag og teknologi

Grønne tak med magasinerende sjikt – hydrologisk effekt og avrenningsmodellering med DDD- modellen

Green roofs with water storage capacity –
hydrological performance and runoff modelling
using the Distance Distribution Dynamics model

Ane Viker-Walsøe og Jon Sivert Valle
Vann- og miljøteknikk

Søk råd i øl og vin, men fatt beslutning i vann

Studentnorm

Forord

Fem formative og lærerike år som student på Norges miljø- og biovitenskapelige universitet har kulminert i en 75 siders lang masteroppgave. Dette markerer, utrolig nok, vår avslutning på studiet vann og miljøteknikk.

Vi vil rette en stor takk til noen utvalgte få. Første takk går til Vegard Nilsen, vår hovedveileder, som har vært til stor hjelp med presise tilbakemeldinger, gode diskusjoner og hyggelige samtaler. Videre rettes takk til vår biveileder Nils-Otto Kitterød som har tilføyd verdifull innsikt og engasjement gjennom prosessen. For hjelp til gjennomføring av bokspermeameter testen vil vi takke Helen French. En takk også til Knut Magne Møen v/NVE for tilsending av data. Til slutt vil rette en stor takk til Thomas Skaugen, vår andre biveileder og DDD-modellens skaper. Oppsettet av modellen, forståelse av resultatene og interesse for oppgaven er blant bidragene fra Thomas.

Dette ble en annerledes og spesiell tid å skrive master på. Samarbeidet gikk fra daglige møter på skolen, til hjemmekontor og kommunikasjon over internett. Tross omstendighetene er vi veldig fornøyd med utførelsen av oppgaven. Vi vil rette en stor takk til ektefelle/kjæreste, familie og venner for all støtte og oppmuntring underveis. En spesiell takk går til Anes mamma og Jon Siverts pappa for korrekturlesing.

Ås, Juni, 2020

Ane Viker-Walsøe og Jon Sivert Valle

Sammendrag

Dagens VA-infrastruktur er ikke dimensjonert for å takle framtidens intense nedbørhendelser. Kombinert med fortetting av byer, vil dette by på utfordringer knyttet til håndtering av overvann. En av løsningene på utfordringen er å benytte grønne tak, som har til hovedfunksjon å fordrøye overflateavrenning. Målet med oppgaven er å undersøke den hydrologiske effekten av to grønne tak med magasinerende sjikt, og modellere avrenningen fra takene ved bruk av Distance Distribution Dynamics (DDD-modellen). Studiet begrenser seg til måneder hvor temperaturen er høyere enn 0 °C.

Takenes oppbygging består av et 150 mm tykt lag bestående av LECA[®] lettklinker, og en 40 mm tykk sedummatte. I gjennomsnitt holder de grønne takene tilbake 29.5 % av årsnedbøren, og størst tilbakeholdelse observeres i sommermånedene juni, juli og august. Flomtoppene reduseres for alle typer nedbørhendelser, med en medianverdi på 95 %. Takene har størst dempende effekt når nedbørhendelsen er kort og intens.

DDD-modellen er brukt med en tidsoppløsning på ett minutt. Input er temperatur og nedbør. To ulike avstandsfordelinger er konstruert basert på takets bunntopografi. For hvert tak er kalibreringen basert på to utvalgte nedbørhendelser i 2019, og to ulike avstandsfordelinger. Modellen simulerer avrenning bra ved at den treffer godt på avrenningstopp og resesjonskurve. Usikkerhetspunkter er knyttet til mulig overestimering av evapotranspirasjon og underestimering av magasinkapasitet. Beste gjennomsnittlige valideringsresultat oppnådde en Kling-Gupta Efficiency (KGE) på 0.82 og Nash-Sutcliffe Efficiency på 0.83.

Summary

The urban storm water system is not designed to handle the intense rainfall events that are expected in the future due to climate changes. Combined with increased urbanization, challenges will arise due to excess runoff. One mitigating measure may be green roofs, where the main function is to delay surface runoff. This thesis aims to investigate the hydrological effect of green roofs with storage capabilities, and to model the runoff from the use of the Distance Distribution Dynamics (DDD) model. The study is limited to temperatures above 0°C.

The roof structure consists of a 150 mm thick layer of LECA[®] lightweight aggregate, and a 40 mm thick sedum mat. On average, the green roofs retain 29.5% of the annual rainfall, and the highest retention is observed during the summer months (June, July and August). The peak runoff is reduced for all types of rainfall events, with a median value of 95 %. The roofs perform particularly well for short and intense rainfall events.

The DDD model is used with a temporal resolution of one minute. Input is temperature and rainfall. Two distance distributions were constructed based on the roof topography. For each roof the calibration is based on two selected rainfall events in 2019, plus two distance distributions. The model simulates runoff well by accurately estimating peak runoff and recession curves. Uncertainties are related to possible overestimation of evapotranspiration and underestimation of storage capacity. The best validation result achieved an average Kling-Gupta Efficiency (KGE) value of 0.82, and Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) value of 0.83.

Innhold

Forord	iii
Sammendrag	v
Summary	vii
Innhold	ix
Figurer	xiv
Tabeller	xv
Forkortelser	xvii
1 Introduksjon	1
1.1 Innledning og problemstilling	1
1.2 Struktur og avgrensning	2
2 Bakgrunn	3
2.1 Motivasjon	3
2.2 Urbanhydrologi og overvann	3
2.2.1 Hydrologiske prosesser	4
2.2.2 Overvann og overvannshåndtering	6
2.3 Grunnleggende om grønne tak	6
2.3.1 Oppbygging	7
2.3.2 Begreper	7
2.3.3 Hydrologiske prosesser for grønne tak	8
2.4 Hydrologiske modeller	10
2.4.1 Kalibrering og validering	11
2.5 Tidligere studier	12
2.5.1 Takene ved planteskolen	12
2.5.2 Grønne tak	13
2.5.3 Modellering	15
3 Metode	17
3.1 Takene ved planteskolen	17
3.1.1 Grønne tak og svart referansetak	18

3.1.2	Måleutstyr	19
3.2	R-studio	20
3.2.1	Data og kvalitetskontroll	20
3.3	Bokspermeametertest	22
3.3.1	Darcy's lov	22
3.3.2	Forsøket	23
3.4	DDD-modellen	25
3.4.1	Bakgrunn	25
3.4.2	Innføring	25
3.4.3	Hydrologisk modul	26
3.4.4	Avrenningsmodul	28
3.4.5	Input	31
3.4.6	Kalibrering	33
4	Resultater	35
4.1	Analyse av takenes hydrologiske effekt	36
4.1.1	Tilbakeholdelse	36
4.1.2	Fordrøyning	38
4.2	Bokspermeametertesten	40
4.3	DDD-modellen	41
4.3.1	Avstandsfordeling	41
4.3.2	Kalibrering	42
4.3.3	Validering	45
4.3.4	Beregning av evapotranspirasjon	49
5	Diskusjon	51
5.1	Takenes hydrologiske effekt	51
5.1.1	Usikkerheter rundt målingene	51
5.1.2	Takene ved planteskolen	52
5.1.3	Sammenligning av resultater med andre studier	54
5.2	Bokspermeametertesten	55
5.3	DDD-modellen	56
5.3.1	Kalibrering	56
5.3.2	Avstandsfordelingene	57
5.3.3	Evapotranspirasjon	60
5.3.4	Modellhastigheter og mettet hydraulisk konduktivitet	62
6	Konklusjon	63
6.1	Videre arbeid	64

Referanser	65
Vedlegg A Inputparametere til DDD-modellen	71
Vedlegg B Avstandsfordelinger	73
Vedlegg C Månedlig nedbør og avrenning	75

Figurer

2.1	Hydrologiske prosesser for de grønne takene ved planteskolen.	9
3.1	Bilde av takene tatt skrått ovenfra fra nordøst. Fra venstre: tak 1, tak 2 og tak 3.	17
3.2	Lagene til de grønne takene	18
3.3	Tak 1 med eksakte mål.	18
3.4	Illustrasjon av helningene i taket (ytte mål på taket)	19
3.5	Kumulativt plot før kvalitetskontroll	21
3.6	Illustrasjon av hvor prøvene er tatt på tak 1 og tak 3. Foto: S. Nyborg . .	23
3.7	Oppsett for bokspermeameterertest	24
3.8	Illustrasjon av den hydrologiske modulen til DDD-modellen. Feltekapasiteten M er konstant, mens D , S og Z er funksjoner av tid.	26
3.9	Illustrasjon av hvert metningslag med tilhørende enhetshydrogram definert av resesjonskarakterestikk λ_i og antall tidssteg j	29
3.10	Vannets strømningsveier for Af1 (ytte mål på taket)	32
3.11	Vannets strømningsveier for Af2 (ytte mål på taket)	32
3.12	Illustrasjon av Af1	33
3.13	Illustrasjon av Af2	33
3.14	Skjematisk framstilling for kalibrering- og valideringsprosessen	34
4.1	Kumulativt plot for hele 2019	36
4.2	Kumulativt plot for varme måneder	37
4.3	Nedbør (blå) og avrenning fra tak 1 (rød), tak 2 (sort) og tak 3 (grønn) for de ulike hendelsene	39
4.4	Snøsmelting i mars 2019	40
4.5	Empirisk kumulativ fordeling (ECDF) av Af1	41
4.6	ECDF av Af2	42
4.7	Observert (grå) og simulert avrenning fra Af1 (rød) og af2 (blå), samt tilgjengelig lagringskapasitet for Af1 (mørkerød) og af2 (mørkeblå) på tak 1	43
4.8	Observert (grå) og simulert avrenning fra Af1 (rød) og af2 (blå), samt tilgjengelig lagringskapasitet for Af1 (mørkerød) og af2 (mørkeblå) på tak 3	43

4.9	Metningslag med tilhørende hastighet.	44
4.10	Estimert magasinkapasitet for begge tak og avstandsfordelinger	44
4.11	Observert (grå) og simulert avrenning fra Af1 (rød) og af2 (blå), samt tilgjengelig lagring for Af1 (mørkerød) og af2 (mørkeblå) for valideringshendelsene. Med parametere fra sep-kalibreringen på tak 1	45
4.12	Observert (grå) og simulert avrenning fra Af1 (rød) og af2 (blå), samt tilgjengelig lagring for Af1 (mørkerød) og af2 (mørkeblå) for valideringshendelsene. Med parametere fra juni-kalibreringen på tak 1	46
4.13	Observert (grå) og simulert avrenning fra Af1 (rød) og af2 (blå), samt tilgjengelig lagring for Af1 (mørkerød) og af2 (mørkeblå) for valideringshendelsene. Med parametere fra sep-kalibreringen på tak 3	47
4.14	Observert (grå) og simulert avrenning fra Af1 (rød) og af2 (blå), samt tilgjengelig lagring for Af1 (mørkerød) og af2 (mørkeblå) for valideringshendelsene. Med parametere fra juni-kalibreringen på tak 3	48
5.1	Vektsvingninger på tørt tak, tak 1	60
5.2	Vektsvingninger på tørt tak, tak 3	60
5.3	Vektendring, hendelse juni	61
5.4	Vektendring, hendelse sep	61

Tabeller

3.1	Hendelser som benyttes til kalibrering og validering	33
4.1	Sesongvis tilbakeholdelse for 2019	37
4.2	Nedbørkarakteristikker for ulike hendelser	38
4.3	Avrenning fra de grønne takene sammenlignet med det sorte taket	38
4.4	Resultater fra bokspereameter testen	40
4.5	Parameterne fra avstandsfordelingene	41
4.6	Resultater for kalibrering med avstandsfordeling 1	42
4.7	Resultater for kalibrering med avstandsfordeling 2	43
4.8	Validering for tak 1, sep-hendelsen	45
4.9	Validering for tak 1, juni-hendelsen	46
4.10	Validering for tak 3, sep-hendelsen	47
4.11	Validering for tak 3, juni-hendelsen	48
4.12	Evapotranspirasjon fra tak 1	49
4.13	Evapotranspirasjon fra tak 3	49
5.1	Oversikt over optimaliseringsintervallene med tilhørende hastighetsintervall gitt av ligning 3.14.	56
5.2	Mettet hydraulisk konduktivitet og modellerte hastigheter	62
A.1	Avstandsfordeling 1	71
A.2	Avstandsfordeling 2	72
B.1	Beskrivelse av alle vurderte avstandsfordelinger	73
C.1	Registrert nedbør og avrenning for hver måned	75

Forkortelser

DDD	Distance Distribution Dynamics
ET	Evapotranspirasjon
HBV	Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning
IVF	Intensitet-varighet-frekvens
KGE	Kling-Gupta efficiency
LandSam	Fakultet for landskap og samfunn
NMBU	Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
NSE	Nash-Sutcliffe Efficiency coefficient
NVE	Norges vassdrags- og energidirektorat
RealTek	Fakultet for realfag og teknologi
SWMM	Storm Water Management Model
VA	Vann og avløp

1. Introduksjon

1.1 Innledning og problemstilling

Den tradisjonelle overvannshåndteringen har handlet om å lede vannet vekk fra overflaten og inn i lukkede rørsystemer så fort som mulig (Lindholm mfl., 2008). Dette har ført til at dagens VA-infrastruktur ikke er dimensjonert for å takle de hyppigere og mer intense regnhendelsene som er forventet i framtiden (NOU2010:10, 2010). På grunn av en høy andel impermeable flater vil spesielt urbane områder være sensitive for intense regnhendelser. Flere befolkningstette kommuner som blant annet Oslo, Bergen og Bærum har derfor implementert lokal overvannshåndtering som et ledd i sine handlingsplaner eller strategier.

I dag er fokuset skiftet fra bortledning av overvann, til å benytte det som en ressurs. I tillegg til å forebygge skader på infrastruktur og bygninger ved å dempe flomtoppene, kan blågrønne og blågrå løsninger bidra til økt naturmangfold og estetikk. Ett av tiltakene som kan benyttes for å redusere overflateavrenning i urbane områder er grønne tak. Funksjonen til grønne tak er hovedsakelig å forsinke nedbøren ned fra taket til gateplan ved korte, intense regnhendelser. På lang sikt og ved små regnhendelser, bidrar også grønne tak til mindre totalavrenning ved at en del av vannet fordamper via evapotranspirasjon (Bengtsson mfl., 2005).

Våren 2018 ble det avlagt en masteroppgave av Trommald og Øyre (2018) som omhandlet etablering av en forskningsinfrastruktur med tre tak på Ås. To av takene er grønne tak med magasinerende sjikt i finknust LECA, en type oppbygging som til nå ikke har vært mye utprøvd. Det siste taket er et ordinært teknet tak (svart tak). For å kunne dimensjonere tak med magasinerende sjikt er det viktig å kunne modellere avrenning fra takene, og beregne effekten av slike tak. Samme høst som takene ble etablert, forsøkte Fordal (2018) å modellere avrenning fra takene ved bruk av EPA's Storm Water Management Model (SWMM) sin modul for grønn infrastruktur¹. Modellen klarte ikke predikere avrenningen på en tilfredsstillende måte. Noe av årsaken ser ut til å være

¹<https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>

at modellen krever input av parametre som er vanskelig å bestemme basert på takets utførelse, og derfor må de kalibreres.

Målet med denne oppgaven er todelt. I første del analyseres den hydrologiske effekten av de grønne takene ved bruk av registrerte data fram til januar 2020. I andre del benyttes Distance Distribution Dynamics (DDD-modellen) for å simulere avrenningen fra de grønne takene. Det er en nylig utviklet modell, som først ble beskrevet av Skaugen og Onof (2014). Modellen er opprinnelig utviklet for å benyttes på store, naturlige nedbørfelt, men i denne oppgaven anvendes en videreutviklet versjon av modellen kalt DDDUrban (Skaugen, 2020). To av leddene som må beregnes for å simulere avrenning, er evapotranspirasjon og magasinkapasitet. For store felt er dette to parametre som vanskelig kan måles, og derfor er det knyttet en usikkerhet til hvor godt modellen beregner disse. Ved hjelp av målte data og DDD-modellen, ønsker vi å beskrive sammenhengen mellom nedbør og avrenning for grønne tak med magasinerende sjikt, spesielt med tanke på intense nedbørhendelser. I etterkant ønskes følgende spørsmål besvart:

- Basert på målte data: Hvordan dempes flomtopper ved enkelthendelser, og hvordan tilbakeholdes årsnedbør for grønne tak med magasinerende sjikt?
- Hvor godt reproducerer DDD-modellen med en tidsopløsning på ett minutt, avrenning fra grønne tak ved enkelthendelser?
 - Hvor godt estimerer den evapotranspirasjon?
- Kan strømningshastighetene som simuleres i DDD-modellen, bestemmes for grønne tak basert på takets design uten å måtte kalibreres mot nedbør og avrenningsmålinger?
 - Er det i så fall åpenbare forbedringspunkter ved takdesignet?

1.2 Struktur og avgrensning

Oppgaven er bygd på IMRAD-struktur, og inneholder i tillegg et eget bakgrunnskapittel for gjennomgang av grunnleggende teori. Hovedelementene i oppgaven faller under urbanhydrologi og overvannstiltak, samt grunnleggende databehandling og modellering. I modelleringsdelen er oppgaven begrenset til å ta for seg enkelthendelser i snøfrie måneder, da det er dette som er av størst interesse med tanke på overvannsproblematikk knyttet til intense nedbørhendelser.

2. Bakgrunn

I dette kapitlet presenteres motivasjonen for valg av oppgave, samt en sammenfatning av grunnleggende teori. Til slutt blir det gitt en gjennomgang av tidligere relevante studier. Teorien og begrepene som presenteres i dette kapitlet, er viktige verktøy for å forstå resultater og analyser senere i oppgaven.

2.1 Motivasjon

Fra 2008-2014 foregikk det et samarbeidsprogram kalt “Framtidens byer“, hvor hovedmålet var å finne tiltak som kan bidra til reduserte klimagassutslipp i Norges 13 største byer (Framtidens byer, 2016). Ett av tiltakene som blir presentert i rapporten er fortetting av byer. Til tross for positiv innvirkning på redusert klimagassutslipp, vil fortetting av byene føre til flere impermeable flater og mer overflateavrenning. I urbaniserte områder kan takflater telle så mye som 40-50 % av alle impermeable overflater (Stovin mfl., 2012). Per 2014 var det 14 kvadratkilometer med flate tak (helning på mindre enn tretti grader) i Oslo (Oslo kommune, 2018). Av dette arealet regner Oslo kommune med at ca. 35 % kan benyttes til å anlegge grønn infrastruktur. Disse beregningene tar ikke hensyn til de ulike bygningers bærekonstruksjon og andre restriksjoner, men sier litt om hvilket potensiale man har til rådighet.

Behovet for mer kunnskap knyttet til overvannshåndtering er stort. I NOU2015:16 (2015) presenteres en kommuneundersøkelse knyttet til overvannsutfordringer, og nær 60 % svarer at kapasiteten til kommunens overvannssystemer ikke vil takle framtidens nedbørhendelser. I tillegg til begrensede budsjetter og mangel på krav og hjemler, svarer 40 % at mangelen på urbanhydrologisk kunnskap gjør det vanskelig for kommunen å drive strategisk planlegging av overvannshåndtering.

2.2 Urbanhydrologi og overvann

Vannets kretsløp handler om sirkulasjon av vannet mellom havområdene, atmosfæren og jordflaten. Sirkulasjonen foregår gjennom fordampning, nedbør, avrenning og ny for-

damping i en evig runddans, og drivkraften er sola (NGU, 2019). Hydrologien befatter seg med det som skjer på jordflaten (Bøyum mfl., 1997), og urbanhydrologi defineres som den delen av vannets kretsløp som er knyttet til utbygde områder (NVE, 2020). I hydrologien er vannbalanseligningen en sentral prosess, som i sin enkleste form beskriver at vann som renner inn i et gitt område, må renne ut, fordampes eller lagres i samme område (Hendriks, 2010). Vannbalanseligningen for et gitt felt kan dermed defineres på følgende vis:

$$P = R + E + \frac{dS}{dt}, \quad (2.1)$$

hvor

P	:	nedbør [L/T]
R	:	avrenning [L/T]
E	:	evapotranspirasjon [L/T]
dS/dt	:	endring i vannmagasin [L] per enhet tid [T]

2.2.1 Hydrologiske prosesser

Et nedbørfelt er definert som et område der all nedbør som treffer det, renner ut i samme punkt. Ved utbygging av urbane områder vil andelen tette flater øke, og de naturlige prosessene i vannets kretsløp påvirkes. Effektene av dette blir blant annet lavere infiltrasjonskapasitet, redusert evapotranspirasjon og tilsvarende mer overflateavrenning (Bøyum mfl., 1997). I de neste avsnittene vil det bli gitt en generell gjennomgang av de ulike hydrologiske prosessene i vannbalansen.

Nedbør og klimaendringer

Hvilken type nedbør som fører til flom, bestemmes i stor grad av nedbørfeltets karakteristikk. Store, naturlige nedbørfelt blir mest påvirket av langvarig nedbør. I urbane områder er det derimot den kortvarige, intense nedbøren som skaper størst utfordringer. Dimensjonerende nedbør bestemmes av stedege IVF-kurver ¹. IVF-kurven gir informasjon om hvilken frekvens (F) man kan forvente en nedbørintensitet (I) for ulike varigheter (V) et gitt sted, og baserer seg på historiske målinger. Den forteller altså hvilken nedbørintensitet av en gitt varighet man kan forvente overskrides én gang i løpet av en tidsperiode, for eksempel 100-årsregn (Hanssen-Bauer mfl., 2015).

Framtidens nedbørhendelser vil i større grad preges av korte, intense nedbørhendelser (Hanssen-Bauer mfl., 2015). Hvor ofte nedbøren kommer, og hvor intens den blir, er fortsatt veldig usikkert. Dermed er det vanskelig å forutsi dimensjonerende verdier for

¹<https://www.klimaservicesenter.no/faces/mobile/idf.xhtml>

framtidens nedbør, og man står i fare for underdimensjonering dersom man kun baserer beregninger på dagens IVF-kurver. Derfor er det innført en klimafaktor som påslag for dagens dimensjonerende avrenningsmengde, men også rundt denne faktoren er det knyttet mye usikkerhet (Hanssen-Bauer mfl., 2015). Klimafaktoren blir beregnet på grunnlag av nedskalering av globale klimamodeller, og i en rapport utarbeidet av Dyrredal og Førland (2019) ble det vist at størst klimafaktor må påregnes for nedbørhendelser med kort varighet og høy returperiode. Det er disse verdiene som anbefales brukt i dimensjonering av sårbar infrastruktur som skal anlegges med lang levetid (f.eks jernbane og VA-infrastruktur).

Infiltrasjon og evapotranspirasjon

Prosessen hvor vann trenger gjennom jordoverflaten kalles infiltrasjon, og grunnens infiltrasjonsevne avhenger blant annet av jordtype, metningsgrad og porøsitet. Videre transport av vannet til underliggende jordlag kalles perkolasjon. Infiltrasjon forekommer i den umettede sonen, og er en dynamisk prosess. Det vil si at etterhvert som jorda mettes ved en regnhendelse, avtar infiltrasjonsraten. Når alle porene er fylt med vann oppnås konstant infiltrasjonshastighet. Øvre grense for infiltrasjonshastighet bestemmes av mettet hydraulisk konduktivitet. Evapotranspirasjon består av fordamping fra fysiske overflater og transpirasjon fra vegetasjon, og drives av solforhold, temperatur og vind. Transpirasjonsprosessen skjer ved at levende vegetasjon tar opp vann i rotsonen, og deretter transporterer det til bladenes overflate, hvor vannet fordampes. I urbane områder er bidraget fra evapotranspirasjon mindre enn for naturlige felt, og en konsekvens av dette blir at avrenningen står for en større del.

Avrenning og lagret vannmengde

Avrenning er den mengden av nedbør som renner til elver og bekker i et nedbørfelt, og flomtoppen er den maksimale avrenningen som forekommer under en hendelse. Enkelt sagt kan avrenning deles inn i grunnvannsavrenning og overflateavrenning (Norsk Vann, 2013). Hvilken type avrenning som oppstår, bestemmes i stor grad av grunnen og initialtilstanden i den. Ved større andel impermeable flater vil mer av vannet renne av på overflaten, og mindre i grunnen. I små, urbane områder kan et estimat av overflateavrenningen beregnes manuelt ved den rasjonale formel (Stenius mfl., 2015). Den baserer seg på en konstant intensitet for nedbørhendelsen, og en direkte sammenheng mellom nedbør og avrenning. I tillegg bestemmes en avrenningskoeffisient for hele feltet. Disse tre aspektene fører til at metoden bare gir et grovt overslag over avrenningen. Virkeligheten er mer kompleks, og for beregning av overflateavrenning og urbane flommer benyttes programvarer spesielt designet for dette formål. Sammenlignet med overflateavrenning, er grunnvannsavrenning en veldig saktegående prosess. Vannet som treffer overflaten vil

via infiltrasjon og perkolasjon bli transportert til mark- og grunnvannssonen, og derfra bli transportert til elver og bekker.

Et vannmagasin kan enten fylles opp og bidra til mindre avrenning, eller tømmes og bidra til økt avrenning. I naturlige felt kan slike vannmagasin forekomme blant annet i grunnen, som innsjøer og som akkumulert snø. I urbane felt blir de naturlige vannmagasinene sterkt redusert eller fjernet, og dette bidrar til at flomtoppene blir større (Bøyum mfl., 1997). Som en del av overvannshåndteringen benyttes derfor kunstige vannmagasin for å fordrøye vannmengder.

2.2.2 Overvann og overvannshåndtering

Overvann defineres som overflateavrenning som følge av nedbør og smeltevann, og årlige kostnader knyttet til overvannshendelser er estimert til å være 1.6-3.6 milliarder NOK (NOU2015:16, 2015). Store mengder overvann i fellesavløpssystemer bidrar til økte kostnader for rensesanlegg, og i verste fall utslipp av urensset avløpsvann til vassdrag og andre resipienter. Forurenset overvann blir i mindre grad tilbakeholdt ved tradisjonelle lukkede rørsystemer enn for naturlige felt (Paus, 2018). De siste årene har det vært et stadig økende fokus på lokal håndtering av overvann (LOD-tiltak), og tiltakene bør følge treleddsstrategien. De ulike leddene i strategien defineres av Paus (2018) på følgende måte:

1. Små regnhendelser skal fanges opp, infiltreres og renses.
2. Store regnhendelser skal forsinkes og fordrøyes.
3. Trygge flomveier må sikres for ekstreme regnhendelser.

Formålet til det første leddet er blant annet å forsøke å opprettholde den naturlige vannbalansen i et lokalt system, mens ledd 2 og 3 handler mer om å begrense overvannsskader som følge av kraftige regnhendelser. Som vi skal se nærmere på i delkapittel 2.3 og 2.5 omfatter både ledd 1 og ledd 2 i så måte grønne tak. Sett over lange tidsperioder (f.eks et år) og små regnhendelser, bidrar grønne tak til opprettholdelse av den naturlige vannbalansen ved å øke andelen evapotranspirasjon (ledd 1). For større regnhendelser kan grønne tak forsinke avrenningen, og på denne måten bidra til utflating av flomtappen (ledd 2).

2.3 Grunnleggende om grønne tak

Grønne tak kan deles inn i tre ulike hovedkategorier. Disse er intensive, semi-intensive og ekstensive grønne tak. Hvilken kategori et tak hører til bestemmes av takets oppbygging, vekt og formål. I en prosjektrapport utarbeidet av Noreng mfl. (2012) ble det påpekt at det er vanskelig å bestemme entydig hvilken kategori et bestemt tak tilhører.

Den enkleste måten å dele takene inn på er ved å benytte substratets tykkelse som referanse, der de ekstensive har minst substrattykkelse og de intensive har størst. Av denne informasjonen blir en rekke andre bestemmelser gitt, slik som vanningsbehov, vekt og mulighet for ferdsel (Bengtsson mfl., 2005). Ekstensive grønne tak kan i de fleste tilfeller erstatte sorte tak på eksisterende bygg uten ekstra tiltak på bærekonstruksjonen, mens intensive tak er mye tyngre og konstruksjonen må som regel forsterkes dersom det skal erstatte eksisterende tak (Noreng mfl., 2012). Det må i alle tilfeller foretas en vurdering av takets tilstand og forventet levealder før ombygging (Elvebakk mfl., 2018). Både på nybygg og eksisterende bygg er ekstensive grønne tak mest benyttet (Hanslin og Johannessen, 2018).

2.3.1 Oppbygging

Oppbygging av ekstensive tak vil være avhengig av fall på taket. I en rapport utarbeidet av Elvebakk mfl. (2018) pekes det på at underliggende oppbygging av et grønt tak burde være kompakt². Både flate (< 5°) og skrå (5-30°) kompakte tak har som regel samme prinsipielle oppbygging (Noreng mfl., 2008). I tillegg til den grunnleggende oppbyggingen må ofte grønne, kompakte tak anlegges med et ekstra lag som har til hensikt å hindre gjennomtrenging av røtter (Noreng mfl., 2012). Topplagene vil variere ut i fra fall, men felles for både flate og skrå tak er at de to øverste lagene består av vegetasjonsdekke og vekstmedium (substrat). Begge typer tak anlegges også ofte med en filtmatte som skal holde på fuktigheten (Braskerud, 2014). Til tross for at denne filtmatte ikke er veldig tykk, vil den bidra til at takets evne til å holde på vann øker. For å unngå stående vann på taket må flate tak anlegges med et dreneringslag for transport av akkumulert vannmengde.

På grunn av det relativt tynne substratlaget som benyttes på ekstensive tak, er det nødvendig med arter som tåler lange tørkeperioder, samtidig som de tåler å bli druknet for en liten stund. Det finnes flere ulike planter som kan fungere på ekstensive tak, og det er viktig å velge planter som trives under de lokale forholdene (Noreng mfl., 2012; Miljødirektoratet, 2016). Oftest blir ulike typer sedum (bergknappar) benyttet i Norge, men også enkelte typer moser og gress kan benyttes.

2.3.2 Begreper

I delkapittel 2.5 blir det gjennomgått en del studier som ser på tilbakeholdelsen (*eng: retention*) fra grønne tak. I litteraturen omtales tilbakeholdelsen både som millimeter tilbakeholdt nedbør, og som prosentvis tilbakeholdt nedbør. Tilbakeholdelsen er en sum av alle prosesser som ikke gir avrenning, og forstås som vist i likning 2.2. Det er altså

²Kompakte tak er tak uten lufting mellom isolasjon og takteknig

den totale andelen av nedbør som ikke renner av fra taket i løpet av en gitt tidsperiode. Tilbakeholdelsen blir i denne oppgaven sett på som den langvarige effekten av grønne tak, og studeres ikke for enkelthendelser.

$$TH = \left(1 - \frac{R}{P}\right) * 100\% \quad (2.2)$$

hvor

- TH : tilbakeholdelse [%]
- R : avrenning [L]
- P : nedbør [L]

Begrepet fordrøyning (*eng: detention*) benyttes både om forsinket avrenning, og prosentvis reduksjon av flomtopp (ligning 2.3). Forsinkelse på avrenningen kan forstås både som forsinket flomtopp og forsinket avrenningsstart, og beregnes ved $\Delta t = t_g - t_r$. Her referer t_g og t_r til avrenningstidspunkt for henholdsvis grønt tak og referansetak, og Δt er tidsdifferansen mellom inntruffet avrenning for takene.

$$Red = \left(1 - \frac{Q_{maks,g}}{Q_{maks,r}}\right) * 100\% \quad (2.3)$$

hvor

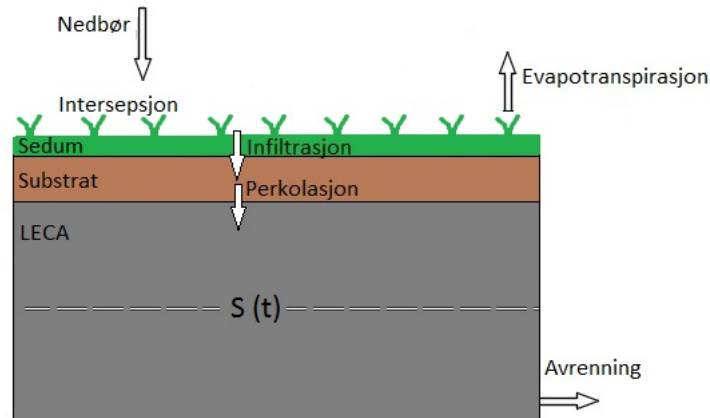
- Red : reduksjon av flomtopp [%]
- $Q_{maks,g}$: maks avrenning fra grønt tak [L³/T]
- $Q_{maks,r}$: maks avrenning fra referansetak [L³/T]

Ved bruk av ekstensive grønne tak treffer man også på uttrykk som singel- og multilag. Singellag vil si at ett medium skal fungere som dreneringslag, vekstmedium og filtreringslag. Ved bruk av multilag er vekstmediet og dreneringslaget skilt ved et filter, og det er denne typen som er mest vanlig å benytte (Nophadrain, 2010).

2.3.3 Hydrologiske prosesser for grønne tak

Målet med å benytte grønne tak er å redusere (tilbakeholde) og fordrøye avrenning, og det er viktig å forstå hvordan de hydrologiske prosessene arter seg for slike tak. Den nedbøren som treffer taket vil enten tilbakeholdes via evapotranspirasjon (forsvinne fra taket), eller infiltrere. En del av nedbøren vil fanges opp av vegetasjonen, og fordampe før det rekker å bidra til infiltrasjon. Denne prosessen kalles intersepsjon.

Hvert av takene ved planteskolen kan sees på som et veldig lite nedbørfelt, og beskrivelsen av vannbalansen må være konsistent for hvert enkelt tak. En forenklet skisse over de hydrologiske prosessene som foregår på de grønne takene er vist i figur 2.1.



Figur 2.1: Hydrologiske prosesser for de grønne takene ved planteskolen. Modifisert fra (Leimgruber mfl., 2018)

På månedlig og årlig basis kan man tenke seg at dS/dt i vannbalanseligningen går mot 0, og at all nedbør som treffer taket enten renner av eller fordamper. Når tilbakeholdelsen er definert som alt vann som ikke renner av fra takene, vil altså evapotranspirasjon være det viktigste bidraget for å øke tilbakeholdelsen. For enkelthendelser er det viktigere å fordrøye (*midlertidig* holde tilbake) vannmengdene, og avrenningen for et hvert tidspunkt styres av dS/dt . For vannmengder opp til feltkapasitet, er det kapillarkrefter som styrer størrelsen på S . Etter hvert som taket fylles opp over feltkapasitet, bestemmes størrelsen på S av porevolumet.

For tradisjonelle ekstensive tak vil filtmaten under substratet kunne holde på en del vann på grunn av kapillarkrefter. Ved å anlegge et LECA-lag under filtmaten, kan man øke tilbakeholdelsen. En type filt som ble benyttet av Braskerud (2014) var 10 mm tykk, og ble oppgitt å kunne holde på 8 mm vann. Et studie av Berretta mfl. (2014) viser at feltkapasiteten til LECA er 35 %. Det vil si at evnen materialet har til å holde på vann etter at tyngdekraften har drenert ut det den klarer, begrenser seg til 35% av det totale porevolumet. I følge Trommald og Øyre (2018) er det 7.9 m³ med LECA på hvert av de grønne takene, og porevolumet satt til 50%. Dersom feltkapasiteten er på 35%, blir potensiell tilbakeholdelse i LECA-laget 30,3 mm for hvert tak før porevolumet mettes. Dette betyr at potensialet taket har til å fylles opp med vann før avrenning starter, blir mye større for et tak med denne type vannlagringskapasitet enn for et tradisjonelt ekstensivt tak.

Denne midlertidige tilbakeholdelsen avhenger sterkt av initialtilstand på taket, og tiden som går mellom regnhendelser. Når den tilførte vannmengden overskrider feltkapasiteten, vil porevolumet fylles opp, og avrenningen starte. I figur 2.1 er vannlagringen i LECA-laget representert som en funksjon av tiden. Det vil si at vannspeilet vil bevege seg ettersom tiden går, og den tilførte vannmengden øker eller minker. Dersom

infiltrasjonen tilfører mer vann enn hva som renner av, vil vannspeilet stige.

Den viktigste egenskapen til dette laget er nettopp denne typen fordrøyende effekt. Vannet vil først infiltrere, og det som driver vannet gjennom overflaten er gravitasjon, og forskjeller i jordas sugeevne (ψ) ved ulikt vanninnhold (θ). For at vannet skal ha mulighet til å infiltrere, er det avhengig av videre transport etter gjennomtrenging av overflaten. Infiltrasjonsraten kan derfor defineres som perkolasjonsraten nær overflaten, som er gitt av Darcy's lov for umettet strømming (Darcy, 1856):

$$q_0 = -K(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2.4)$$

hvor

- q_0 : perkolasjonsrate [L/T]
- K : hydraulisk konduktivitet [L/T]
- θ : vanninnhold [-]
- h : vannets energihøyde [L]
- z : vertikal avstand fra en gitt referanselinje, positiv oppover [L]

Når vannet har trengt gjennom overflaten vil jordprofilen mettes opp fra bunnen (Noreng mfl., 2012). Vannet vil altså ved umettede forhold strømme vertikalt mot bunnen av taket fram til det når mettede forhold. Ved mettede forhold vil transporten av vannet skje horisontalt, og den videre transporthastigheten bestemmes av LECA-lagets mettede hydrauliske konduktivitet (K_s). Hamouz mfl. (2018) fant at mettet hydraulisk konduktivitet for LECA lettklinker (0-4mm), var $3.98 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$.

2.4 Hydrologiske modeller

For å få et innblikk i hvordan DDD-modellen skiller seg ut fra andre modeller, må det dykkes litt i hydrologien for å se på hvilke nedbør-avløpsmodeller som finnes. Målet med enhver nedbør-avløpsmodell er å beskrive hvilken avrenning (output) man får ved en gitt nedbørhendelse (input) for ulike felt. Romlig variasjon kan være distribuert eller "lumped" (Chin, 2013). For distribuerte modeller tar man hensyn til romlig variasjon i feltet, som vil si at parameterne varierer mellom ulike steder i feltet. For modeller som er "lumped", betraktes feltet som ett hydrologisk element, og hver parameter gjelder for hele feltet. En slik romlig beskrivelse baserer seg ofte på et gjennomsnitt for hver parameter. En grov oppdeling av hydrologiske modeller er fysikalske, begrepsmessige, og "black box" modeller. Fysikalske modeller forsøker å beskrive de hydrologiske prosessene ved hjelp av fysiske lover (f.eks Darcys lov). Slike modeller inneholder ofte mange parametere som må kalibreres (Kirchner, 2006). "Black box" modeller er en matematisk tilnærming, og antar lineære hydrologiske systemer (f.eks enhetshydrogrammet). Disse

modellene tar ikke hensyn til de underliggende fysiske prosesser, men baserer seg på empiriske sammenhenger mellom hydrologi og meteorologi for hvert enkelt felt (Dooge, 1973; NVE, 1978). Begrepsmessige modeller er en slags mellomting av de to ovennevnte. Slike modeller bygger på kunnskap man har om hydrologiske prosesser i ulike felt, og forsøker å framstille disse på en forenklet matematisk måte. Den mest benyttede modellen i Norge for naturlige felt, Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning modell (HBV-modellen), er en begrepsmessig modell. Uansett hvilken hydrologisk modell man benytter, må man være oppmerksom på at grunnvannsstrømningen er veldig kompleks, og en modell vil derfor bare gi en forenklet beskrivelse av virkeligheten (Zhou og Li, 2011).

2.4.1 Kalibrering og validering

Alle hydrologiske modeller må kalibreres for å tilpasse parameterne, slik at den modellerte avrenningen stemmer best mulig med den observerte avrenningen. Denne prosessen er også kjent som parametertilpasning. Resultatet av modelltilpasningen blir en fitness-verdi, som enkelt sagt beskriver avviket mellom målte og observerte verdier med ett tall. I DDD-modellen er det to ulike metoder som benyttes for å finne dette avviket, nemlig Nash-Sutcliffe Efficiency (Nash og Sutcliffe, 1970), og Kling-Gupta Efficiency (Gupta mfl., 2009).

I følge Knoben mfl. (2019) er Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) tradisjonelt den mest brukte metoden for å beregne hvor godt modellen beregner avrenning, og er gitt på følgende vis:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{t=T} (Q_{m,t} - Q_{o,t})^2}{\sum_{t=1}^{t=T} (Q_{o,t} - \overline{Q_o})^2} \quad (2.5)$$

hvor

$Q_{m,t}$: modellert avrenning ved tiden t [L^3/T]

$Q_{o,t}$: observert avrenning ved tiden t [L^3/T]

$\overline{Q_o}$: gjennomsnitt av observerte avrenningsverdier [L^3/T]

NSE-verdien beskriver hvor mye av variansen som kan forklares av modellens midlere kvadratavvik (Beldring mfl., 2002), og kan variere mellom $-\infty$ og 1. Dersom den modellerte avrenningen er lik den observerte, vil det andre leddet bli lik null. En NSE-verdi på 1 betyr altså perfekt samsvar mellom modellert og observert avrenning. Både Krause mfl. (2005) og Ritter og Muñoz-Carpena (2013) peker på at det største problemet med å benytte NSE, er at man kvadrerer den absolutte forskjellen i observerte og simulerte verdier. Dette kan føre til at avvikende verdier gir et feilaktig bilde av hvor godt modellen faktisk fungerer.

De senere årene har Kling-Gupta Efficiency (KGE) blitt mer brukt for å beskrive en

modellens treffsikkerhet (Knoben mfl., 2019). Denne metoden deler NSE inn i tre komponenter, og er gjengitt i Kling mfl. (2012) på følgende vis:

$$KGE = \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}/\mu_{sim}}{\sigma_{obs}/\mu_{obs}} - 1\right)^2} \quad (2.6)$$

hvor r beskriver den lineære sammenhengen mellom observert og modellert avrenning (Pearson-korrelasjon), σ_{sim} og σ_{obs} er standardavviket for de simulerte og observerte verdiene, og μ_{sim} og μ_{obs} er gjennomsnittet av de simulerte og observerte verdiene. Det beste resultatet man kan oppnå er $KGE=1$.

Etter kalibrering må man sørge for at parameterverdiene ikke bare beskriver en enkelt hendelse, men en faktisk sammenheng mellom input og output. Modellen må derfor valideres for andre hendelser. Dette gjør man ved å bruke modellparametere man har fått fra kalibreringen av andre hendelser, og se på hvordan graden av avvik blir. Hvilke verdier som regnes som god, ok og dårlig modellytelse er diskutabelt, og varierer mellom ulike program og tidsoppløsning (Moriasi mfl., 2007; Knoben mfl., 2019). Moriasi mfl. (2007) foreslo at for tidsoppløsning på en måned var NSE-verdier mellom 0.5-0.65 ok, gode mellom 0.65-0.75, og veldig gode mellom 0.75-1.

2.5 Tidligere studier

I forkant av oppgaven ble det sett på hvilke studier som er gjort på grønne tak generelt, modellering av grønne tak og DDD-modellen. For grønne tak er det gjort flere relevante studier. Mange ser på tilbakeholdelse gjennom lange tidsperioder, en god del studerer virkningsgraden av takene ved enkelthendelser, og enkelte har forsøkt å modellere avrenning fra slike tak. Dette studiet skiller seg ut fra resten fordi oppbyggingen på taket er av en annen karakter enn i de fleste andre - med et magasinerende sjikt LECA under vegetasjonsdekket. For DDD-modellen har alle relevante studier vært gjort på relativt store nedbørfelt. Dette er det første studiet som forsøker å benytte modellen på et veldig avgrenset område.

2.5.1 Takene ved planteskolen

Innledningsvis er det hensiktsmessig å oppsummere alt arbeid som er gjort på de grønne takene som studeres i denne oppgaven. Som nevnt i introduksjonen avla Trommald og Øyre (2018) en masteroppgave om etablering av takene våren 2018. Påfølgende høst ble det avlagt to masteroppgaver om takene. Ueland (2018) fokuserte hovedsakelig på effekten av de grønne takene - hvordan maksavrenningen ble forsinket og dempet ved kraftige nedbørhendelser. Fordal (2018) undersøkte den hydrologiske funksjonen til ta-

kene, og forsøkte å modellere avrenningen ved bruk av SWMM. Begge oppgavene fant at effekten av de grønne takene i form av fordrøyning og tilbakeholdelse er gode, men SWMM-modellen klarte ikke predikere avrenningen tilfredsstillende. Per dags dato er et anlegg for kunstig nedbør under planlegging.

2.5.2 Grønne tak

De positive effektene av grønne tak er godt dokumentert, spesielt med tanke på demping av flomtopper og tilbakeholding av nedbør. Andre positive effekter som tilbakeholdelse av partikler, nedkjøling av takoverflaten og isolasjon i kjøligere perioder ble funnet av Köhler mfl. (2002). Det er gjort flere studier på hydrologisk effekt av grønne tak. Van-Woert mfl. (2005) fant at over en 14-måneders periode var tilbakeholdelsen fra et grønt tak 60.6%, mens det fra et svart tak var på 27.2%. Når regnhendelser ble delt inn i kategoriene små, middels og store, fant de at tilbakeholdelsen for små og middels hendelser var på henholdsvis 96% og 82.9%. Effekten var prosentvis lavest ved store regnhendelser (52.4%). Andre studier har funnet tilsvarende effekt av grønne tak, og tilbakeholdelsen varierer etter hvilken type hendelse som blir studert. For enkelthendelser med lav intensitet kan det oppnås høy prosentvis tilbakeholdelse, mens for årlig tilbakeholdt nedbør synker effekten (Monterusso mfl., 2004; Morgan mfl., 2013; van Seters mfl., 2009; Carter og Rasmussen, 2006; Locatelli mfl., 2014). Det kan være problematisk å sammenligne tilbakeholdelsen for enkelthendelser, da initialforhold og hendelsens varighet kan defineres ulikt. I en stor studie utført av Mentens mfl. (2006) ble det sammenstilt resultater fra 121 grønne ekstensive tak. Funnene viste medianverdi for årlig tilbakeholdelse på 45%, høyeste tilbakeholdelse var på 81% og laveste på 27%. Samme studie analyserte resultater fra 11 intensive grønne tak, og fant at årlig tilbakeholdelse var 75%, 85% og 65% for henholdsvis median, maksimum og minimum.

Funnene fra studiene viser at virkningsgraden varierer, men hvilke faktorer som er mest avgjørende for virkningsgraden later til å være diskutabelt. Det ser ut til å være enighet om at regnhendelsens størrelse, samt fukttilstand på taket ved regnhendelsens start er avgjørende faktorer for hvor mye tilbakeholdelse man kan oppnå. Berndtsson (2010) fant at effekten blant annet avhenger av metningsgrad, tykkelse på substratet og type nedbørshendelse. Mer spesifikt fant Uhl og Schiedt (2008) at substratets tykkelse vil ha en innvirkning på årlig tilbakeholdelse, men for flomtopper ved enkelthendelser er det ikke en klar sammenheng mellom tykkelse på substrat og reduksjon av flomtopp. Et studie av Villarreal og Bengtsson (2005) foreslår at helning på taket har innvirkning på tilbakeholdelse dersom initialforholdene på taket er tørr, og at mengden som blir tilbakeholdt kommer an på regnhendelsens intensitet. Dette studiet fant også at dersom taket er mettet fra tidligere regnhendelser, vil det ikke være mulig å oppnå tilbakeholdelse, kun fordrøyning. En annen faktor alle studiene ser ut til å være enige i er at effekten av

de grønne takene varierer ut i fra årstid og lokale klimatiske forhold (Fassman-Beck mfl., 2013; van Seters mfl., 2009; Uhl og Schiedt, 2008; Bengtsson mfl., 2005). Et studie gjort av Stovin mfl. (2013) sammenlignet tilbakeholdelse for grønne tak ved 4 ulike steder i Storbritannia, alle med ulike klimatiske forhold. Studiet fant at årlig tilbakeholdelse varierte fra 19% ved kaldt og vått klima, til 59% ved varmt og tørt klima.

Norge har et typisk nordisk klima med ulike årstider, og ved anlegging av grønne tak er det viktig med kunnskap om hvilke faktorer som påvirker avrenningen fra grønne tak ved slike klimatiske forhold. I 2009 ble det anlagt et forsøksfelt på et garasjetak i Oslo Braskerud (2014). Garasjetaket ble delt i 3 like store felt - to grønne ekstensive felt med sedum og ett sort referansefelt. Data ble samlet inn over 5 år, og resulterte i et omfattende datagrunnlag. Resultatene var at både for fordrøyning og tilbakeholdelse presterer takene bra, selv om det bare er snakk om et tynt ekstensivt tak. For enkelthendelser ble det også tydelig at mengde tilbakeholdt nedbør var sterkt avhengig av initialtilstand på taket, samt nedbørens intensitet og varighet. Gjennomsnittlig årlig tilbakeholdelse var på 24 og 26% for de grønne feltene. Det blir pekt på at takets beliggenhet ikke er optimalt, og at resultatene fra studiet dermed er overførbare til andre steder på østlandet med tilsvarende lokalt klima. I Norge er det store lokale klimavariasjoner. Johannessen mfl. (2017) undersøkte potensialet til grønne tak i vått og kaldt klima. For alle takene som befant seg i Norge ble det målt tilbakeholdelse på 0-1% i vintermånedene. I en studie gjort av Johannessen og Muthanna (2016) ble det konkludert med at ved kaldt kystklima, med nedbør som strekker seg i tid, vil takene ofte befinne seg i fuktet tilstand. Dette fører til at takenes evne til å holde på vannet minker betraktelig. En mulig løsning ved slike klimatiske forhold vil derfor være å sørge for at vannet kan renne videre fra plantelaget til et magasinerende sjikt. Hamouz mfl. (2018) studerte den hydrologiske virkningen av et LECA-basert tak i kaldt klima. Dette studiet fant at tilbakeholdelsen fra LECA-taket var på 9%, mens fra det sorte referanse-taket var den på 3%. Sammenlignet med grønne, ekstensive tak ser man at reduksjon i avrenningen ikke er veldig stor. Dette er som forventet, da mye av tilbakeholdelsen fra grønne tak skyldes transpirasjon i vegetasjonsdekket (Poë mfl., 2015). LECA-takets evne til å redusere flomtopper, og forsinke avrenning var derimot meget bra. Flomtoppen ble redusert med 95%, og forsinket med 75 minutter (Hamouz mfl., 2018). For planlegging og dimensjonering av grønne tak er denne effekten vel så viktig som tilbakeholdt nedbør, fordi formålet med grønne tak hovedsakelig er å redusere spissavrenningen. Stovin mfl. (2017) skrev at selv om fordrøyningen påvirkes av nedbørhendelser og initialtilstand, er de hydrologiske prosessene knyttet til fordrøyning på taket alltid de samme, og bestemmes utelukkende av de fysiske egenskapene til taket. Studien argumenterer for at modeller som bygger på beskrivelse av disse hydrologiske prosessene vil være best rustet til å modellere avrenningen uavhengig av nedbørhendelsen.

2.5.3 Modellering

Det har vært gjort flere forsøk på å simulere avrenningen fra grønne tak tidligere (Hamouz og Muthanna, 2019; Alfredo mfl., 2010; She og Pang, 2010; Hiltten mfl., 2008; Locatelli mfl., 2014; Johannessen mfl., 2019; Palla og Gnecco, 2015; Vesuviano og Stovin, 2013). Li og Babcock (2014) gjennomgikk en rekke studier, og så på fordeler og ulemper med ofte brukte programvarer/modeller for modellering av avrenning fra grønne tak. Her ble det blant annet analysert studier som hadde modellert avrenning i SWMM, hvor grønne tak ble sett på som et lagringsvolum, eller som permeable flater koblet med en avrenningskoeffisient eller et kurvetail. Det ble pekt på at svakheten med denne modellen er at den ikke tar hensyn til de fysiske prosessene i jordsmonnet. I SWMM har det senere blitt utviklet en modul for grønn infrastruktur (LID-modul), og i en studie av Hamouz og Muthanna (2019) benyttes denne for å modellere avrenningen fra et grått³ LECA-oppbygd tak, og et grønt tak. Ved bruk av LID-modulen kan de fysiske prosessene i jordsmonn og dreneringslag beregnes. Resultatene fra denne studien viste tilfredsstillende beregning av avrenning. Konklusjonen til Li og Babcock (2014) var ellers at de fysiske modellene SWAP og SWMS-2D ser ut til å fungere bra for enkle grønne tak med singellag, mens simulering av mer komplekse tak kan by på problemer. En annen fysisk modell, HYDRUS-2D/3D, er muligens den beste programvaren i følge studien, men Johannessen mfl. (2019) peker på at modellens kompleksitet fører til at den blir lite brukt i dimensjoneringsarbeid. Det ble også sett på begrepsmessige og matematiske modeller. Fordi slike modeller ofte benytter statistisk analyse av allerede kjent data, argumenterte studien for at disse kan være lite egnet til design og dimensjonering av grønne tak. Soulis mfl. (2017) beskriver også at parameterne i slike modeller ofte mangler en klar fysisk beskrivelse, og må kalibreres.

Modeller som blir brukt for å beregne sammenhengen mellom nedbør og avrenning inneholder ofte mange slike parametere som må kalibreres (Beven, 1989; Kirchner, 2006; Beven og Binley, 1992). Ved å benytte disse parameterne kan man ende opp med et bra resultat for kalibreringen, men man står i fare for at modellen er optimalisert for en spesiell hendelse. Salvadore mfl. (2015) beskriver at antall modellparametre i urbane felt bør holdes så lavt som mulig, og bør være begrunnet i fysisk målbare verdier. I tillegg påpekes viktigheten av at urbane hydrologiske modeller ikke neglisjerer bidrag fra grunnvansstrømningen, da dette i stor grad påvirker den totale avrenningen. Fordal (2018) diskuterte i sin avhandling at usikkerhet i parametervalg kunne være en av årsakene til at SWMM-modellen ikke predikerte avrenningen fra de grønne takene på en tilfredsstillende måte. DDD-modellen benytter få kalibrerte parametere, men bestemmer i stedet parametere i forkant av kalibreringen ved hjelp av informasjon fra kartdata og målinger (Skaugen og Onof, 2014; Skaugen og Mengistu, 2016). Skaugen og Onof (2014)

³Tak med fordrøyende egenskaper, men som mangler vegetasjonsdekke

sammenlignet DDD-modellen med HBV-modellen, og fant at DDD beregnet flomtopper bedre, til tross for færre kalibrerte parametere. I tillegg fant studiet en mer realistisk beskrivelse av de hydrologiske prosessene i grunnen ved bruk av DDD-modellen enn hva man oppnår ved bruk av HBV-modellen. Tsegaw mfl. (2019) testet hvor godt DDD fungerte for små nedbørsfelt (1-50 km²) med tidsoppløsning på en time. Studiet fant at modellen kunne predikere avrenningen på en bra måte for denne feltstørrelsen med relativt høy tidsoppløsning.

3. Metode

Dette kapitlet tar for seg en kort visuell og teknisk beskrivelse av de grønne takene ved planteskolen, samt måleutstyr knyttet til disse. Det blir også gitt en kort gjennomgang av datasettene som er benyttet til analyse av takenes virkningsgrad. I denne oppgaven er det gjort et forsøk på takene for å finne den mettede hydrauliske konduktiviteten til LECA-laget, og metoden for forsøket presenteres i dette kapitlet. Til slutt gis det en beskrivelse av modelleringsverktøyet DDD, og dens modellstruktur og praktiske bruk.

3.1 Takene ved planteskolen

Som nevnt innledningsvis ble det våren 2018 etablert en forskningsinfrastruktur bestående av to identiske grønne tak og et svart referansetak. De involverte samarbeidspartnerne i forskningsprosjektet er NVE, Bergknapp, LECA Norge, og Protan. Landsam v/NMBU står som eier og Realtek v/NMBU har bruksrettigheter (Trommald og Øyre, 2018).

Takene vises i sin helhet i figur 3.1, og vil fra nå av bli omtalt som tak 1, tak 2 og tak 3. Tak 1 er det sørlige grønne taket, tak 2 er det svarte referansetaket i midten og tak 3 er det nordlige grønne taket.



Figur 3.1: Bilde av takene tatt skrått ovenfra fra nordøst. Fra venstre: tak 1, tak 2 og tak 3. Foto: S. Nyborg (Trommald og Øyre, 2018)

3.1.1 Grønne tak og svart referansetak

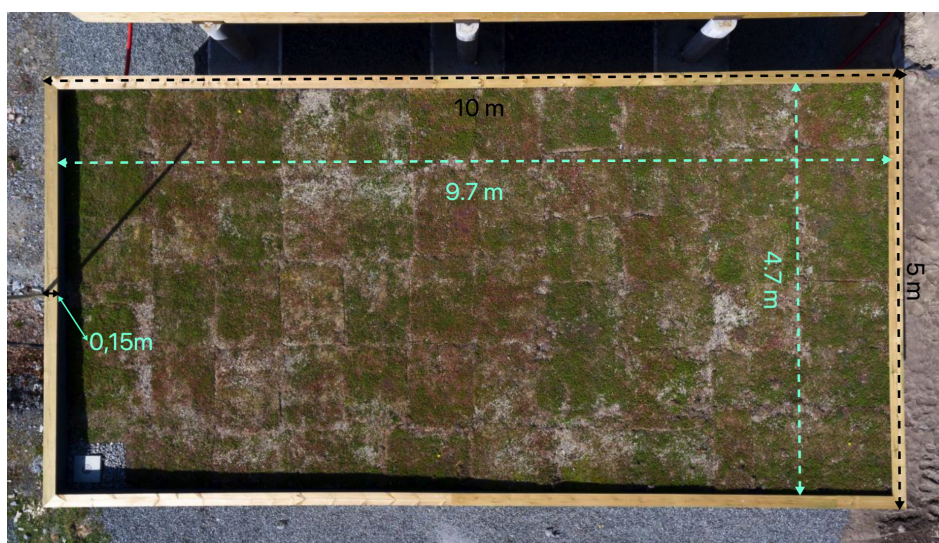
De grønne takene

De to grønne takene er bygget etter identiske byggeplaner. Tanken bak lik oppbygging var å kalibrere takene mot hverandre, slik at byggtekniske feilkilder ble minimert (Trommald og Øyre, 2018). I dette delkapittelet ansees derfor beskrivelsen av tak 1, også gjeldende for tak 3.



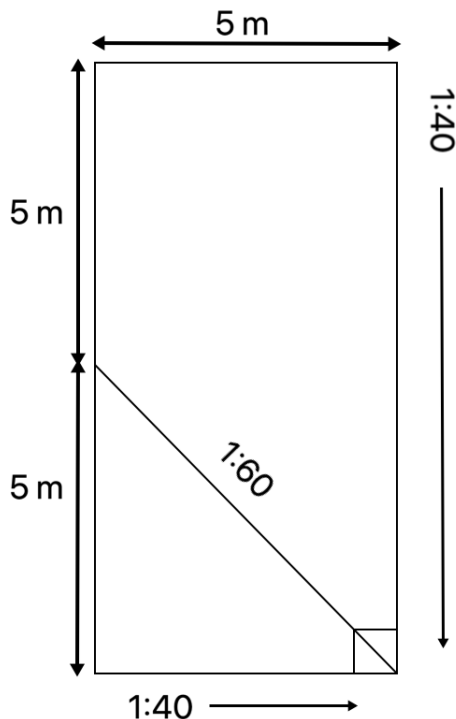
Figur 3.2: Lagene til de grønne takene

Som vist i figur 3.2, har taket to magasinerende sjikt, skilt av to filtmatter. Det nederste sjiktet er 150 mm med finknust LECA[®] lettklinker 0-4 mm. Disse er i graderingstørrelse 1-5 mm og antas av produsenten å ha en effektiv porøsitet på rundt 50%. Det er dog knyttet usikkerhet til dette tallet, da det er vanskelig å beregne partikkeldensiteten til LECA[®]. Sedummattene, som utgjør det øverste sjiktet, er 40 mm tykt og har en egenvekt på 25 kg/m². Ved fullstendig metning av sedummattene veier de 50 kg/m² som tilsier et porevolum på 50 % av det totale volumet (Trommald og Øyre, 2018). Takenes mål er illustrert i figur 3.3. Det totale arealet er 50 m², mens det grønne arealet bestående av sedummattene er på 45,59 m².



Figur 3.3: Tak 1 med eksakte mål. Modifisert fra Trommald og Øyre (2018)

I figur 3.4 er takenes fall illustrert. Fra figuren kan man se at det er to ulike fall som leder til sluket som er plassert nede i høyre hjørne. Bunntopografiens konstruksjon vil være grunnlaget for vurderingen av hvordan avstandsfordelingen (vanndråpenes strømningsvei) blir seende ut i kapittel 3.4.5.



Figur 3.4: Illustrasjon av helningene i taket (ytre mål på taket)

Referansetak

Det svarte referansetaket er bygget etter nær eksakt samme byggeplaner som de grønne takene. Forskjellen mellom dem er åpenbar, det svarte taket har et enkelt taktekke istedenfor et magasinierende sjikt. Skjøtene til taktekket går i strømningsretningen for å hindre gropmagasinering, og gir på den måten raskere respons på avrenningen (Trommald og Øyre, 2018).

3.1.2 Måleutstyr

Det er mye måleutstyr knyttet til takene, og i følgende avsnitt vil det bli gitt en kort beskrivelse av måleutstyret som har vært viktig for denne oppgaven, samt tidsoppløsning på datalogging fra dette utstyret. <https://www.contextgarden.net/Description>

Nedbørmåler: Nedbørmåleren som benyttes ved takene er av typen OTT Pluvio², og er plassert to meter nordøst for tak 2 (Trommald og Øyre, 2018). Det er en vektbasert nedbørmåler som skal være i stand til å måle både regn og snø. Data logges hvert minutt.

Volummåler: Til hvert tak er det koblet en IBC-container med kapasitet på 1000 liter (Trommald og Øyre, 2018). I tanken er det en trykksensor som måler endring i vannivå, og data logges kun dersom endring i vannivå overskrider 0.1 liter. Denne endringen tilsvarer ca 0.1 mm økning i tanken, og faller innenfor sensorens feilmargen (Seametrics, 2008). Dette fører til mye støy i målingene for endring i tankvolum. I bunnen av tanken er det en volumstyrt pumpe som starter når vannivå i tanken overskrider 900 liter, og stopper når vannivået er rundt 300 liter. Dette fører til hull i dataserien de periodene hvor tankene tømmes.

Vindmåler: Ved tak 1 er det plassert en propellbasert vindmåler, som måler vindretning og vindhastighet. Logges hvert tiende minutt.

Temperaturmåler: Ved nedbørmåleren er det plassert en temperatursensor som måler lufttemperatur med nøyaktighet på ± 0.3 °C ved 25 °C (Trommald og Øyre, 2018). Data logges hvert tiende minutt.

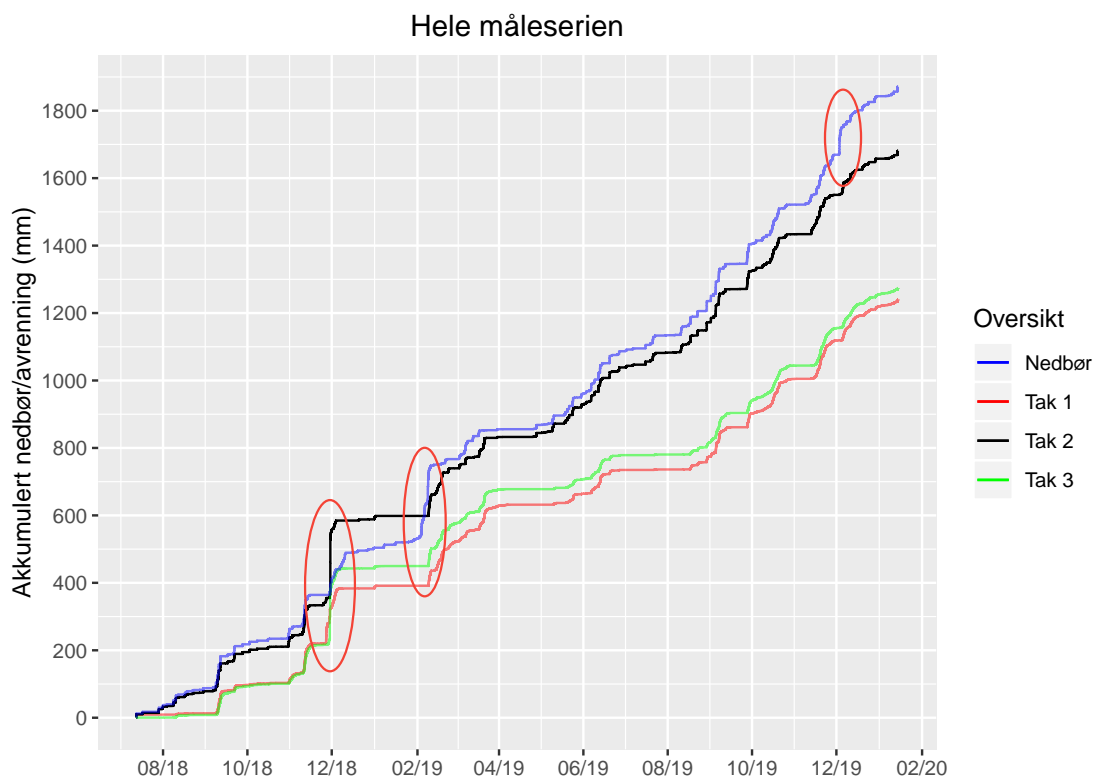
Vektmåling: På alle tak er det montert seks veieceller, og snittet av disse målingene logges som én vektverdi for hvert tak (Trommald og Øyre, 2018). Målingene påvirkes av temperatur, og selv i tørrværperioder registreres vektendring på takene (Ueland, 2018). Data logges hvert tiende minutt.

3.2 R-studio

R-studio har blitt benyttet til kvalitetskontroll av tilsendt data, klargjøring av inputfil til DDD-modellen, samt analyser av de grønne takenes virkningsgrad. Under vil metoden for data- og kvalitetskontroll bli gjennomgått, mens inputfilen til DDD-modellen vil beskrives i avsnitt 3.4.5. Takenes virkningsgrad blir studert i kapittel 4.1.

3.2.1 Data og kvalitetskontroll

Som nevnt i avsnitt 3.1.2 blir ulike målinger logget kontinuerlig. Oppløsningen på data varierer, der fineste format har en oppløsningen på ett minutt. De viktigste målingene for denne oppgaven har vært nedbør, avrenning, temperatur og vekt. Filene for disse målingene ble lastet inn i R-studio, og kunne stort sett brukes slik de ble tilsendt. Den største forandringen som måtte gjøres var for avrenningsmålingene. Formatet på data som ble benyttet var endring i tankvolum (liter) fra et tidspunkt til ett annet, men ønskelig format var m^3/s . For å få data på ønskelig format ble det sett på volumendringen per tid ($l/\Delta t$), hvor Δt varierte. På denne måten fikk man en konstant volumendring per tid (l/min) mellom kjente tidspunkt, som lett kunne omgjøres til m^3/s . Avrenningen under pumpens tømmesekvens ble beregnet med lineær interpolasjon mellom avrenningsintensitet før og etter tømmesyklusen.



Figur 3.5: Kumulativt plot før kvalitetskontroll

Målinger for avrenning og nedbør måtte deretter sjekkes måned for måned, og enkelte modifikasjoner måtte gjøres. Det var spesielt tre hendelser som ble gitt ekstra hensyn, disse kan sees i figur 3.5. Ved tilsending av data ble det opplyst at IBC-containerne ble installert uten varmekabler og isolasjon, og at vannet i tankene derfor frøs til is en gang i løpet av høsten 2018. Av det kumulative plotet kan det i desember observeres et hopp i avrenningsmålinger fra alle takene, uten tilsvarende hopp fra nedbørmålingene. Dette tyder på at perioden 24.11.2018 - 05.12.2018 mest sannsynlig var perioden hvor vannet frøs, og denne perioden ble fjernet fra datasettet.

Den andre hendelsen som ble gitt ekstra hensyn var perioden 04.02.2019-08.02.2019. Da ble det målt 109.9mm nedbør, mens historiske data fra en nærliggende nedbørstasjon på Søråsjordet¹ viser 20.9mm nedbør for samme periode. Ved starten av denne hendelsen er det registrert -15°C , og oppfangingsvikten kan være veldig høy (Wolff mfl., 2013). Til tross for lokale forskjeller, og oppfangingsvikt i nedbørmålingene, vurderes denne målingen som så høy at den fjernes fra serien. Det samme problemet gjelder for perioden fra 03.12-05.12. Nedbørmålingene ved takene viser total nedbør på 80.17mm i dette tidsrommet, mens målingene fra Søråsjordet viser 4.5mm nedbør i samme periode. Denne hendelsen fjernes også fra serien.

¹<https://www.nmbu.no/fakultet/realtek/laboratorier/bioklim/meteorologiske-data>

3.3 Bokspermeameterettest

Hastigheten som vannet beveger seg med gjennom LECA-laget i tak 1 og tak 3, er en viktig parameter som påvirker simuleringene til DDD-modellen. Et hastighetsanslag basert på bokspermeameterettest av takene kan øke kredibiliteten til modellen.

Det ble diskutert å fylle opp taket med vann i den hensikt å gjøre en resesjonsanalyse på tømmegrafen. Dette viste seg vanskelig, da vanningsanlegget til planteskolen v/NMBU var vinterstengt. En eventuell oppstart av anlegget var så energi- og tidskrevende at det ikke rettferdiggjorde forsøket. Dermed ble det bestemt at enkleste løsning var analyser av kjerneprøver gjort på takene. Metoden kalles for bokspermeameterettest, og er beskrevet i dette delkapittelet.

3.3.1 Darcy's lov

Henri Darcy (1803-1858) var den første med en systemtisk studie av vanngjennomstrømming i et porøst medium. Mer presist studerte Darcy vanntransport gjennom et sandfilter brukt til rensing av drikkevann. Forsøket tar for seg vannfluks gjennom en horisontal sylinder med lengde L fylt av et porøst medium. Den hydrauliske trykkehøyden er $h_a - h_b$, hvor a og b representerer henholdsvis inn- og utløp til sylinderen. Resultatet blir at volumfluksen Q gjennom et porøst medium kan beskrives ved (Fetter, 2001):

$$Q = -KA \frac{dh}{dl} \quad (3.1)$$

hvor

- Q : Volumfluks [L^3/T]
- K : Hydraulisk konduktivitet [L/T]
- A : Areal [L^2]
- $\frac{dh}{dl}$: Hydraulisk gradient [-]

og er siden kjent som Darcy's lov (Hendriks, 2010). Det negative fortegnet indikerer at strømningsretningen går fra størst til minst hydraulisk trykkehøyde.

Hydraulisk konduktivitet

Hydraulisk konduktivitet kan beskrives som volumfluksen per enhetsareal per enhetsgradient. Den er en funksjon av egenskapene til både det porøse mediet, og væsken som renner gjennom det (Fetter, 2001). Gjennomsnittlig porestørrelse har størst betydning for permeabiliteten til mediet. Egenskapene til væsken bestemmes av dens spesifikke

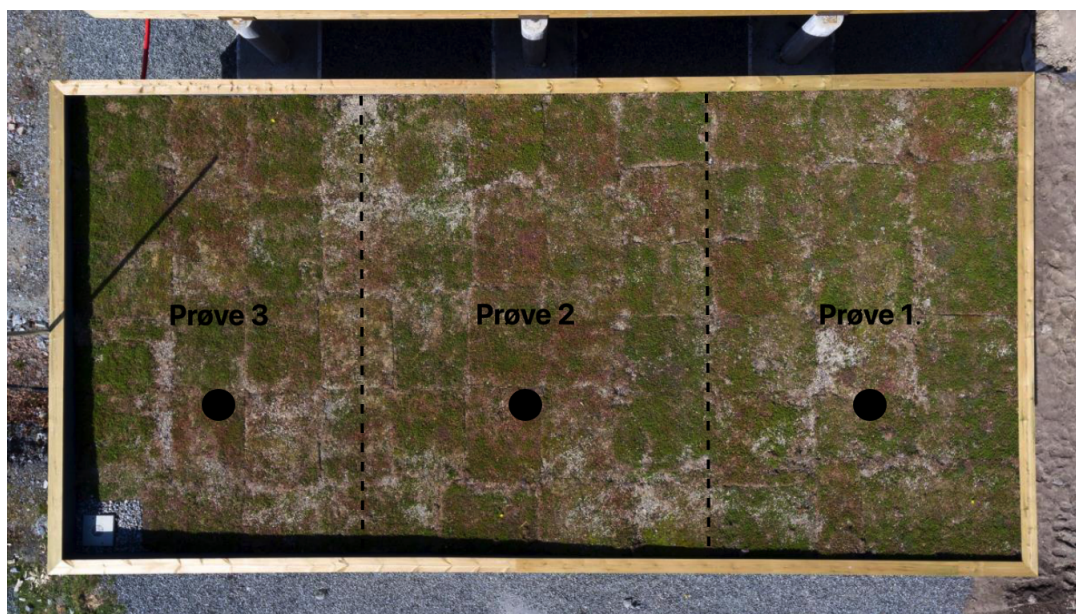
vekt og dynamiske viskositet (Fetter, 2001). De er også funksjoner av temperatur, der vann har en særegen kvalitet ved at massetettheten er størst ved 4°C.

Graderingen av kornstørrelsene i jordprøven har innvirkning på konduktiviteten. Er graderingen over et større spekter slik at det eksempelvis er mer finstoff, vil porøsiteten og den hydrauliske konduktiviteten bli lavere (Svensson, 2014; Fetter, 2001). Dette skjer siden de små partiklene fyller tomrommet mellom de større kornene. I masteroppgaven til Trommald og Øyre (2018) ble det påpekt at en av LECAsykkene distribuert over tak 3 innholdt mye mer finstoff enn de resterende LECAsykker.

3.3.2 Forsøket

Målet med forsøket er å skaffe målinger på den mettede hydrauliske konduktiviteten til tak 1 og tak 3. Forsøket gjøres ved bruk av en bokspereameteretest.

Innhenting av kjerneprøver ble gjort ved bruk av stålsylindere (Ø5cm) som ble slått ned i takene med hammer. Deretter ble de dratt forsiktig opp slik at ikke bunnen skulle dette ut. Lokasjonen tilhørende prøvene er illustrert i figur 3.6.

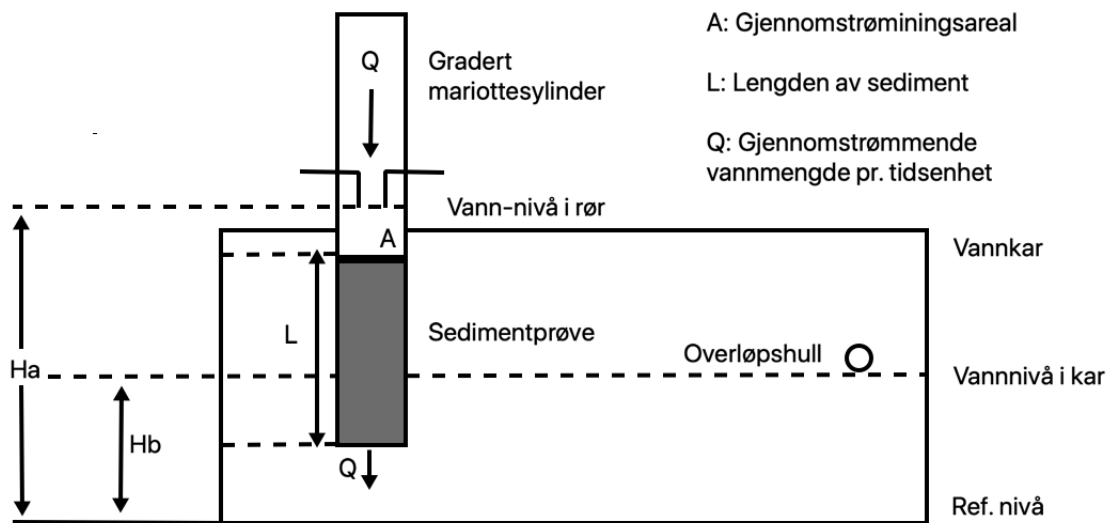


Figur 3.6: Illustrasjon av hvor prøvene er tatt på tak 1 og tak 3. Foto: S. Nyborg

Totalt ble 6 prøver hentet ut fra takene, 3 på hvert tak. Metoden for bruk av bokspereameteretesten er presentert punktvis nedenfor.

1. Sedimentprøven plasseres i vannkaret slik illustrasjonen viser i figur 3.7. Overløpshullet tettes og vannkaret fylles med vann. Vent i 5 minutter for å fullstendig mette prøven.

2. Overløpshullet åpnes slik at vannkaret dreneres for vann. Dette tar rundt 10 minutter slik at prøven får tid til tømme seg.
3. Det måles hvor stort volum vann 2 cm i mariottesylindrene svarer til.
4. Mariottesylindringen fylles med vann og plasseres på toppen av prøven.
5. Tiden (t) det tar å senke vannstanden (h) 2 cm over mariottesylindrens tverrsnittsareal (A) gir $A * h/t = Q$. Med en 10 cm lang mariottesylinder, ble et snitt fra 3 målinger gjort over 6 cm. Q_{snitt} er illustrert i figur 3.7.



Figur 3.7: Oppsett for bokspermeameterettest

For å regne ut den hydrauliske konduktiviteten brukes en omskrivning av formel 3.1, der den hydrauliske gradienten er definert ved dh/dl . Her tilsvarende dh endring i trykkehøyde og blir gitt av parameterne $H_a - H_b$, og dl tilsvarende L i figur 3.7. Trykkehøyden og sylindrens tverrsnittsareal er konstant gjennom hele forsøket. Den mettede hydrauliske konduktiviteten blir så beregnet ved følgende formel:

$$K = \frac{Q}{A} \frac{L}{H_a - H_b} \quad (3.2)$$

3.4 DDD-modellen

DDD-modellen er en parameterfattig nedbør-avrenningsmodell som simulerer metnings-tilstand i grunn, evapotranspirasjon og avrenning. Den er originalt skrevet i programmeringsspråket R, men siden omskrevet til Julia. Input er temperatur- og nedbørsdata. Etter at Skaugen og Onof (2014) presenterte modellen, har det blitt gjort utbedringer av rutinene for estimering av evapotranspirasjon og feltkapasitet (Skaugen og Mengistu, 2016; Skaugen, 2020).

3.4.1 Bakgrunn

DDD-modellen er en utvidelse av metoden til enhetshydrogrammet (Skaugen og Onof, 2014). Metoden ble først introdusert av Sherman (1932), og har siden gjennomgått flere revideringer (Subramanya, 2008; Ramírez, 2010). Enhetshydrogrammet er definert som hydrogrammet gitt av en enhet effektiv nedbør (1 cm) uniformt distribuert over nedbørfeltet med konstant intensitet (Ramírez, 2010). Tiden vannet lengst unna utløpet bruker til utløpet er responstiden til feltet, og tilsvarer varigheten til enhetshydrogrammet. Utformingen av enhetshydrogrammet bygger på relasjonen mellom hydrogrammet og nedbørfeltet, der hydrogrammet er effektiv avrenning ved utløpet av feltet over tid. For grønne tak vil flere faktorer være med å påvirke form og størrelse til enhetshydrogrammet. Av faktorer finnes det *takkarakteristikker*: størrelse, form og helning; *infiltrasjonskarakteristikker*: egenskaper til infiltrasjonsmateriale, type sedum/grønt dekke; *klimafaktorer*: nedbørkarakteristikker og evapotranspirasjon (Subramanya, 2008). For hvert individuelle nedbørfelt, naturlig eller konstruert, fungerer enhetshydrogrammet som et fingeravtrykk på feltets respons på en enhet nedbør.

Teorien bak enhetshydrogrammet baserer seg på to fundamentale prinsipper. For det første, varigheten til enhetshydrogrammet vil være uavhengig av intensiteten til regnhendelsen og avhenger bare av regnhendelsens varighet (Ramírez, 2010). For det andre så regnes nedbørfelt som lineære system. Da følger prinsippet om proporsjonalitet der nedbørhendelser av ulik intensitet kan skaleres tilsvarende (Ramírez, 2010). Videre følger det at et hydrogram fra en regnhendelse bestående av ulike intensitetsperioder, kan konstrueres ved å superponere enhetshydrogrammene til de respektive periodene (Dooge, 1959).

3.4.2 Innføring

Dette delkapittelet gir en rask innføring i hovedpunktene til DDD-modellen.

DDD-modellen beregner avrenningen fra tre forskjellige landskapstyper separat. Landskapstypene er permeable flater (P), impermeable flater (IP) og våtmarker (Bog) (Skau-

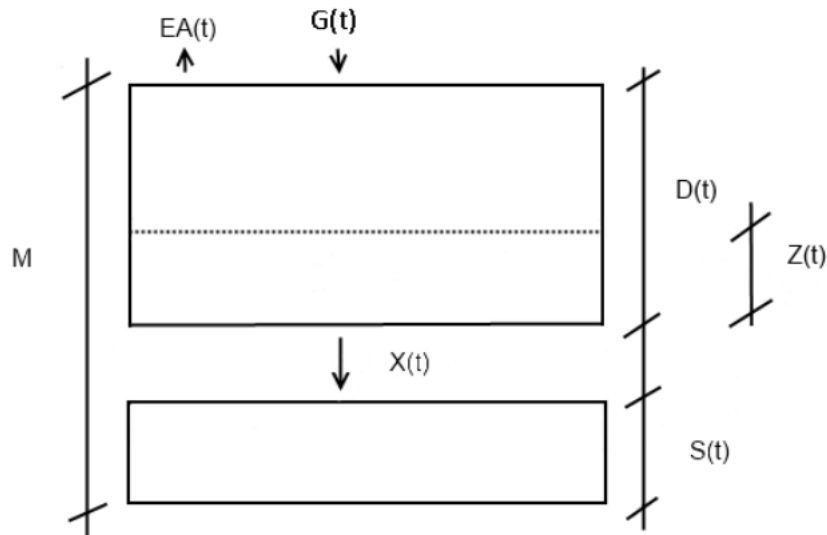
gen, 2020). Ettersom denne oppgaven omhandler grønne tak, er det antatt at all avrenning kommer fra permeable flater (P).

Hovedforskjellen mellom DDDUrban og DDD-modellen er at infiltrasjonskapasiteten modelleres separat for hver landskapstype. Permeable flater har en infiltrasjonskapasitet tilsvarende den gjennomsnittlige hastigheten i grunnen (Skaugen, 2020).

DDD-modellen består av to hovedmoduler, en hydrologisk modul og en modul om avrenningsdynamikken. Den hydrologiske modulen estimerer mengden nedbør som renner inn til avrenningsmodulen. Avrenningsmodulen bruker en avstandsfordeling til å beskrive vanntransporten fra felt til elvenettverk eller sluk. Elvenettverket er så knyttet til utløpet med egen avstandsfordeling og høyere hastighet. I denne oppgaven kuttet steget innom elvenettverket ettersom takene har sluk. En detaljert beskrivelse av elvenettverket ansees derfor ikke som relevant.

3.4.3 Hydrologisk modul

Den hydrologiske modulen er illustrert i figur 3.8. M er magasinkapasiteten til hele taket og er delt mellom umettet sone $D(t)$ og mettet sone $S(t)$. I den umettede sonen representerer $Z(t)$ vanninnholdet, Ea den totale evapotranspirasjonen, $G(t)$ vann fra regn og snøsmelting, og $X(t)$ vanntransport til den mettede sonen.



Figur 3.8: Illustrasjon av den hydrologiske modulen til DDD-modellen. Feltkapasiteten M er konstant, mens D , S og Z er funksjoner av tid (Skaugen og Onof, 2014)

Når vann fra $G(t)$ når $D(t)$, vil det øke volumet til $Z(t)$. For at $D(t)$ skal slippe vann videre til den mettede sonen $S(t)$, må $Z(t)$ nå feltkapasiteten R . Den er satt til 0.3, altså 30% av porevolumet til $D(t)$. Årsaken til at det også i denne oppgaven er benyttet

en feltkapasitet på 30 %, er at kalibreringen var ferdigstilt da Berretta mfl. (2014) sitt estimat for feltkapasiteten til LECA ble oppdaget. Forandring i vanninnholdet i umettet sone blir:

$$\frac{dZ}{dt} = G(t) - X(t) \quad (3.3)$$

$X(t)$ er i ligningen over, volumet vann som overskrider feltkapasiteten R og dermed øker volumet til den mettede sonen $S(t)$. Forandringen i mettet sone $S(t)$ vil derfor være input minus output, som gir:

$$\frac{dS}{dt} = X(t) - Q(t) - E_a(t) \quad (3.4)$$

der $Q(t)$ er avrenning fra $S(t)$, og $E(t)$ er total evapotranspirasjon. Forandringer i $D(t)$ påvirker $S(t)$ og vice versa. Ligningen under viser at en eksempelvis økning i $D(t)$ minker $S(t)$.

$$\frac{dD}{dt} = -\frac{dS}{dt} \quad (3.5)$$

Den simulerte energibalansen er brukt til å beregne den potensielle evapotranspirasjonen E_p ved bruk av Priestly-Taylor metoden (Skaugen, 2020):

$$E_p(t) = \alpha \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) * (R_n) * \left(\frac{1000}{\lambda_v \rho_w} \right) \quad (3.6)$$

Hvor $E_p(t)$ er gitt i mm/ Δt , Δ er gradienten til mettet fordampningstrykk, γ er den psykrometriske konstanten, λ_v er den latente varmen ved fordampning, R_n er netto solinnstråling, og α er en representasjon for de turbulente strømmingene (Skaugen, 2020).

Total evapotranspirasjon E_a , er potensialet E_p skalert ikke-lineært som funksjon av mengden vann i grunnen (Skaugen, 2020).

$$E_a = \min \left(E_p, E_p \left(1 - \exp \left(-4 * \frac{M - D + Z + G}{M} \right) \right) \right) \quad (3.7)$$

DDD-modellen skiller nedbør som regn og snø ved bruk av en grensetemperatur på $TX = 0.5$ °C (Stavang, 2019). Det er en snøsmeltingrutine innebygd i modellen, men denne omtales ikke nærmere her, da dette studiet begrenser seg til nedbørhendelser i varme måneder.

3.4.4 Avrenningsmodul

Vannfluksen gjennom feltet blir beskrevet av 5 enhetshydrogrammer (4 i grunnen og 1 for overflateavrenning), som jobber parallelt og distribuerer avrenningen i tid til sluket. Hvert enkelt enhetshydrogram i grunnen utgjør et metningslag med tilhørende hastighet og kapasitet (Skaugen, 2020).

Utforming av enhetshydrogrammet til avstandsfordelingen

Beskrivelsen av utforming til enhetshydrogrammet forenkles ved å fokusere på ett enkelt enhetshydrogram i grunnen.

Avstandsfordelingen er en kumulativ fordeling av avstander fra punkter i feltet til sluket. Tidligere studier (Skaugen og Onof, 2014; Skaugen og Mengistu, 2016) har vist at avstandsfordelingen for naturlige felt overlapper godt med eksponentialfordelingen gitt i ligning 3.8.

$$U_f(d) = 1 - e^{-\Lambda(d-d_0)} \quad (3.8)$$

Hvor Λ er den konstante raten til eksponentialfunksjonen, og d er avstand. Avstandsfordelingen kan transformeres til en fordeling av reisetider ved bruk av en gitt hastighet. Den deriverte fordelingen av reisetider blir enhetshydrogrammet til feltet

$$u_f(t) = \Lambda e^{-\Lambda(t-t_0)} \quad (3.9)$$

hvor Λ beskriver resesjonskarakteristikken til feltet. Ettersom det fokuseres på ett enhetshydrogram omgjøres ligningen til

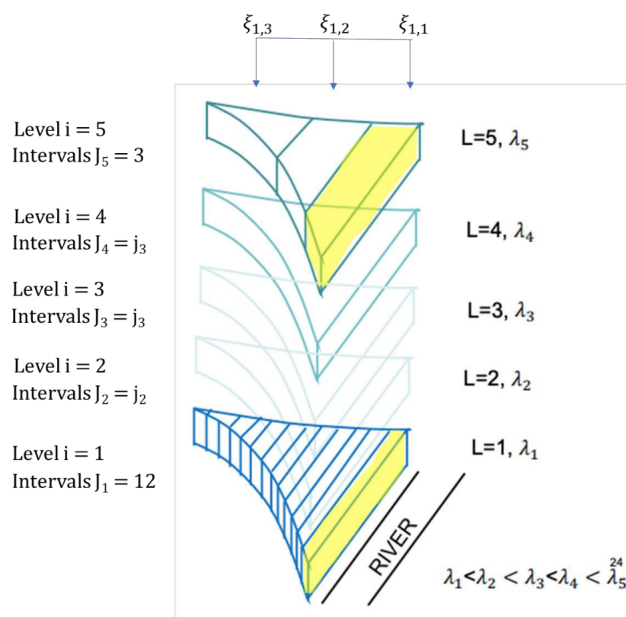
$$u_{f,1}(t) = \lambda_1 e^{-\lambda_1(t-t_0)} \quad (3.10)$$

som nå er enhetshydrogrammet tilknyttet metningslag 1. Enhetshydrogrammet i metningslag 1 har nå en spesifikk resesjonskarakteristikk λ_1 . Hastigheten bølgen med vann forflytter seg i metningslaget 1 beregnes ved

$$v(1)_f = \frac{\lambda_1 \bar{d}}{\Delta t} \quad (3.11)$$

og viser at hastigheten er en funksjon av λ_1 . Her er \bar{d} hentet fra avstandsfordelingen, og Δt er den timelige oppløsningen i modellen. Varighet til enhetshydrogrammet $u_{f,1}$

vil derfor være $t(1)_{f,maks} = d_{maks}/v(1)_f$. Videre gjøres det en diskretisering siden man ønsker å vite hvor mye enhetshydrogrammet $u_{f,1}$ bidrar til avrenning i hvert tidssteg Δt . Dette kan illustreres best i figur 3.9 (Stavang, 2019).



Figur 3.9: Illustrasjon av hvert metningslag med tilhørende enhetshydrogram definert av resesjonskarakterestikk λ_i og antall tidssteg j

I figuren studeres metningslag 1 (level 1) med tilhørende enhetshydrogram 1. Den farge-lagte boksen representerer volum vann som bringes til elven/sluket i løpet av tidsopp-løsningen til modellen. Bokstaven J er antall tidssteg (12) i metningslag 1, og $\xi_{1,12}$ er vektene som fordeler $X(\Delta t)$ til metningslaget basert på graden av metning. Nyttige observasjoner fra figur 3.9 er:

- Alle metningslag har samme form gitt av avstandsfordelingen.
- Antall tidssteg varierer for hvert metningslag som følge av at resesjonkarakteristikken endrer hastigheten for hvert lag (formel 3.11).
- Hastighet er lavest i metningsnivå 1 og høyest i metningsnivå 5
- Når det regner vil metningslaget med lavest hastighet fylles opp først, som betyr at det fylles opp fra bunnen.
- Bidraget fra ett gitt tidssteg er minst for det nederste laget og størst for det øverste. (illustrert med størrelsen på den gule boksen)

Estimering av hastighet

Det ble vist i formel 3.11 i delkapittelet over at hastigheten i metningsnivå 1 er en funksjon av λ_1 . For å komme dit er det best å starte med Λ , resesjonskarakteristikken til feltet. Den blir brukt når DDD-modellen modellerer resesjonskurven ved følgende ligning

$$Q(t) = Q_0 \Lambda e^{-\Lambda(t-t_0)} \quad (3.12)$$

hvor Q_0 er flomtopp før resesjonen starter. Λ beskriver her helningen på resesjonkurven. Den er bestemt fra logdifferansen i avrenning ved tid t i ligning 3.13.

$$\Lambda = \log(Q(t)) - \log(Q(t + \Delta t)), \quad (3.13)$$

hvor $Q(t)$ er avrenning. En høy verdi av Λ forstås som en stor forandring i lagringskapasitet (M) og vil derfor i ligning 3.14 gi høyere hastighet. Skaugen og Mengistu (2016) fant at gammafordelingen fungerer som en bra tilpasning til resesjonskarakteristikken. Input til DDD-modellen er derfor shape (α , Gsh) og scale (β , Gsc), som er parameterne til den gammafordelte Λ . Den forventete verdien $E(\Lambda)$ er produktet av $\alpha\beta$. Denne verdien kan brukes til å regne ut snitthastighet til vannet i grunnen.

$$\bar{v} = \frac{E(\Lambda)\bar{d}}{\Delta t} \quad (3.14)$$

Beregning av magasinkapasitet

Skaugen og Mengistu (2016) utviklet en ny metode for beregning av magasinkapasitet. Den antar at S har samme form som den gammafordelte Λ . Med et estimat på den gjennomsnittlige metningen i taket (m_s), er det mulig å utlede parameterne til den gammafordelte S . Input til gammafordelingen blir α (shape) og η (scale), der α er lik for begge gammafordelingene (samme form). Scaleparameteren beregnes ved $\eta = \beta/c$ og $c = \bar{\Lambda}/m_s$. $\bar{\Lambda}$ representerer resesjonskarakteristikken ved tilstanden til det gjennomsnittlige metningsinnholdet.

$$u_f(t) = \bar{\Lambda} e^{-\bar{\Lambda}(t-t_0)} \quad (3.15)$$

Basert på den årlige gjennomsnittlige avrenningen (ÅGA) og enhetshydrogrammet 3.15, kan den gjennomsnittlige metningen m_s beregnes (Skaugen, 2020). Når m_s er bestemt vil scale parameteren η til gammafordelingen kunne beregnes. Fordelingen av kapasiti-

tetsnivåene S_i blir beregnet som kvantiler til den gammafordelte kapasiteten (Skaugen og Mengistu, 2016):

$$\frac{S_i}{M} = \int_0^{S_i} \frac{1}{\eta^\alpha \Gamma(\alpha)} S^{\alpha-1} e^{-\frac{S}{\eta}} dS \quad (3.16)$$

hvor M , som er den totale feltkapasiteten, er 99% kvantilen av fordelingen til S .

3.4.5 Input

DDD-modellen har en rekke innebygde funksjoner, og oppbygningen er beskrevet tidligere i dette delkapitlet. Modellens input består hovedsakelig av to filer; en datafil og en parameterfil. Datafilen består av kjente verdier fra måleinstrumentene rundt take-
ne. Parameterfilen med beskrivelse av de ulike parameterne, er presentert i sin helhet i vedlegg A. En av parameterne som skal bestemmes til parameterfilen er avstander, og metoden for å finne avstandene beskrives i dette avsnittet.

Datafil

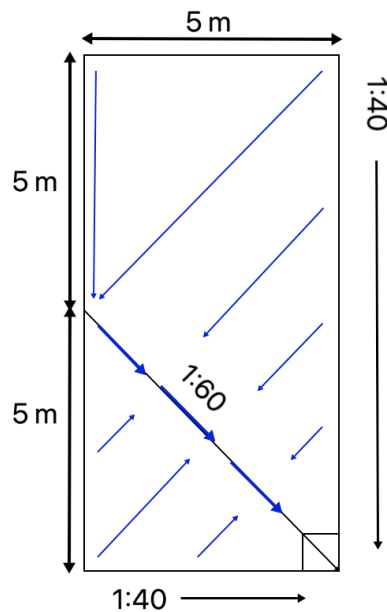
Datafilen ble bygd på grunnlag av tilsendte data fra NVE, og består av nedbør, temperatur og endring av tankvolum. Endring av tankvolum ble omgjort til avrenning per minutt, og slått sammen med filene for nedbør og temperatur til et datasett. Tidsoppløsning på temperaturlogging var på 10 minutter, men for nedbør og avrenning var tidsoppløsningen på 1 minutt. Hullene for temperaturdata måtte derfor tettes, og dette ble gjort ved lineær interpolasjon.

Avstandsfordeling

Avstandsfordelingen brukes til å bestemme parametrene middel- og maksavstand for vanndråpenes strømningsvei i nedbørfeltet. Ved store naturlige felt benyttes geografiske informasjonssystemer (GIS) til å beregne avstander, men for de grønne take-
ne må avstandene beregnes manuelt. Det første som ble gjort var å lage fem ulike avstandsfordelinger, og i vedlegg B er det beskrevet hvordan strømningslinjene er tenkt for hver avstandsfordeling. Valget falt på to ulike avstandsfordelinger, og begge presenteres nedenfor.

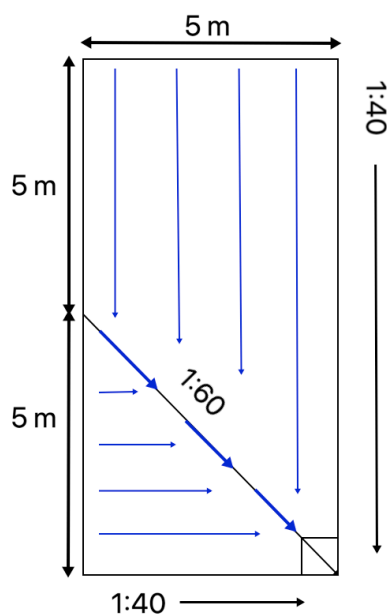
Avstandsfordeling 1 (Af1) følger antagelsen om hvordan naturlige felt dreneres, altså at strømningsveiene er vurdert til å ta korteste vei til elven uansett hvor på taket de treffer. Denne avstandsfordelingen ligner den som vanligvis benyttes i DDD-modellen. Det presiseres at renna (den diagonale helningen på 1 : 60) i Af1 fungerer som en elv. Det betyr at hastigheten i renna er betydelig høyere enn for resten av taket, og så snart

dråpene treffer renna antas det at vannet renner til utløpet i samme tidssteg. Dette gir følgende strømmingssystem:



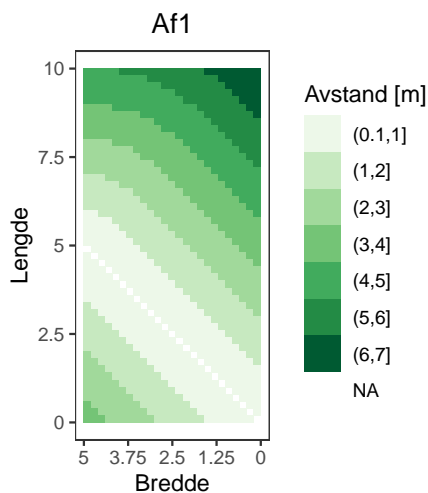
Figur 3.10: Vannets strømmingsveier for Af1 (ytre mål på taket)

Avstandsfordeling 2 (Af2) er tenkt å gjenspeile strømmingsbildet basert på takets topografi. Forutsetningen er at vanddråpene følger takets lengderetning til det treffer på renna, og at de deretter transporteres til utløpet. Renna i Af2 fungerer ikke som en elv, men som en del av vannets transportvei mot sluket. Det er tenkelig at strømmingslinjene blir bøyd av mot renna, men siden dette kompliserer konstruksjonen av avstandsfordelingen er rette strømmingslinjer brukt.

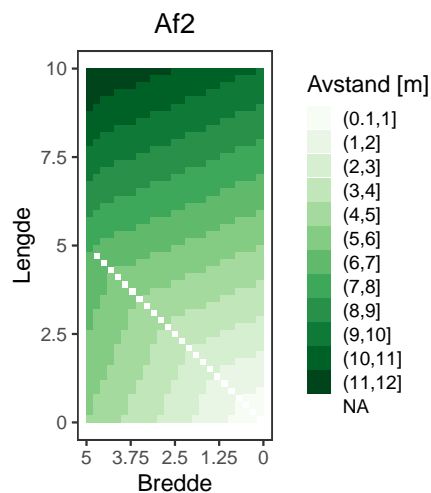


Figur 3.11: Vannets strømmingsveier for Af2 (ytre mål på taket)

Avstandsfordelingene ble konstruert i R ved å lage en matrise på 25*50 kvadratiske ruter, der matrisen fungerer som en gjengivelse av taket. For hver rute ble det kalkulert en avstand til sluket basert på strømningsveien vannet i ruta er tenkt å ta. Figur 3.12 og 3.13 viser hvordan avstandene fordeler seg på taket, hvor fargekoden viser avstandsintervallet rutene har til sluket/renna.



Figur 3.12: Illustrasjon av Af1



Figur 3.13: Illustrasjon av Af2

3.4.6 Kalibrering

Fordi det primært er enkelthendelser med høy nedbørintensitet som er interessante i anleggingen av grønne tak, er det også dette modellen er kalibrert og validert for. Ordet hendelse benyttes i dette tilfellet om en periode som inneholder en eller flere flomtopper, og ikke nødvendigvis én enkelt regnhendelse. Grunnen er at det er interessant å se hvordan modellen beregner avrenningsrespons for ulike metningsgrader av takene. Fire hendelser ble valgt ut til kjøring av modellen, og for hver avstandsfordeling og hvert av de grønne takene ble to av hendelsene kalibrert. Hver kalibrering ble gjort ved å kjøre 300 iterasjoner, hvor det kun var parameterne shape (Gsh) og scale (Gsc) som ble endret på. Hendelsene som ble plukket ut er presentert i tabell 3.1, og omtales heretter som hendelse mai, juni, sep og okt.

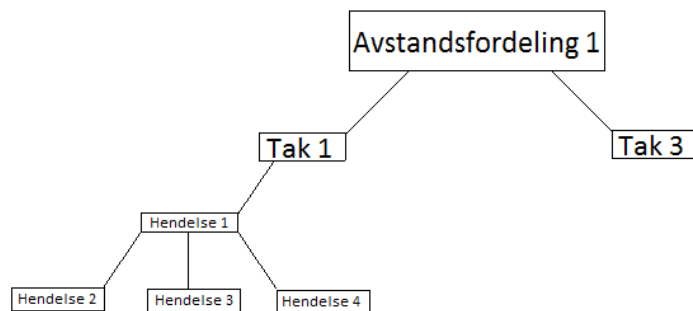
Tabell 3.1: Hendelser som benyttes til kalibrering og validering

Hendelse	Tidsperiode	Nedbør (mm)	Snittemperatur (°C)	Avrenning (mm)
mai	17-27.mai 2019	53.5	12.33	25.73
juni	11-15.jun 2019	48.16	12.73	36.16
sep	04-06.sep 2019	43.07	10.64	31.56
okt	25.sep-03.okt 2019	61.53	8.39	43.07

Hendelsene som ble valgt til kalibrering var jun og sep. Årsaken til at disse ble valgt, var at forløpet til hendelsene var ulike. Juni-hendelsen er en lang hendelse som består av

tre separate regnhendelser, hvor den midterste er den mest intense. Det er registrert 48 mm nedbør i løpet av hendelsen, og i løpet av de fem siste dagene i forkant av hendelsen er det registrert 32 mm nedbør. For sep-hendelsen er det registrert 43 mm nedbør i løpet av hendelsen, og 22 mm nedbør de fem siste dagene i forkant av den. Hendelsen er kortere, og består av to regnhendelser.

En skjematisk framstilling av hvordan kalibrering og validering har blitt gjort er vist i figuren under. Her vises bare prinsippet for en av avstandsfordelingene, ett tak, og en hendelse. Outputen er en KGE og NSE-verdi for kalibreringen (hendelse 1), samt en KGE-verdi og NSE-verdi for hver av valideringene (hendelse 2, 3 og 4).



Figur 3.14: Skjematisk framstilling for kalibrering- og valideringsprosessen

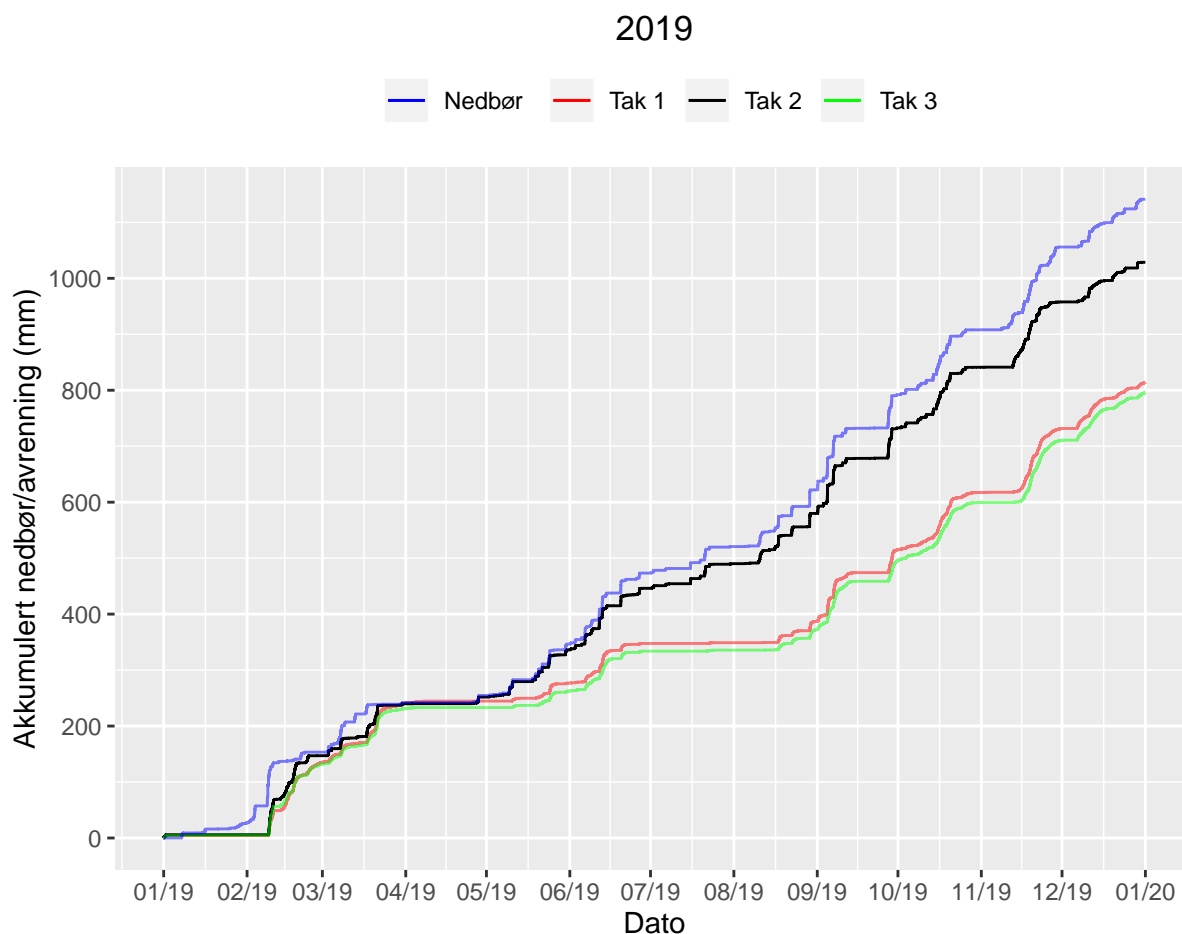
4. Resultater

For å få et innblikk i de grønne takenes virkningsgrad, vil det i dette kapitlet presenteres resultater fra målinger knyttet til takene. Det vil bli sett på takenes evne til tilbakeholdelse og fordrøyning for ulike regnhendelser, samt en periode med snøsmelting. Deretter framstilles et resultat fra forsøket for mettet hydraulisk konduktivitet i LECA. Til slutt vil resultatene fra DDD-modellen presenteres. Her gjengis resultater fra kalibrering og validering av DDD-modellen, samt sammenlignes modellens beregnede evapotranspirasjon med målt evapotranspirasjon vha vannbalanseligningen. I størst mulig grad vil resultatene presenteres uten videre diskusjon, men enkelte kommentarer vil forekomme der det er nødvendig.

4.1 Analyse av takenes hydrologiske effekt

4.1.1 Tilbakeholdelse

Et kumulativt plot for årlig nedbør og avrenning er vist i figur 4.1. Serien strekker seg fra 01.01.2019-31.12.2019, men som nevnt i kapittel 3.2.1 er hendelsene i februar og desember fjernet. Nedbørmåleren registrerte 1141 mm nedbør i løpet av denne tidsperioden, og totalt registret avrenning var 814 mm, 1029 mm og 795 mm for henholdsvis tak 1, tak 2 og tak 3. Tilbakeholdelsen for de tre takene var dermed 29 %, 10 % og 30 %.



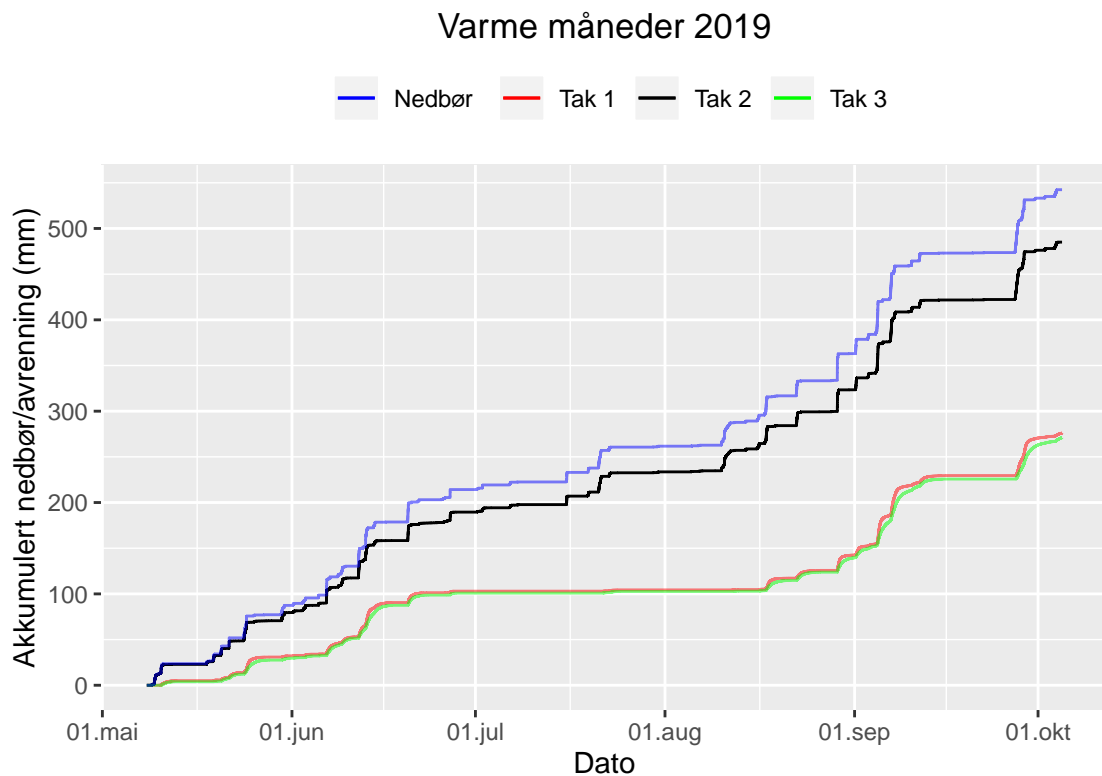
Figur 4.1: Kumulativt plot for hele 2019

Fra det kumulative plotet ser det ut til at tilbakeholdelsen for takene varierer stort mellom de ulike årstidene. For å se på forskjellen i hvordan de grønne takene virker gjennom året, ble året derfor delt opp i 4 sesonger. De ulike sesongene defineres på følgende måte: vinteren er desember, januar og februar; våren er mars, april og mai; sommeren er juni, juli og august; høsten er september, oktober og november. I tabell 4.1 presenteres registrert nedbør og avrenning for de ulike sesongene, samt den prosentvise tilbakeholdelsen for hver sesong. Tabell med nedbør- og avrenningsverdier for hver måned kan sees i C.

Tabell 4.1: Sesongvis tilbakeholdelse for 2019

Årstid	Nedbør (mm)	Avrenning (mm)			Tilbakeholdelse (%)		
		Tak 1	Tak 2	Tak 3	Tak 1	Tak 2	Tak 3
Vinter	238	218	218	217	8	8	9
Vår	193	142	189	130	26	2	33
Sommer	276	110	244	110	60	12	60
Høst	434	344	378	338	21	13	22
Totalt	1141	814	1029	795	29	10	30

Av tabellen over kan man se at virkningsgraden med tanke på tilbakeholdelse for de grønne takene helt klart er størst om sommeren. Dersom man definerer alle måneder hvor $T_{min} > 0^{\circ}\text{C}$ som varme måneder, får man et kumulativt plot som vist i figur 4.2. Perioden strekker seg fra 8.mai-4.oktober, og det er registrert 542.5 mm nedbør. For tak 1, tak 2, og tak 3 er den registrerte avrenningen henholdsvis 276 mm, 485 mm og 271 mm. Tak 1 og tak 3 holder tilbake 50 % av all nedbør, og fra midten av juni til midten av august blir det aller meste av nedbøren holdt tilbake. Tak 2 holder tilbake 10 %, og dette viser at selv det sorte taket kan fordampe en del av nedbøren i løpet av de varme månedene.

**Figur 4.2:** Kumulativt plot for varme måneder

4.1.2 Fordrøyning

Hvordan takene fungerer med tanke på fordrøyning vurderes ut fra reduksjon av flomtoppen, samt hvor lenge avrenningen forsinkes. I følgende avsnitt vil det presenteres utvalgte regnhendelser og avrenningsrespons fra takene. Det ble valgt ut ulike typer nedbørhendelser for å vurdere takenes evne til fordrøyning, og nedbørkarakteristikkene er presentert i tabell 4.2. Enkelte hendelser har kort varighet og høy maksintensitet, mens andre hendelser har lengre varighet og høy total nedbørmengde, men lavere maksintensitet.

Tabell 4.2: Nedbørkarakteristikker for ulike hendelser

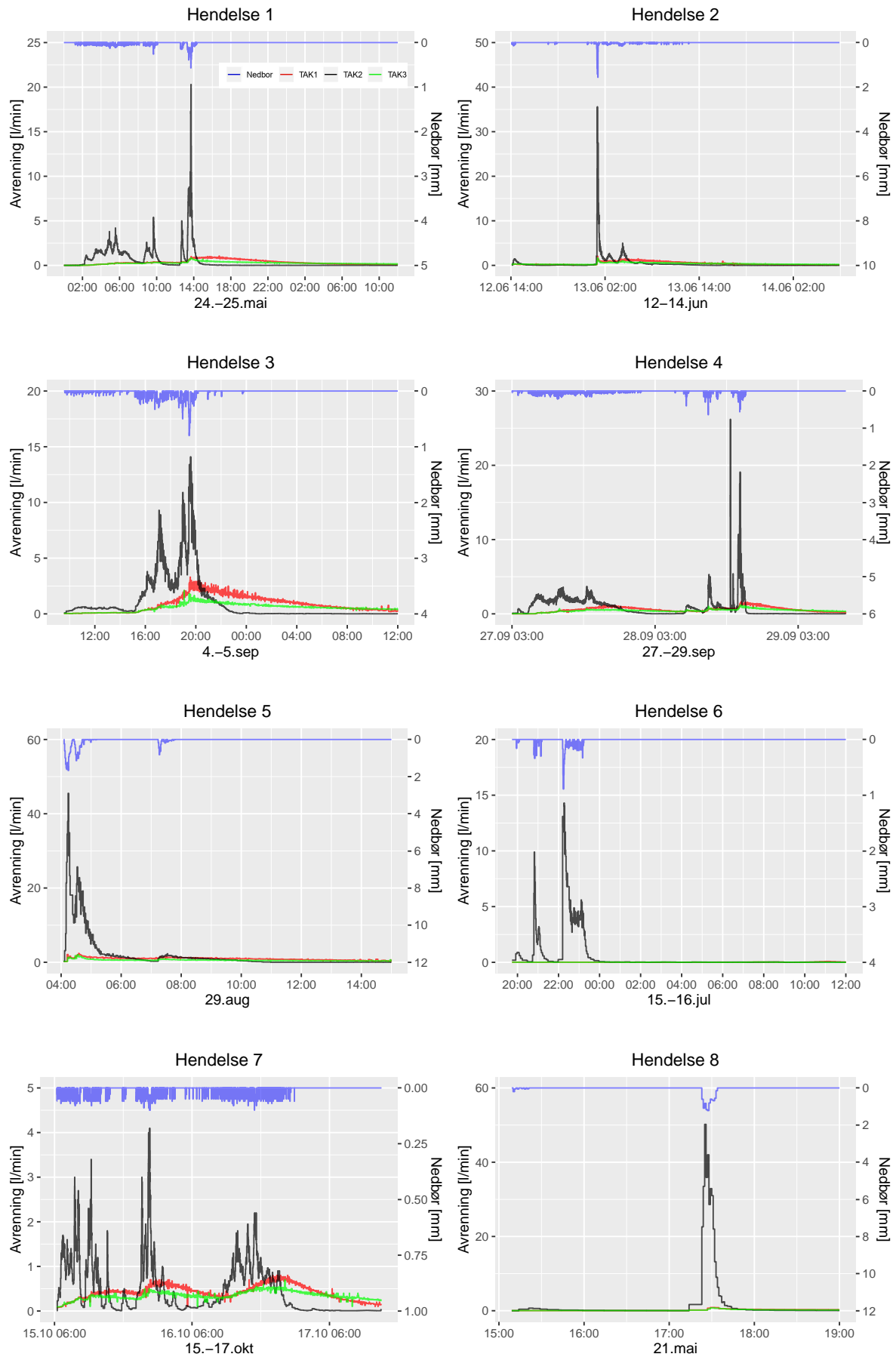
Nr.	Hendelse	Varighet (TT:mm)	Nedbørmengde (mm)		Nedbørintensitet (mm/t)	
	Start		Total	Høyeste 5 min	Snitt	Høyeste 5 min
1	24.05.19 01:13	05:10	23.9	1.85	4.63	22.20
2	12.06.19 14:06	03:10	22.7	5.67	7.16	68.04
3	04.09.19 09:32	05:33	36.0	3.07	6.49	36.84
4	27.09.19 03:00	14:11	57.7	1.82	4.07	21.84
5	29.08.19 04:06	01:06	29.1	7.5	26.45	90.00
6	15.07.19 19:57	01:09	10.43	2.94	9.07	35.28
7	15.10.19 06:24	13:32	32.55	0.4	2.41	4.80
8	21.05.19 15:10	00:17	8.84	5.12	31.2	61.44

I tillegg til at det ble sett på den totale nedbørmengden for hele hendelsen, ble den høyeste målte nedbørmengden over fem minutter funnet for hver hendelse. Av nedbørhendelsene som ble valgt ut, var det kun hendelse 5 som tilsvarte en gitt returperiode på IVF-kurven for Rustadskogen (Ås). Den tilsvarte 5-årsregn for fem minutters varighet. Hendelse 2 og 8 var like i underkant av 2-årsregn for fem minutters varighet. I figur 4.3 er nedbør og avrenningsrespons for alle hendelsene gitt.

For avrenningen sammenlignes de grønne takene med det sorte taket, og resultatet kan sees i tabell 4.3. Det blir sett på hvor lang tørrværperioden (TVP) i forkant av nedbørhendelsen har vært, altså hvor lenge det er siden det siste registrerte regnet før hendelsen. Det blir også sett på hvor mye flomtoppen for de grønne takene reduseres og forsinkes, sammenlignet med det sorte taket. Til slutt sees det på hvilken gjennomsnittstemperatur det er gjennom hele nedbør- og avrenningshendelsen.

Tabell 4.3: Avrenning fra de grønne takene sammenlignet med det sorte taket

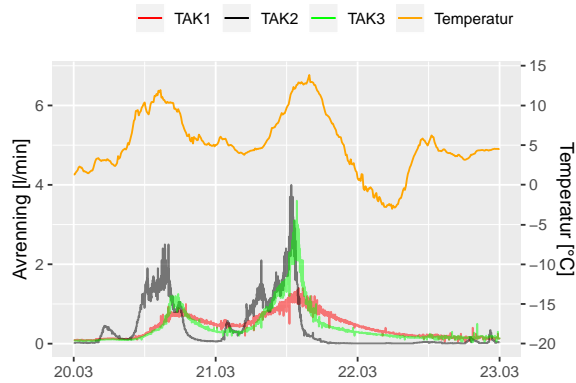
Nr.	Hendelse	Maksavrenning (l/min)			Reduksjon (%)		Forsinkelse (TT:mm)		Temp(°C)
	TVP (TT:mm)	Tak 1	Tak 2	Tak 3	Tak 1	Tak 3	Tak 1	Tak 3	
1	53:34	1.05	20.3	0.83	95	96	03:02	00:00	9.8
2	07:58	2.05	35.6	1.65	94	95	00:02	00:02	10.7
3	24:46	3.30	14.1	2.10	77	85	00:00	00:00	11.4
4	116:20	1.65	26.2	1.20	93	95	01:48	01:38	9.7
5	18:16	2.40	45.5	2.05	95	95	00:21	00:20	17.5
6	190:58	0	14.3	0	100	100	-	-	13.1
7	22:45	0.80	4.1	0.70	80	83	21:28	23:36	5.6
8	25:16	0.87	50.2	0.77	98	98	00:04	00:04	13.8



Figur 4.3: Nedbør (blå) og avrenning fra tak 1 (rød), tak 2 (sort) og tak 3 (grønn) for de ulike hendelsene

Snøsmelting

I tabell 4.1 ble forskjellen i tilbakeholdelse for ulike sesonger vist. Sommermånedene presterer helt klart best, men også om våren og høsten oppnås en god del tilbakeholdelse. I figuren nedenfor vises en periode med snøsmelting i mars 2019. Det er registrert 36 mm avrenning fra takene, men bare 1 mm nedbør i nedbørmåleren.



Figur 4.4: Snøsmelting i mars 2019

Fra figuren kan man se at avrenningsresponsen fra takene følger svingningene i temperaturen. Den viser også at den første flomtoppen som følger av snøsmelting er lavere for de grønne takene enn for det sorte taket, mens den andre toppen kun dempes nevneverdig for tak 1. Den andre flomtoppen dempes bare med 10 % for tak 3, mens tak 1 demper den med 65 %.

4.2 Bokspermeameter testen

Resultatene fra bokspermeameter testen er presentert i tabell 4.4. Disse resultatene omhandler bare prøver av LECA-laget, det vil si at sedumlaget er tatt bort. Utregningen av den mettede hydrauliske konduktiviteten er gitt i ligning 3.2. Enkelte av parametrene var konstant for hver prøve, og gjengis derfor bare en gang; Trykkhøyden ut av mariottesylinderen (H_a) er 0.188 m; Trykkhøyden ved overløpshullet (H_b) er 0.065 m; mariottesylinderens tverrsnittareal (A) er 0.007854 m².

Tabell 4.4: Resultater fra bokspermeameter testen

Parametere	Tak 1			Tak 3		
	Prøve 1	Prøve 2	Prøve 3	Prøve 1	Prøve 2	Prøve 3
L (m)	0.109	0.124	0.086	0.12	0.116	0.101
h (cm)	2	2	2	4.2	2	2
t (s)	22	34	51	182	66.5	57.5
Q (m ³ /s)	1.28E-06	8.29E-07	5,53E-07	3.25E-07	4.24E-07	4.90E-07
K (m/s)	1.45E-04	1.06E-04	4.92E-05	4.04E-05	5.09E-05	5.13E-05
K (mm/s)	0.145	0.106	0.0492	0.0404	0.0509	0.0513
K _{snitt} (m/s)	1.00E-04			4.75E-05		

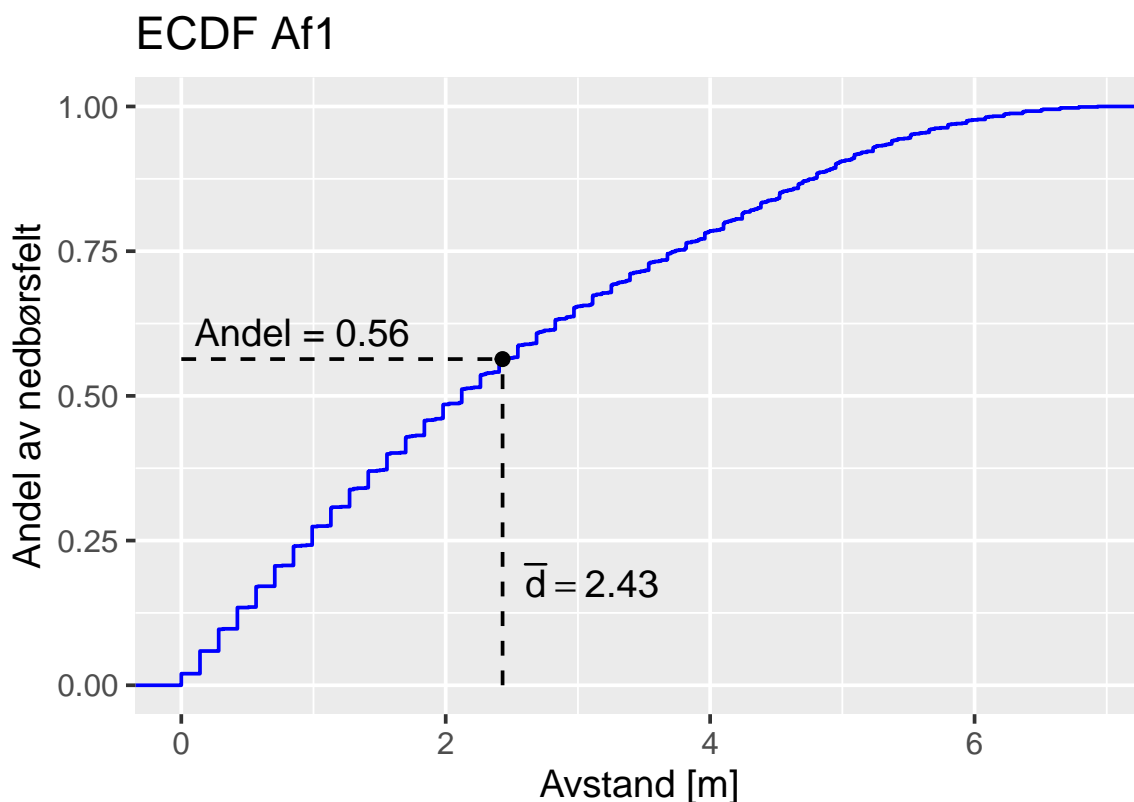
4.3 DDD-modellen

4.3.1 Avstandsfordeling

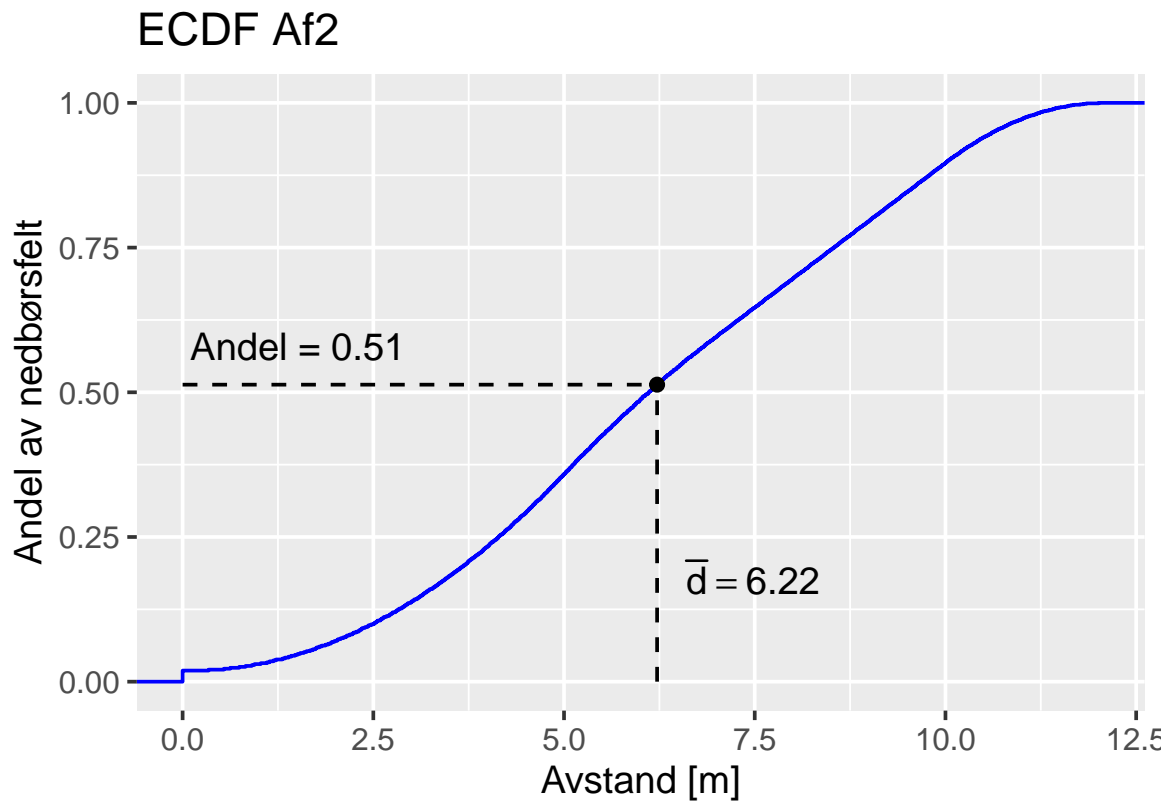
Resultatene fra avstandsfordelingen er summert opp i tabell 4.5. Figur 4.5 og 4.6 viser den empiriske kumulative fordelingen (*eng: empirical cumulative distribution function (ECDF)*), hvor x-aksen er avstand fra felt til sluk og y-aksen representerer andel areal til det totale nedbørsfeltet. I figur 4.5 utgjør avstandene opp til middelværdien 56 % av arealet til nedbørsfeltet. Samme observasjon for figur 4.6 gir 51 % av arealet til nedbørsfeltet. Noter at Af1 sin avstandsfordeling er eksponentialfordelt, mens Af2 ser mer normalfordelt ut. Kurven til Af1 er mer hakkete ettersom det er flere like avstander.

Tabell 4.5: Parameterne fra avstandsfordelingene

Avstandsfordeling	d_{max} [m]	\bar{d} [m]
Af1	6.93	2.43
Af2	12.01	6.22



Figur 4.5: Empirisk kumulativ fordeling (ECDF) av Af1



Figur 4.6: ECDF av Af2

4.3.2 Kalibrering

Målet med kalibreringen er å bestemme vannets snitthastighet i taket, hastighetene i metningslagene og magasinkapasiteten ved hjelp av parameterne shape (Gsh) og scale (Gsc). Begge avstandsfordelingene ble kalibrert for to ulike hendelser på begge takene; en i september og en i juni. På denne måten fikk man testet hvordan modellen fungerer når initialtilstanden på taket varierer, og regnhendelsen utarter seg ulikt.

Af2 oppnådde bedre KGE- og NSE-verdier ved kalibreringen enn Af1 for begge tak og begge hendelser, bortsett fra KGE-verdien for sep-hendelsen på tak 3. Videre er det en betydelig forskjell mellom tak 1 og tak 3 for juni-hendelsen. Sep-hendelsen ender opp med best resultat for begge tak og avstandsfordelinger. Alle resultatene fra kalibrering av modellen er presentert under. Tabell 4.6 viser resultater fra avstandsfordeling 1, og tabell 4.7 viser resultater fra avstandsfordeling 2.

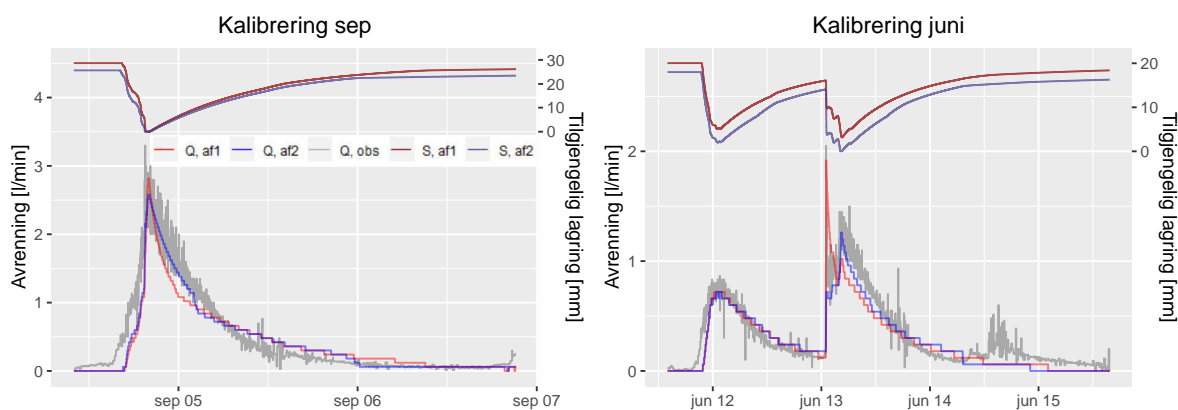
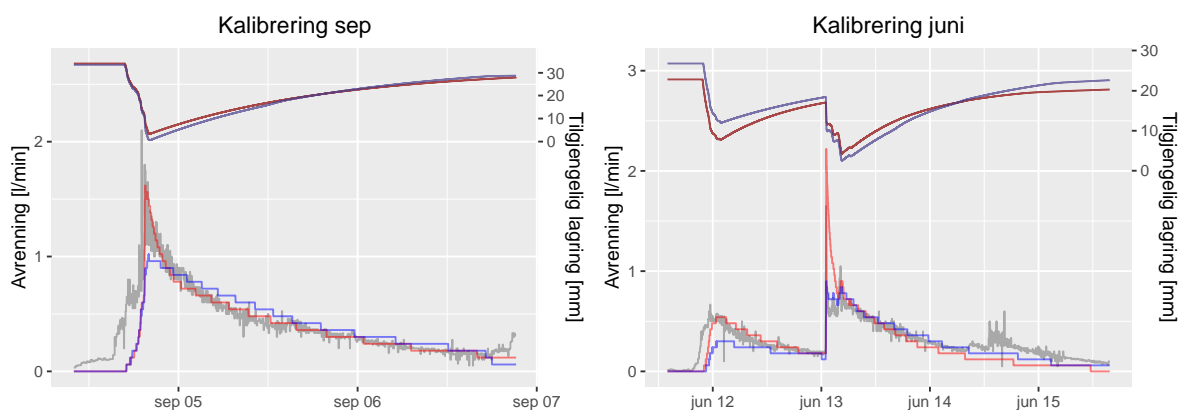
Tabell 4.6: Resultater for kalibrering med avstandsfordeling 1

Kalibrering		\bar{v} (m/s)	Gsh (-)	Gsc (-)	NSE	KGE
Tak 1	jun	1.51E-05	0.7784	0.000479	0.81	0.79
	sep	1.32E-05	0.5110	0.000639	0.86	0.86
Tak 3	jun	1.23E-05	0.9090	0.000333	0.30	0.33
	sep	8.65E-06	0.8225	0.000260	0.79	0.77

Tabell 4.7: Resultater for kalibrering med avstandsfordeling 2

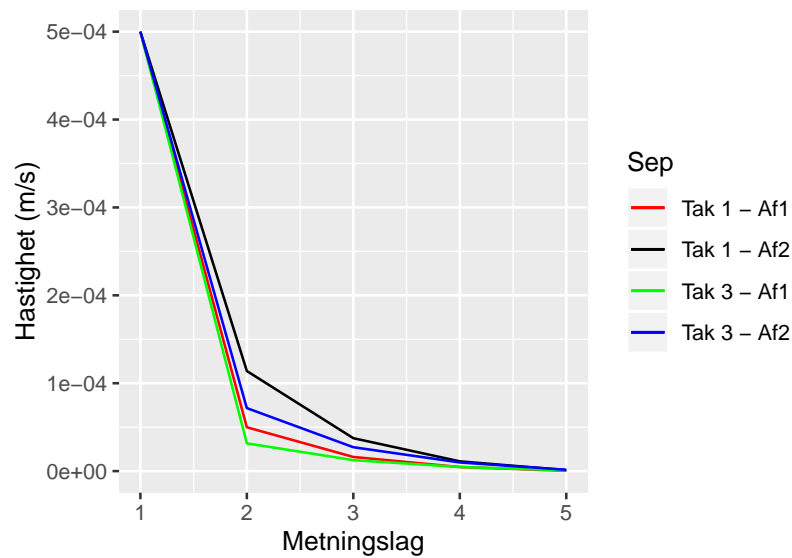
Kalibrering		\bar{v} (m/s)	Gsh (-)	Gsc (-)	NSE	KGE
Tak 1	jun	3.09E-05	0.9939	0.000300	0.84	0.84
	sep	3.02E-05	0.5310	0.000549	0.90	0.90
Tak 3	jun	1.93E-05	1.1614	0.000160	0.62	0.62
	sep	1.95E-05	0.7360	0.000255	0.84	0.69

I figurene under presenteres en grafisk framstilling av observert avrenning og simulert avrenning (Q), samt simulert endring i tilgjengelig lagring (S) underveis i hendelsen. Når $S = 0$, vil det si at magasinkapasiteten (M) er brukt opp, og det oppstår overflateavrenning. Avstandsfordeling 1 og 2 presenteres i samme plot, slik at de lett kan sammenlignes. I figur 4.7 vises resultatene for tak 1, og i figur 4.8 vises resultatene for tak 3.

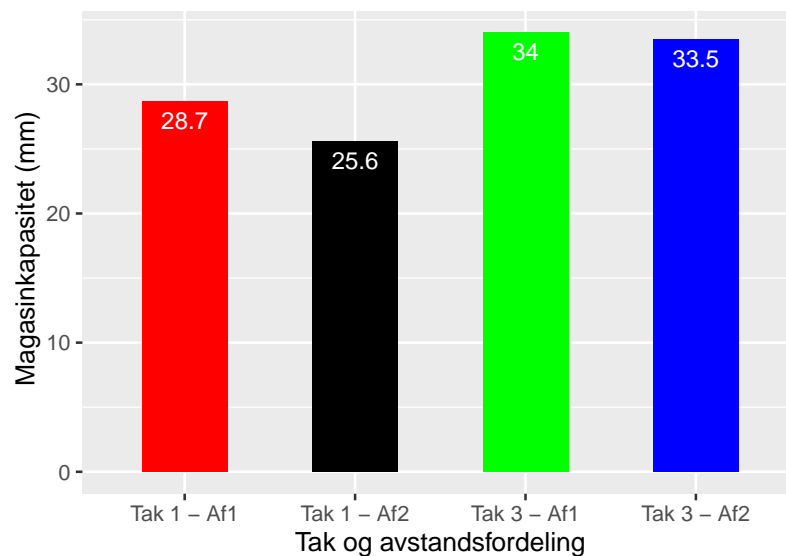
**Figur 4.7:** Observert (grå) og simulert avrenning fra Af1 (rød) og af2 (blå), samt tilgjengelig lagringskapasitet for Af1 (mørkerød) og af2 (mørkeblå) på tak 1**Figur 4.8:** Observert (grå) og simulert avrenning fra Af1 (rød) og af2 (blå), samt tilgjengelig lagringskapasitet for Af1 (mørkerød) og af2 (mørkeblå) på tak 3

Kalibreringen av sep-hendelsen oppnåde best resultater, og er derfor brukt som data-grunnlag i figur 4.9 og 4.10.

Figur 4.9 illustrerer den kalibrerte hastigheten til de ulike metningslagene. Lag 1 tilsvarer avrenning på overflaten og er en satt verdi i parameterfila. Lag 2-5 viser hastighetene gitt av ligning 3.14 med synkende hastighet for hvert lag. Af2 har raskeste hastighet i alle metningslag. Fra gammafordelingen gitt av kalibrerte Gsh og Gsc verdier bestemmes en maks lagringskapasitet M (ligning 3.16). Estimater varierer for begge tak og avstandsfordeling illustrert i figur 4.10. "Tak 3 - Af1" estimerer høyest magasinkapasitet med 34 mm mens laveste estimat tilhører "Tak 1 - Af2" med 25.6 mm.



Figur 4.9: Metningslag med tilhørende hastighet.



Figur 4.10: Estimert magasinkapasitet for begge tak og avstandsfordelinger

4.3.3 Validering

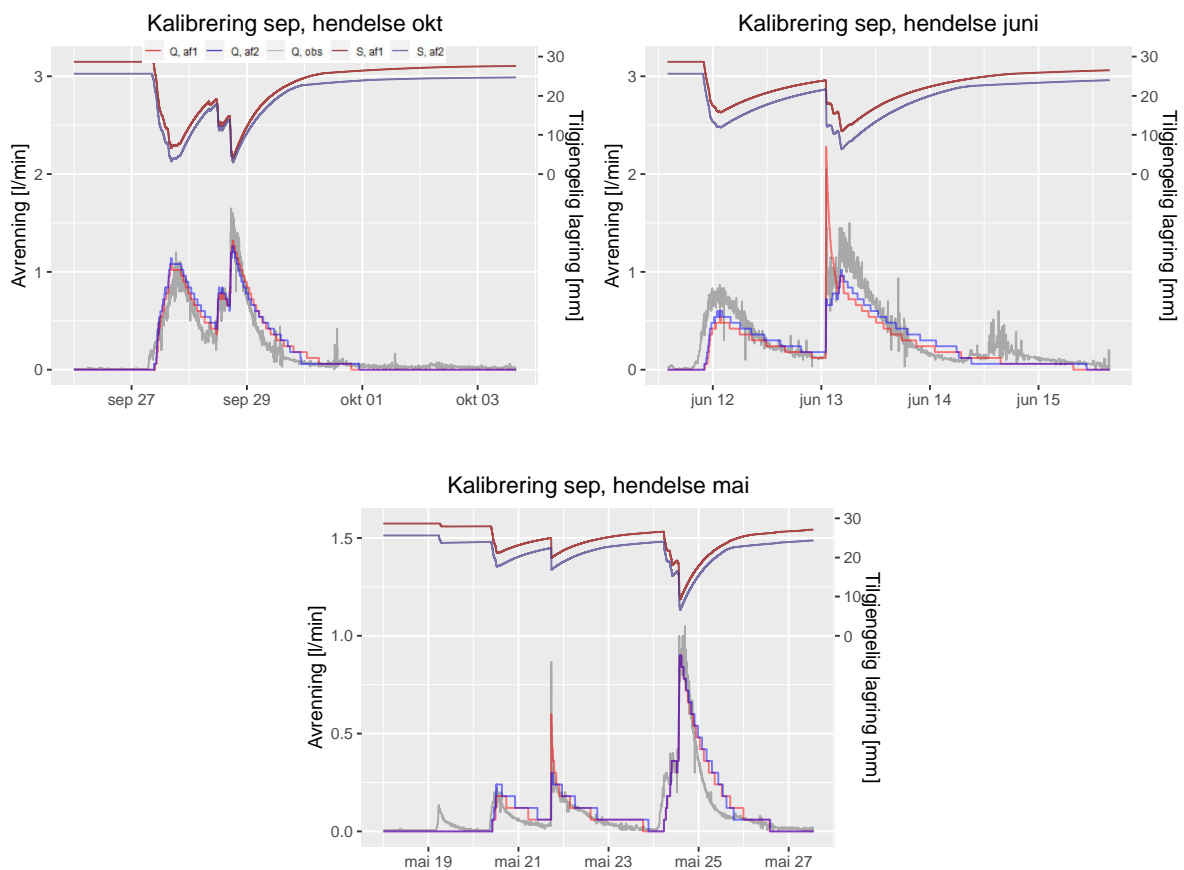
Resultater fra validering av modellene blir gitt i dette avsnittet, og presenteres med tabeller og figurer.

Tak 1

NSE- og KGE-verdier for validering av sep-hendelsen vises i tabell 4.8. Grafer for simulert og observert avrenning, samt magasinkapasitet vises i figur 4.11. Resultatene for juni-hendelsen vises i tabell 4.9 og figur 4.12.

Tabell 4.8: Validering for tak 1, sep-hendelsen

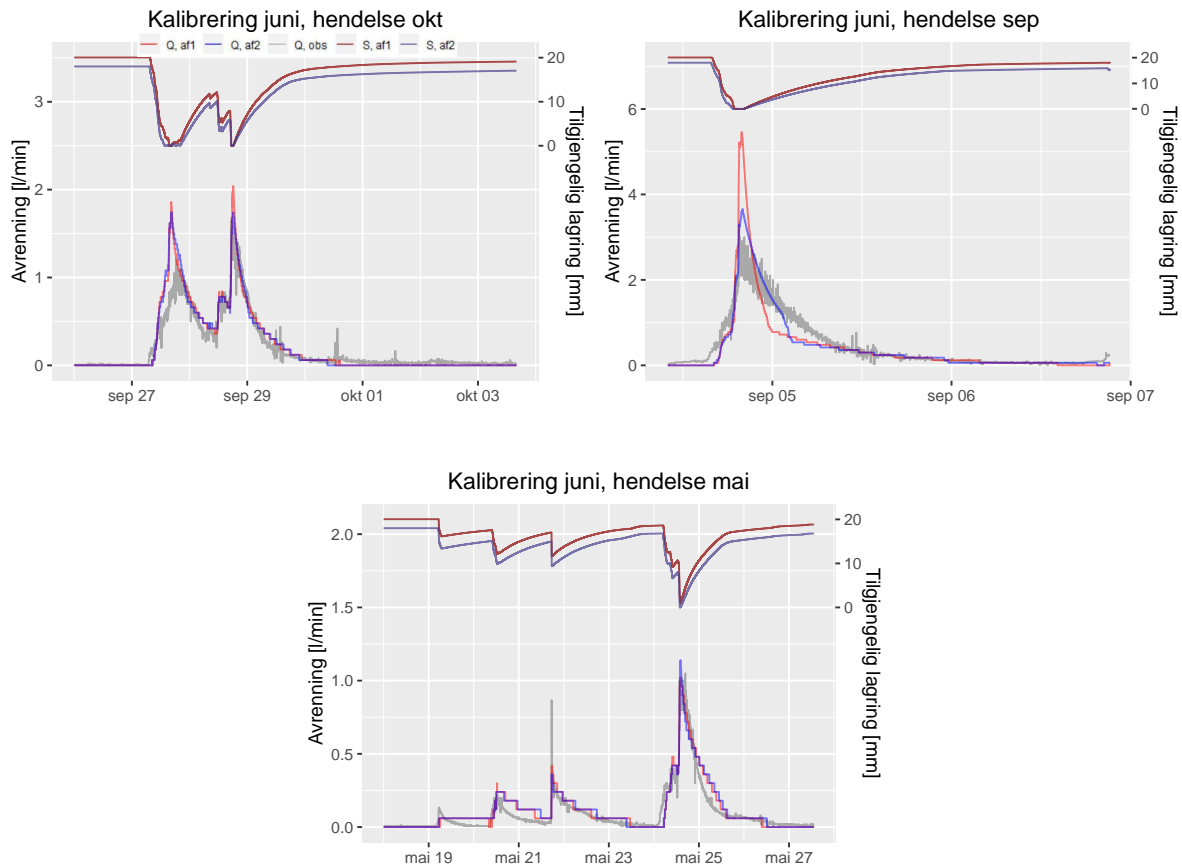
Kalibrering	Fordeling	Validering	KGE	NSE
sep	Af1	mai	0.83	0.88
		jun	0.70	0.68
		okt	0.88	0.92
	Af2	mai	0.79	0.84
		jun	0.80	0.77
		okt	0.88	0.89



Figur 4.11: Observert (grå) og simulert avrenning fra Af1 (rød) og af2 (blå), samt tilgjengelig lagring for Af1 (mørkerød) og af2 (mørkeblå) for valideringshendelsene. Med parametere fra sep-kalibreringen på tak 1

Tabell 4.9: Validering for tak 1, juni-hendelsen

Kalibrering	Fordeling	Validering	KGE	NSE
jun	Af1	mai	0.81	0.89
		sep	0.51	0.51
		okt	0.83	0.83
	Af2	mai	0.78	0.86
		sep	0.70	0.84
		okt	0.83	0.82



Figur 4.12: Observert (grå) og simulert avrenning fra Af1 (rød) og af2 (blå), samt tilgjengelig lagring for Af1 (mørkerød) og af2 (mørkeblå) for valideringshendelsene. Med parametere fra juni-kalibreringen på tak 1

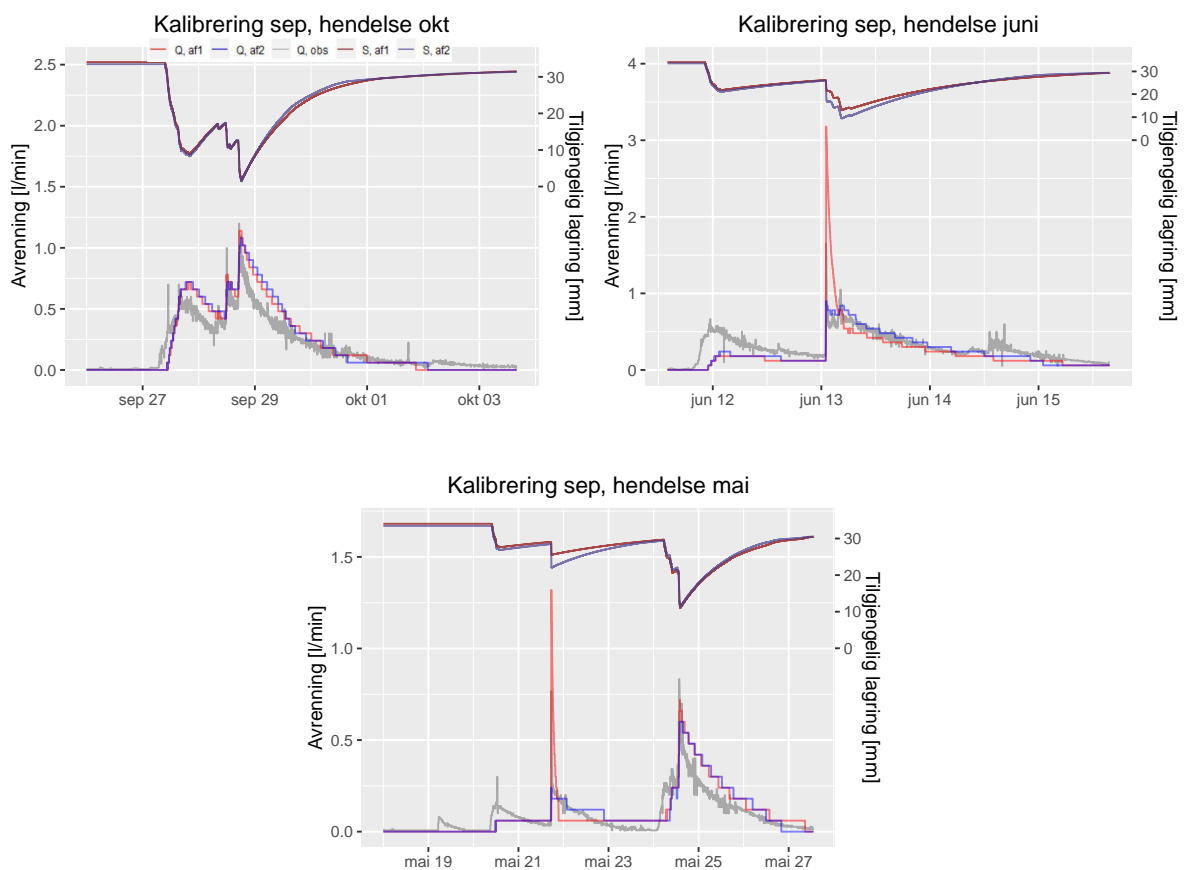
På tak 1 oppnår både sep- og juni-kalibreringen gode KGE- og NSE-verdier for begge avstandsfordelingene. Totalt sett er resultatet best for sep-kalibreringen og avstandsfordeling 2, men for mai- og oktoberhendelsene er resultatene ganske like for de to avstandsfordelingene. Juni-kalibreringen oppnår dårligst valideringsresultat for sep-hendelsen, og vice versa. Det er dette som skiller Af1 fra af2, her kommer nemlig avstandsfordeling 1 ganske mye dårligere ut enn avstandsfordeling 2. Generelt følger den modellerte avrenningen forløpet til den observerte avrenningen, men modellen sliter litt med de aller minste flomtoppene.

Tak 3

I følgende avsnitt vil resultatene fra validering på tak 3 presenteres på samme måte som for tak 1. Først vises valideringsresultater for sep-kalibreringen i tabell 4.10 og figur 4.13. Deretter presenteres resultatene fra validering av juni-kalibreringen i tabell 4.11 og figur 4.14. Til slutt oppsummeres resultatene fra valideringer av begge kalibreringene kort. En videre diskusjon av resultatene kan leses i kapittel 5.

Tabell 4.10: Validering for tak 3, sep-hendelsen

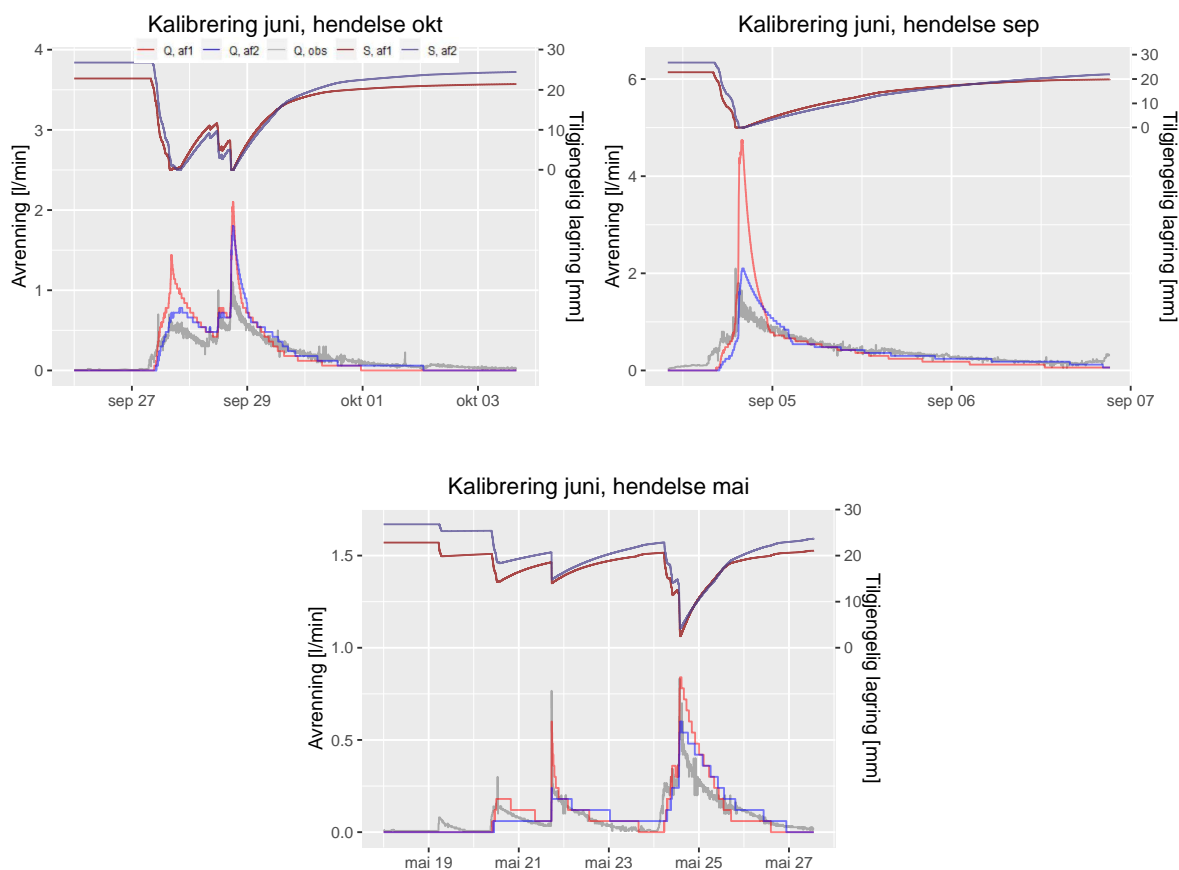
Kalibrering	Fordeling	Validering	KGE	NSE
sep	Af1	mai	0.69	0.48
		jun	-0.21	-0.55
		okt	0.79	0.80
	Af2	mai	0.80	0.62
		jun	0.48	0.47
		okt	0.75	0.73



Figur 4.13: Observert (grå) og simulert avrenning fra Af1 (rød) og af2 (blå), samt tilgjengelig lagring for Af1 (mørkerød) og af2 (mørkeblå) for valideringshendelsene. Med parametere fra sep-kalibreringen på tak 3

Tabell 4.11: Validering for tak 3, juni-hendelsen

Kalibrering	Fordeling	Validering	KGE	NSE
jun	Af1	mai	0.70	0.55
		sep	-0.44	-1.92
		okt	0.50	0.27
	Af2	mai	0.83	0.69
		sep	0.49	0.52
		okt	0.63	0.58



Figur 4.14: Observert (grå) og simulert avrenning fra Af1 (rød) og af2 (blå), samt tilgjengelig lagring for Af1 (mørkerød) og af2 (mørkeblå) for valideringshendelsene. Med parametere fra juni-kalibreringen på tak 3

Resultatene fra validering av juni- og sep-kalibreringen på tak 3 viser mye av det samme som for tak 1. Begge kalibreringene oppnår litt dårligere resultater enn de respektive kalibreringene for tak 1, men generelt oppnås bedre KGE- og NSE-verdier for validering av sep-kalibreringen. Det oppnås bedre resultater for avstandsfordeling 2 enn for avstandsfordeling 1, og spriket mellom dem er større for tak 3 enn for tak 1. I likhet med tak 1, oppnår juni-kalibreringen det dårligste valideringsresultatet for sep-hendelsen, og vice versa. Det er verdt å merke seg at NSE-verdiene for disse hendelsene er negative for Af1, som vil si et gjennomsnitt av de observerte verdiene er et bedre estimat på avrenning enn modellsimuleringen.

4.3.4 Beregning av evapotranspirasjon

Et av målene med denne oppgaven er å sammenligne evapotranspirasjon beregnet fra modellen, og målt evapotranspirasjon fra takene. Målt evapotranspirasjon fra takene kan finnes ved hjelp av vannbalanselikningen gitt i ligning 2.1 ($E = P - R - \frac{dS}{dt}$). Resultatene fra målt og beregnet evapotranspirasjon kan sees i tabell 4.12 og tabell 4.13. For enkelhets skyld er det kun sammenlignet resultater fra sep-kalibreringen, men begge avstandsfordelingene er representert. På denne måten kan man se hvordan modellen presterer med tanke på evapotranspirasjon for hver avstandsfordeling, og på denne måten få et innblikk i hvilken avstandsfordeling som passer best for modellering av de grønne takene.

Tabell 4.12: Evapotranspirasjon fra tak 1

Hendelse	P (mm)	R (mm)	dS (mm)	E _{obs} (mm)	E _{ddd} (mm)		E _{Avvik} (%)	
					Af1	Af2	Af1	Af2
mai	53.5	25.73	11.76	16.01	19.41	18.45	21	15
juni	48.16	36.16	5.11	6.89	11.09	10.73	61	56
sep	43.07	31.56	9.37	2.14	2.79	2.66	30	24
okt	61.53	43.07	11.98	6.48	4.27	4.16	-34	-36

Tabell 4.13: Evapotranspirasjon fra tak 3

Hendelse	P (mm)	R (mm)	dS (mm)	E _{obs} (mm)	E _{ddd} (mm)		E _{Avvik} (%)	
					Af1	Af2	Af1	Af2
mai	53.5	23.42	14.21	15.87	21.05	20.78	33	31
juni	48.16	34.08	6.32	7.76	11.92	11.60	54	49
sep	43.07	27.80	13.77	1.50	3.49	3.24	133	117
okt	61.53	41.19	13.23	7.11	4.71	4.43	-34	-38

5. Diskusjon

I dette kapitlet diskuteres resultatene fra kapittel 4. Det er to hovedelementer som skal diskuteres; de grønne takenes virkningsgrad og resultatene fra DDD-modellen. Virkningsgraden bedømmes ut ifra på takenes dempende og tilbakeholdende effekt. Diskusjonspunkter knyttet til resultatene fra DDD-modellen er blant annet avstandsfordelingene, estimert magasinkapasitet og evapotranspirasjon.

5.1 Takenes hydrologiske effekt

De grønne takene skal på årlig basis holde tilbake nedbør, og på hendelsesbasis fordrøye den. For å få et innblikk i hvordan takene fungerer, må de sammenlignes med nedbørmålinger og det sorte referansetaket (tak 2). Det er også av interesse å sammenligne resultatene fra denne studien med andre studier, spesielt fra Norge. Aller først vil usikkerheten som er knyttet til målingene drøftes.

5.1.1 Usikkerheter rundt målingene

Som nevnt i kapittel 3, er det knyttet en del usikkerhet til nedbørmålingene på vinterstid. Når tidsrommene i februar og desember ble fjernet, kan det hende at det faktisk snødde i løpet av denne perioden. Dette fører til at det muligens ble akkumulert snø på takene, og at det kan være registrert for mye avrenning i etterkant enn hva som er registrert av nedbør. I brukermanualen til Ott Pluvio² (OTT, 2019) er det spesifisert at det må tilsettes frostvæske så snart gradestokken viser minusgrader, og det er usikkert om dette har blitt gjort i løpet av nedbørmålerens levetid. Nedbørmålerens plassering kan også diskuteres. Tanken bak plasseringen var at måleren skulle plasseres i samme høyde og i nærhet til takene, slik at man kunne fange opp samme nedbør som takene (Trommald og Øyre, 2018). Fordi nedbørmåleren er plassert så tett på takene, og plasseringen er mellom takene og høye trær, kan turbulenseffekter føre til oppfangingsvikt.

På grunn av den lave oppløsningen for logging av volumendring i tanken, er det også knyttet en liten usikkerhet til avrenningen fra takene. Dette kommer av at en liten andel av volumendringen kan skyldes trykksensorens feilmargin. En annen usikkerhet er

at tankene tømmes i løpet av en nedbørhendelse. Dersom maksavrenning forekommer under tømmesekvensen, vil ikke lineær interpolasjon av avrenningsintensitet før og etter tømmingen få med seg denne maksavrenningen.

5.1.2 Takene ved planteskolen

Når man studerer virkningsgraden til de grønne takene, er det spesielt to aspekter som er interessante. Det ene handler om hvor mye av den årlige nedbøren som blir tilbakeholdt (fordamper). Sammenlignet med årlig nedbør, reduseres avrenningen fra takene med 29 % (tak 1) og 30 % (tak 3). Grad av tilbakeholdelse varierer gjennom året, og størst reduksjon observeres om sommeren. Dette resultatet er som forventet, da evapotranspirasjon er sterkt relatert til solinnstråling. I løpet av de varme månedene, holder begge takene tilbake 50 % av all registrert nedbør.

Det andre, og kanskje mest interessante aspektet for anlegging av grønne tak, er evnen de har til å fordrøye nedbøren. I tabell 4.2, tabell 4.3 og figur 4.3 ble det vist hvordan avrenningsresponsen for de tre takene var ved ulike nedbørhendelser. For de åtte utvalgte regnhendelsene, ble flomtoppene i gjennomsnitt redusert med 91.5 % (tak 1) og 93.4 % (tak 3), sammenlignet med tak 2. Medianverdiene for flomtoppreduksjon var så høy som 94.5 % for tak 1, og 95 % for tak 3. Den hendelsen hvor flomtoppen reduseres mest, er hendelse 6 (15.-16. juli 2019). I forkant av hendelsen er det ikke registrert nedbør eller avrenning fra de grønne takene i løpet av den siste uka, så det antas at taket er helt tørt. Selve nedbørhendelsen varer i ca en time, har lav total nedbørmengde og ganske lav maksintensitet. For denne hendelsen reduseres flomtoppen på begge takene med 100 % (ikke registrert avrenning i løpet av perioden).

Den laveste reduksjonen for tak 1 og tak 3 finner man for hendelse 3 (4.-5.sep) og hendelse 7 (15.-17.okt). For hendelse 3 ble flomtoppen redusert med 77 % fra tak 1, og 85 % fra tak 3. Til tross for at det er over ett døgn siden siste registrerte nedbør, er det registrert litt avrenning fra begge de grønne takene i løpet av den siste timen før nedbørhendelsen starter. Derfor kan det antas at takene er mettet over feltkapasitet når det begynner å regne. For hendelse 7 reduseres flomtoppen fra tak 1 med 80 %, og fra tak 3 med 83 %. I forkant av denne nedbørhendelsen er det i overkant av 22 timer siden siste registrerte nedbør. Det er likevel registrert noe avrenning fra de to grønne takene i løpet av den siste timen før nedbøren starter. Derfor kan man anta at også for denne hendelsen, er takene mettet over feltkapasitet når nedbøren starter. Felles for selve nedbørhendelsene 3 og 7, er at det er to av de tre største hendelsene med tanke på varighet og total nedbørmengde. Hendelse 3 varer i 5 timer og 33 minutter, og har en total nedbørmengde på 36 mm. Hendelse 7 varer i 13 timer og 32 minutter, og har en total nedbørmengde på 32.55 mm.

Det er også studert en hendelse med snøsmelting i mars 2019 (4.4). Her er det to dager med temperaturer opp mot 15 °C etter hverandre. Flomtoppen fra de grønne takene dempes bra den første dagen, men ikke fullt så bra dag nummer to. Likevel er avrenningen mindre fra de grønne takene kontra referansetak, som tyder på at man oppnår en dempende effekt også når takene er våte og kalde. I denne oppgaven er det bare sett på én hendelse med snøsmelting, noe som gjør det vanskelig å konkludere med takenes hydrologiske effekt under slike forhold.

Regnhendelser som er problematiske med tanke på urbane flommer, er gjerne de som har høyest nedbørintensitet. Som nevnt i avsnitt 4.1.2 er det bare én av regnhendelsene (hendelse 5) som for fem minutters varighet, tilsvarende en returperiode på 5 år for IVF-kurven ved Rustadskogen på Ås. Hendelse 2 og 8 er like i underkant av 2-årsregnet. Felles for disse nedbørhendelsene er at de varer relativt kort, men har en høy maksintensitet. I forkant av hendelse 5 er det ikke registrert avrenning fra takene i løpet av de siste 18 timene, og det kan antas at det er helt tørt på takene. For denne regnhendelsen observeres den nest høyeste maksavrenningen fra tak 2; 45.5 l/min. Tak 1 demper flomtoppen med 95 %, og tak 3 demper flomtoppen med 95 %. I forkant av hendelse 2 er det bare 8 timer siden forrige nedbørhendelse, og det er registrert avrenning fra takene når nedbørhendelse 2 starter. Til tross for dette reduseres flomtoppen med 94 % for tak 1, og 95 % for tak 2. Maksavrenning fra tak 2 viser 35.6 l/min. For nedbørhendelse 8 observeres den høyeste maksavrenningen fra tak 2 for alle hendelser, med sine 50.2 l/min. For denne hendelsen reduserer både tak 1 og tak 2 flomtoppen med 98 %. I forkant av nedbørhendelsen er det ikke registrert avrenning fra takene i løpet av den siste timene, og det vurderes at takene ikke er mettet til feltkapasitet.

Funnene viser en klar tendens til at de grønne takene klarer å redusere avrenningen fra de "problematiske" nedbørhendelsene på en veldig god måte. Det ser også ut til at takene reduserer flomtoppene minst for langvarige nedbørhendelser, hvor den totale nedbørmengden er stor, til tross for at de ikke har så høy maksintensitet. Dette kan tyde på at metningen av taket spiller en viktig rolle for avrenningsforløpet. Etterhvert som taket mettes, vil takets evne til å redusere flomtoppene reduseres. Likevel vises det at flomtoppen reduseres mye for juni-hendelsen, til tross for at taket er mettet når nedbøren starter. Disse funnene kan tyde på at det spesielt er to faktorer som påvirker hvor stor flomtoppreduksjon man kan oppnå; nedbørintensitet og metningsgrad. Med tanke på forsinkelse av flomtopp, kan det se ut til at lav maksintensitet på nedbøren, fører til lengre forsinkelse på flomtoppen. For de 7 hendelsene det er registrert avrenning fra de grønne takene, forsinkes flomtoppen i snitt med 3 timer og 49 minutter for tak 1, og 3 timer og 40 minutter fra tak 3. Medianen er derimot 21 minutter for tak 1, og 4 minutter for tak 3. Fordi det er liten variasjon i snitt-temperatur mellom hendelsene, er det vanskelig å si om temperaturen spiller noen rolle for fordrøyningen. Det eneste som

kan sees er at den hendelsen som har klart lavest snitt-temperatur (hendelse 7), er også den hvor tak 3 oppnår dårligst reduksjon av flomtopp. Det er likevel for få observasjoner til å konkludere med temperaturens påvirkning på reduksjon av flomtopp.

Av resultatene kan man se at både for tilbakeholdelse og fordrøyning, presterer tak 3 bedre enn tak 1. Det er ikke mye som skiller takene fra hverandre, men forskjellen er ganske konsistent. En bedre reduksjon av flomtopp kan skyldes at det er mer finstoff i tak 3 enn i tak 1 (som nevnt i avsnitt 3.3.1). Dette kan bidra til at vannet strømmer saktere mot utløpet, og at avrenningen dermed fordeler seg over et lengre tidsrom. Det kan også hende at LECA-materialet har satt seg forskjellig for de to takene, og at tak 3 er ”tettere” enn tak 1. Under sedum-mattene er det også en filtmatte. Dersom denne filten blir fylt med mer biologisk materiale for tak 3 enn for tak 1, kan dette også bidra til ”tettere” tak, og synkende strømningshastigheter. For tilbakeholdelsen er det to aspekter som kan bidra til at tak 3 holder tilbake mer enn tak 1. Det ene omhandler sedum-mattens vekstvilkår, og invadering av ugress. Dersom det er mer levende sedum på tak 3 enn på tak 1, kan dette bidra til økt evapotranspirasjon. I denne studien er det ikke gjort noen nærmere undersøkelser på vegetasjonsdekkets tilstand, så det er vanskelig å si om økt tilbakeholdelse kan skyldes variasjon i tilstand. En annen mulig årsak til økt tilbakeholdelse er det ovennevnte finstoffet. Finstoffet bidrar til tregere avrenningsrespons, som fører til at vannet er tilgjengelig for plantene over et lengre tidsrom.

5.1.3 Sammenligning av resultater med andre studier

De grønne takene ved planteskolen oppnår en gjennomsnittlig årlig tilbakeholdelse på 29 % og 30 % sammenlignet med målt årsnedbør. Disse verdiene er noe lavere enn hva som er funnet i en del utenlandske studier (Mentens mfl., 2006; VanWoert mfl., 2005), men litt høyere enn hva som er observert for grønne/grå tak i Norge (Braskerud, 2014; Hamouz mfl., 2018). Braskerud (2014) fant for to ekstensive grønne tak i Oslo, en gjennomsnittlig tilbakeholdelse på 24 % og 26 % i forhold til årsnedbør. Hamouz mfl. (2018) fant at for et rent LECA-basert tak i Trondheim, var den årlige tilbakeholdelsen 9 % i forhold til nedbørmengde fra 23.januar-30. november 2017. Dette bekrefter at tilbakeholdelsen i stor grad bestemmes av evapotranspirasjon fra vegetasjonsdekket. Takene ved planteskolen presterer litt bedre enn takene til Braskerud. Det er vanskelig å si om forskjellen skyldes byggetekniske ulikheter som for eksempel fall på taket, ulike fysiske forhold (solinnstråling, temperatur, kuldegroper etc.), eller om forskjellen faktisk kommer av mer tilgjengelig vann til plantene på grunn av det magasinerende sjiktet. Når man ser på tilbakeholdelsen i sommermånedene, presterer takene ved planteskolen mye bedre enn takene for de to andre studiene; Takene ved planteskolen holder tilbake 60 % av all nedbør, Braskerud (2014) observerte 36 % og 37 % tilbakeholdelse, mens de

LECA-baserte takene bare holdt tilbake 12 % av nedbøren (Hamouz mfl., 2018). Dette viser igjen at takenes evne til tilbakeholdelse i størst grad skyldes evapotranspirasjon. Funnene kan også tyde på at den økte årlige tilbakeholdelsen fra takene ved planteskolen, kommer av større lagringskapasitet i takene. Dette kan føre til at vannet er tilgjengelig for plantene over et lengre tidsrom, og dermed kan bidra til mer evapotranspirasjon. Likevel er sammenligningsgrunnlaget for lite til å konkludere med magasinetts bidrag til tilbakeholdelse.

Med tanke på fordrøyning viste Hamouz mfl. (2018) at redusert flomtopp for det LECA-baserte taket var 92 % i gjennomsnitt, og medianen var så høy som 95 %. Disse verdiene samsvarer veldig godt med funnene som er gjort i denne studien, og er høyere enn hva som er observert for andre grønne ekstensive tak (f.eks Fassman-Beck mfl. (2013), Stovin mfl. (2012) og Braskerud (2014)). Dette tyder på at fordrøyningen som oppnås ved bruk av et magasinerende sjikt med LECA under vegetasjonsdekket, er bedre enn for et vanlig, ekstensivt grønt tak.

Vurdering av fordeler og ulemper

Resultatene viser at de grønne takene ved planteskolen både holder tilbake årsnedbør, og fordrøyer flomtopper på en veldig god måte. Et kjapt (og forenklet) overslag basert på resultatene fra denne oppgaven gir oss følgende informasjon: Dersom ett av ti hus hadde vært anlagt med et grønt tak med magasinerende sjikt, kunne den samlede flomtoppen fra området blitt redusert med 10 %. Til tross for at dette er et veldig enkelt overslag, viser det at den hydrologiske effekten av slike grønne tak vil kunne bidra til lavere kostnader for andre typer overvannsanlegg. I tillegg kan det være et veldig viktig bidrag for å unngå at urensset avløpsvann havner i resipienten. Et slikt tak tar heller ikke opp mer bruksareal i urbane områder, enn hva et ordinært teknet tak gjør. Et annet positivt aspekt er at LECA-lagets fordrøyende egenskaper er mindre sensitivt for lave temperaturer og mettet initialtilstand. Dette gjør at slike kombinasjonstak kan fordrøye mer effektivt de månedene hvor temperaturen nærmer seg 0°C, og i områder som kan forvente mye, langvarig nedbør. En ulempe er at bærekonstruksjonen må være mer robust på grunn av økt vannmengde på taket, og derfor er det ikke sikkert at en slik løsning kan benyttes på eksisterende bygg. Det bør også gjøres en vurdering på byggekostnader kontra effekt.

5.2 Bokspermeameter testen

For å vurdere om det var en sammenheng mellom hastighetene kalibrert fra DDD-modellen, og den mettede hydrauliske konduktiviteten på takene, ble det utført et forsøk på LECA-materialet fra taket (beskrevet i avsnitt 3.3.2). Det er verdt å nevne at prøve

2 på tak 1 falt i bakken, og LECA-materialet i sylindere ble nok litt ristet. Fordi alle prøvene opplevde vibrasjoner når de ble hamret ned på taket, ble ikke prøven forkastet. Et annet diskusjonsmoment er hvorvidt LECA-materialet er isotropisk eller ei. Prøveta-kingen er vertikal, men vannet strømmer horisontalt mot utløpet. Dersom mer finstoff blir transportert mot bunnen av taket, kan det antas at de horisontale hastighetene er lavere enn de vertikale hastighetene. Det er derfor ikke gitt at den vertikale hydrauliske konduktiviteten, også beskriver den horisontale hydrauliske konduktiviteten. Fra resultatene i tabell 4.4 kan man se at gjennomsnittet av målingene til mettet hydraulisk konduktivitet (K) varierer ganske mye fra tak 1 til tak 3. Snitt-verdien for tak 1 ble $1.00 \cdot 10^{-4}$ m/s, mens den ble $4.75 \cdot 10^{-4}$ m/s for tak 3. Prøvene fra tak 1 samsvarer ganske bra med resultatene Hamouz mfl. (2018) fant for mettet hydraulisk konduktivitet til LECA-materialet som ble benyttet på deres tak. For tak 3 går det betydelig saktere, og det antas at årsaken er mer finstoff i LECA-materialet. Lavere hydraulisk konduktivitet på tak 3 samsvarer med at avrenningsresponsen er tregere for tak 3 enn for tak 1.

5.3 DDD-modellen

5.3.1 Kalibrering

Det ble valgt ut to avstandsfordelinger til kalibrering, Af1 og Af2. De kalibrerte hendelsene med Af2 fikk bedre resultat med en NSE snittskår på 0.875 for tak 1 og 0.73 for tak 3. Tilsvarende for Af1 var på 0.835 for tak 1 og 0.5 for tak 3.

Ved optimalisering av modellen ble parameterne Gsh og Gsc kalibrert. Produktet av Gsh og Gsc tilsvarer Λ i ligning 3.14 og gir gjennomsnittlig hastighet til vannet i taket. Det oppstod derimot vanskeligheter med kjøring av kalibreringscriptet. Etter assistanse fra biveileder falt valget på å bruke kalibreringsintervallene vist i 5.1 da disse verdiene fikk scriptet til å kjøre. Erfaring med kjøring av modellen før kalibreringen, sa at Gsh - og Gsc -verdier i intervallet ga gode resultater.

Tabell 5.1: Oversikt over optimaliseringsintervallene med tilhørende hastighetsintervall gitt av ligning 3.14.

	Gsh	Gsc	\bar{d} [m]	Hastighet [m/s]
Af1	[0.5 - 1.5]	[0.00015 - 0.001]	2.43	$[3.4 \cdot 10^{-6} - 6.1 \cdot 10^{-5}]$
Af2	[0.5 - 1.5]	[0.00015 - 0.001]	6.22	$[7.8 \cdot 10^{-6} - 1.55 \cdot 10^{-4}]$

Konsekvensen ved bruk av denne metoden er tydelig. Ved å kalibrere med et fast intervall for Gsh og Gsc for begge avstandsfordelingene, ender man opp med to ulike hastighetsintervall. Vurderingen av avstandsfordelingene kan derfor ikke alene betro seg

til KGE- og NSE-verdier. En evaluering om hastighetene modellen kalibrerer ansees realistiske (litteratur/forsøk), blir også viktig for vurderingen.

En bedre løsning ville vært å bestemme hastighetsintervallene først, og så definere kalibreringsintervallene til G_{sh} og G_{sc} for hver avstandsfordeling. Hastighetsintervallet kan bestemmes slik at det inkorporerer verdier fra litteratur og forsøk.

Optimaliseringen er gjort med hensyn på KGE ved bruk av den globale optimaliseringspakken BlackBoxOptim¹. 300 modellkjøringer ble satt som grense for hver kalibrering, der maskinkapasitet og tid ligger til grunn for grensen. Optimaliseringspakken sier ingenting om den har funnet den optimale løsningen, som vil si at flere kjøringer øker sannsynligheten for en bedre løsning. Derfor eksisterer det et forbedringspotensiale i denne oppgaven ved å benytte flere modellkjøringer, og større hastighetsintervaller.

Kalibreringshendelsene

Som nevnt i delkapittel 3.4.6 ble to hendelser valgt ut til kalibrering. Parametrene fra sep-kalibreringen ga bedre KGE-verdier for begge tak og avstandsfordelinger enn hva juni-hendelsen gjorde. Et viktig aspekt ved kjøring av enkelthendelser er å vite initialbetingelse til modellen kontra faktiske forhold. DDD-modellen antar at feltet er helt tørt før kjøringen starter. I løpet av de siste 5 dagene før hendelsene har det regnet 32 mm før juni-hendelsen, og 22 mm før sep-hendelsen. Gjennomsnittstemperaturen i forkant av hendelsene er helt like, med en snittemperatur på 14°C. Til tross for en del nedbør i løpet av de siste dagene, er det ikke registrert avrenning fra takene den siste timen før begge hendelsene starter. Det tyder på at takene er mettet under feltkapasitet, men det antas at det ennå er fuktighet i takene. Det er vanskelig å si eksakt hva initialtilstanden på takene ved de to hendelsene var, og hvorfor kalibreringen av sep-hendelsen ga bedre resultater.

Figur 4.7 og 4.8 for juni-hendelsen viser at modellen ikke simulerer avrenning for den tredje observerte avrenningstoppen. Dette er en årsak til at KGE-verdien til juni-hendelsen er lavere enn sep-hendelsen, men gir ingen forklaring på hvorfor.

5.3.2 Avstandsfordelingene

Til vurdering av avstandsfordelingene brukes valideringsresultatene fra sep-kalibreringen ettersom det ga best resultat. Punkter som diskuteres er hvor godt avstandsfordelingene estimerer avrenningstopp og resesjon, beregning av hastigheter i metningslag, og magasinkapasitet.

¹<https://github.com/robertfeldt/BlackBoxOptim.jl>

Avrenningstopp og resesjon for tak 1

Figur 4.11 illustrerer at begge avstandsfordelingene generelt treffer godt på tidspunktet hvor avrenningstoppene inntreffer. Under mai-hendelsen underestimerer Af2 i større grad toppene enn det Af1 gjør, spesielt ved den tredje avrenningstoppen. Det er også en liten underestimering for Af1 og Af2 ved den fjerde avrenningstoppen. For juni-hendelsen har Af1 en veldig overestimering rett før den andre avrenningstoppen. Ellers treffer Af2 litt bedre enn Af1, men begge underestimerer toppene. En årsak kan være at metningen i taket er høyere enn modellen antar. Valideringen av okt-hendelsen er den med best resultater. Både Af1 og Af2 treffer svært godt, med bare en liten underestimering av den andre avrenningstoppen. De modellerte resesjonskurvene for Af1 og Af2 følger de observerte resesjonskurvene ganske bra for alle valideringshendelsene.

Avrenningstopp og resesjon for tak 3

Figur 4.13 viser at valideringsresultatene for tak 3 generelt er litt dårligere enn de er for tak 1. Dette gjelder også for begge avstandsfordelingene. Årsaken kan være at de observerte avrenningskurvene for tak 3 har en lavere vannføring enn det tak 1 har. For mai-hendelsen treffer Af1 og Af2 tidspunktet for den tredje avrenningstoppen, men Af1 gjør en stor overestimering. Under juni-hendelsen underestimerer Af1 og Af2 den første avrenningstoppen, og Af1 gjør igjen en stor overestimering av den andre avrenningstoppen. Valideringen av okt-hendelsen er, som med tak 1, den med best resultater. Det er dog en liten overestimering og forsinkning i avrenningstoppen på den første avrenningstoppen. Både Af1 og Af2 følger hverandre ganske tett, og resesjonskurvene for Af1 og Af2 er totalt sett ganske like.

Hastigheter

Kalibreringen og valideringen av Af1 og Af2 viste at man kan oppnå ganske gode resultater med begge avstandsfordelingene.

Af1 er utformet med en elv som går diagonalt mot sluket fra midten av lengdesiden til taket(3.12). Hypotesen er at avrenningen i taket over tid vil renske opp renna og minske motstanden. Så fort vannet treffer renna øker hastigheten med flere størrelsesordener. I modellen er det løst ved at hele renna blir betraktet som et sluk. Konsekvensen er at middellavstanden til sluket blir liten. Dette forklarer hvorfor middelhastigheten til Af1 er lav (se tabell 4.6), ettersom en lavere middellavstand innsatt i ligning 3.14 gir lavere hastighet. Dette er også illustrert i figur 4.9 der Af1 har laveste hastighet i metningslagene gitt av ligning 3.11. I figur 4.5 vises det at avstander opp til middellavstanden utgjør en større andel (56%) av det totale arealet til taket. En forventet respons gitt av kortere avstander vil være en tydelig avrenningstopp. Dette er reflektert i valideringsresultatene

ved at Af1 tidvis overestimerer avrenningstoppen for tak 3.

Af2 er basert på hypotesen om at vannet følger topografien til taket uten innslag av elv. Dette gjør at reiseveiene blir lengre. Middellavstanden er over dobbelt så lang som den er for Af1 med sine 6.22 m. Konsekvensen blir at modellen simulerer høyere snitthastighet (se tabell 4.7) og høyere hastighet i metningslagene (se figur 4.9). Det er ikke forventet en like tydelig avrenningstopp for Af2 siden avstandene opp til middellavstanden dekker bare 51% av arealet. Som følge av dette observerer man at Af2 i valideringsresultatene ikke overestimerer avrenningstoppene.

Magasinkapasitet

Af1 estimerer såvidt høyere magasinkapasitet enn det Af2 gjør for tak 3. Det samme gjelder for tak 1, men der er skilnaden noe større. Korrelasjonen mellom simulert avrenning og magasinkapasitet er sterk. Valideringsresultatene viser at tilgjengelig lagring i magasinet synker når avrenningen øker og vice versa.

Det er vanskelig å avgjøre hva som er riktig magasinkapasitet. Et enkelt estimat for LECA-laget kan gjøres ved å gange volumet til LECA (7.96m^3 (Trommald og Øyre, 2018)) med effektiv porøsitet (0.5) og dele på arealet (45.59m^2). Dette gir en total lagringskapasitet på 87 mm. Trekt i fra feltkapasiteten, regnet ut i kapittel 2.3.3, vil magasinkapasiteten tilgjengelig for avrenning være på 56.7 mm. Dette er en del høyere enn det modellen estimerer.

Det er en del usikkerhet knyttet til estimeringen av magasinkapasiteten. Grunnet kalibrering av enkelthendelser er ikke modellen blitt gitt en spin-up tid. Initialbetingelsene modellen opererer med blir derfor gjeldende, og utgjør en svakhet ved metoden. For hverken juni- eller sep-hendelsen var dagene i forkant helt tørre. Et forbedringspunkt vil være å kjøre modellen ganske lenge før hendelsene av interesse inntreffer.

Hvilken avstandsfordeling bør man velge?

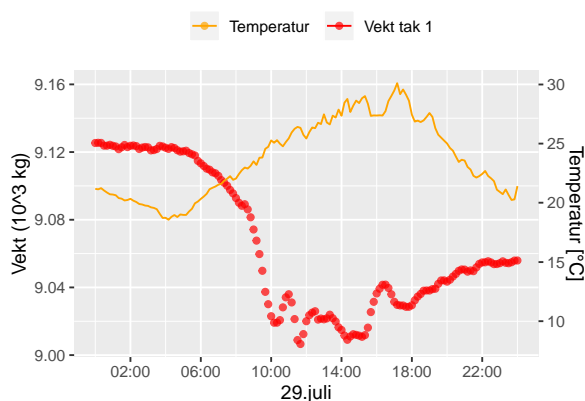
Gode kalibrering- og valideringsresultater kompliserer vurderingen av hvilken avstandsfordeling som passer best. Et argument for at Af2 er passende, er konsistensen i hastighetsestimatene fra begge kalibreringshendelsene (se tabell 4.7). Hastighetsestimatene til Af1 varierer i større grad, noe som gir en økt usikkerhet rundt kalibreringen. Det var forventet at hastighetsestimatet til Af1 skulle være lavere enn Af2 ettersom Af1 har større andel kortere avstander til sluk. Resultatet tyder på at Af1 muligens har for lave hastigheter enn det som er realistisk for et filtermedium som LECA. Dette gjelder også for Af2, men der er hastighetsestimatene noe raskere. Estimaten er en størrelsesorden unna resultatene fra bokspermeameter testen og funnene til Hamouz mfl. (2018). Det

skal dog nevnes at hastighetsestimatene er snitthastigheter fra hele taket sett under ett, og ikke bare fra LECAlaget.

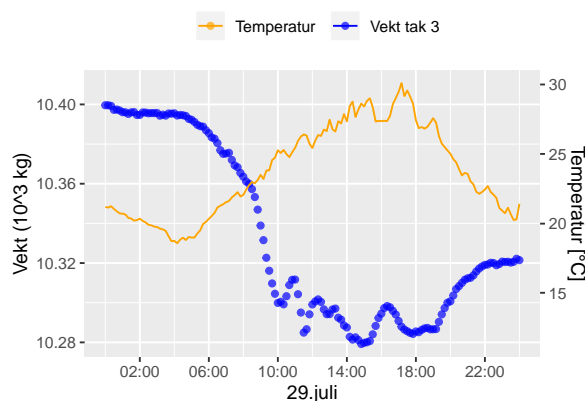
Af2 virker derfor som den avstandsfordelingen som gir mest fornuftige resultater. Til fremtidige studier vil det være interessant å utforske flere avstandsfordelinger (B).

5.3.3 Evapotranspirasjon

I forhold til observerte verdier, overestimerer modellen evapotranspirasjon for alle hendelser bortsett fra oktober (tabell 4.12 og tabell 4.13). Nedbør- og avrenningsmålingene ansees som pålitelige, men det er en del usikkerhet knyttet til vektmålingene. Dette fører til en del usikkerhet i observert evapotranspirasjon. I perioden 23.juli-30.juli 2019 ble det ikke registrert noe nedbør. Som vist i grafene under er det likevel vektsvinger på takene i løpet av 29.juli.

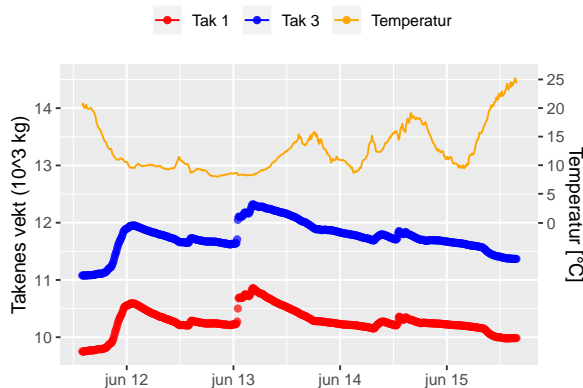


Figur 5.1: Vektsvingninger på tørt tak, tak 1

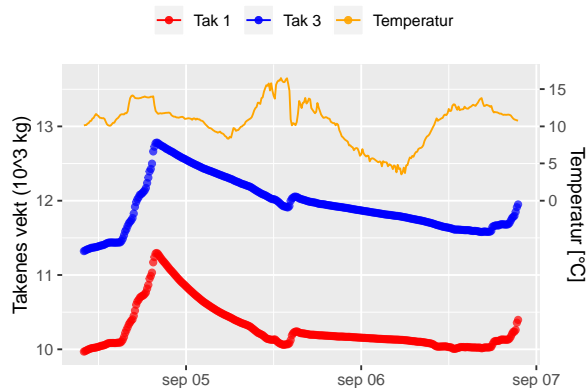


Figur 5.2: Vektsvingninger på tørt tak, tak 3

Dette viser at selv på et helt tørt tak varierer vekten over dagen, og vekten ser ut til å påvirkes både av temperatur og tid på døgnet. Det er mulig at vekten om natten og morgenen er noe høyere på grunn av dugg på bergknappen. For tak 1 svinger vekten med 118.9 kg, og for tak 3 svinger vekten med 120.4 kg. Dette utgjør en vannmengde på henholdsvis 2.61 og 2.64 mm, som igjen fører til samme usikkerhet i observert evapotranspirasjon. Dersom man sammenligner vektendring i løpet av hendelse juni og sep (figur 5.3 og figur 5.4) med observert avrenning (4.7 og figur 4.8), ser man at den registrerte vekten følger avrenningsforløpet, og ikke temperatursvingningene. De målte verdiene for vekt, påvirkes derfor mest av vanninnhold på taket. Dermed kan den registrerte vekten på takene benyttes til utregning av evapotranspirasjon, og fungere som et bra sammenligningsgrunnlag for den estimerte evapotranspirasjon fra DDD-modellen. Det er likevel viktig å huske på at den observerte verdien for evapotranspirasjon har en del usikkerhet knyttet til seg, og en differanse mellom simulert og observert evapotranspirasjon på ± 2.6 mm i løpet av en hendelse kan antas å være akseptable.



Figur 5.3: Vektendring, hendelse juni



Figur 5.4: Vektendring, hendelse sep

Tak 1

For mai-, juni- og sep-hendelsen overestimerer modellen evapotranspirasjon for både Af1 og Af2, men avviket er minst for Af2. Mai-hendelsen har det laveste prosentvise avviket, men differansen mellom observert og simulerte verdier overskrider 2.6 mm. For sep-hendelsen er differansen mellom observert og simulert ET mindre, men på grunn av lave verdier blir det prosentvise avviket større. Både mai- og sep-hendelsen ansees som gode resultater for modellert ET. For juni-hendelsen er det simulert 11.09 mm ET i løpet av hele hendelsen, mens observert ET er 6.89 mm. Differansen mellom observert nedbør og avrenning er 12 mm, og dette tyder på at modellen faktisk overestimerer evapotranspirasjon. Okt er den hendelsen med lavest snittemperatur (8.4 °C), og minimumtemperaturen er så lav som 2°C. Det er den eneste hendelsen hvor modellen underestimerer evapotranspirasjon, men differansen mellom observert og modellert ET er bare 2.32 mm.

Tak 3

Den simulerte evapotranspirasjonen fra tak 3 er generelt sett dårligere enn for tak 1. Den lagrede vannmengden i tak 3 er i alle tilfeller høyere enn i tak 1. For sep-hendelsen har man det største prosentvise avviket, og det er også her differansen mellom den lagrede vannmengden i tak 1 og tak 3 er størst. Ellers er resultatene ganske like som for tak 1; for alle hendelser er avviket mellom observert og simulert evapotranspirasjon mindre for af2 enn for Af1, estimeringen for mai-hendelsen er ok, en underestimering for okt, og overestimering for juni.

Funnene tyder på at modellen overestimerer evapotranspirasjon fra begge takene, og at det er en tydelig sammenheng mellom simulert evapotranspirasjon og lagret vannmengde. Det er derfor nærliggende å tro at overestimeringen av evapotranspirasjon skyldes feilberegning av magasinkapasiteten M .

5.3.4 Modellhastigheter og mettet hydraulisk konduktivitet

Et av målene med oppgaven var å vurdere om hastighetene som modellen beregner, kunne bestemmes teoretisk. I tabellen under gis en sammenfatning av kalibrerte hastigheter for begge avstandsfordelingene på tak 1 og tak 2, samt den mettede hydrauliske konduktiviteten funnet fra bokspereameter testen.

Tabell 5.2: Mettet hydraulisk konduktivitet og modellerte hastigheter

	K_{sat} (m/s)	v_{Af1} (m/s)		v_{Af2} (m/s)	
		juni	sep	juni	sep
Tak 1	1.00E-04	1.51E-05	1.32E-05	3.09E-05	3.02E-05
Tak 3	4.75E-05	1.23E-05	8.65E-06	1.93E-05	1.95E-05

Resultatene viser at det ikke er en direkte sammenheng mellom den målte hydrauliske konduktiviteten for LECA-materialet, og den modellerte hastigheten. Spesielt for tak 1 spriker verdiene for K_{sat} og simulerte hastigheter. Det er derfor vanskelig å benytte den ene eller den andre hastigheten til å uttale seg om det er noen åpenbare forbedringspunkter ved taketdesignet. Når det er sagt viser både beregninger ved vannbalanseligningen og beregninger fra DDD-modellen, at ved samme regnhendelse fylles tak 3 mer opp enn tak 1.

6. Konklusjon

Denne oppgaven har tatt for seg to grønne tak med et magasinerende sjikt av finknust LECA. Den hydrologiske effekten av takene ble studert basert på tilsendte data fra NVE, og avrenning fra takene ble modellert ved hjelp av DDD-modellen. Det ble også utført et forsøk for å finne mettet hydraulisk konduktivitet i LECA-laget.

Takenes virkningsgrad ble sammenlignet med et ordinært tekket referansetak. Resultatene viser at de grønne takene demper flomtopper for alle typer nedbørhendelser. Den beste dempingen oppnås når nedbørhendelsene er korte og intense, og initialtilstanden på taket er tørr. I gjennomsnitt dempes flomtoppene for de to takene med 91.5 % (tak 1) og 93.4 % (tak 3). Dette er bedre resultater enn hva som er observert for grønne, ekstensive tak uten magasinerende sjikt. Takenes evne til å holde tilbake nedbør ble også studert. I 2019 reduserte tak 1 og tak 3 avrenningen med 29 % og 30 % i forhold til målt nedbør. Disse resultatene er dårligere enn hva som er observert i mange utenlandske studier, men bedre enn det som er observert for andre norske studier. Takenes tilbakeholdelse varierte mellom de ulike sesongene, og den beste effekten av takene ble observert om sommeren.

Bruk av DDD-modellen for å beskrive avrenning fra grønne tak med ett minuttts oppløsning gir gode resultater. For validering av beste kalibrering (sep) og avstandsfordeling (Af2) er KGE-verdien i gjennomsnitt 0.82 (tak 1) og 0.67 (tak 3). De modellerte avrenningstoppene korrelerer godt med de observerte, det samme gjør resesjonskurvene. Dette tyder på at DDD-modellen fungerer bra til modellering av grønne tak. Usikkerhetspunkter er knyttet til om modellens estimerte hastigheter i grunnen og magasinkapasitet er realistiske anslag. Forbedringer kan gjøres ved å kalibrere modellen med lengre perioder kontra kortere hendelser slik det er gjort i denne oppgaven. Mye tyder på at modellen overestimerer evapotranspirasjon for enkelthendelser under snøfrie måneder.

Det ble ikke påvist en klar sammenheng mellom simulerte hastigheter, og teoretiske hastigheter knyttet til LECA-lagets mettede hydrauliske konduktivitet. Det ser derimot ut til at mengde finstoff i LECA-laget har stor betydning for hastigheter og avrenningsrespons fra takene, og dermed burde ha betydning ved dimensjonering av slike tak.

6.1 Videre arbeid

For takene er det mye interessant arbeid som kan gjøres. Når det kunstige vanningsanlegget er på plass, kan man få et enda bedre innblikk i hvordan takene responderer på ulik type nedbør. Da vil det også bli enklere å studere metningsgradens betydning for avrenningsrespons. I tillegg kan man studere hvilken regnhendelse som må til før det oppstår overflateavrenning, og på denne måten finne dimensjonerende verdier for slike tak. Et annet interessant tema kan være en kost-nytte analyse av tak med magasinerende sjikt, sammenlignet med et vanlig ekstensivt grønt tak. Et siste punkt som kan nevnes for takene er at det kan være hensiktsmessig å finne en ny løsning på tømming av volumtankene, slik at tankene er tilnærmet tomme når en ny nedbørhendelse starter.

En annen tilnærming ved bruk av DDD-modellen er å bestemme mettet hydraulisk konduktivitet til filtermediet. Da unngår man å kalibrere seg til en hastighet, og en følsomhetsanalyse av parameterne G_{sh} og G_{sc} vil være mulig. Denne framgangsmåten er basert på faktiske forhold i filtermediet og ikke resultat av en tilpasset hastighet. Skal DDD-modellen kunne anvendes på en raskere måte, vil utvikling av standardiserte avstandsfordelinger for gitte geometrier til grønne tak muligens være et nyttig bidrag.

Referanser

- Alfredo, K., Montalto, F. og Goldstein, A. (2010). Observed and modeled performances of prototype green roof test plots subjected to simulated low- and high-intensity precipitations in a laboratory experiment. *Journal of Hydrologic Engineering* 15 (6): 444–457. DOI: [10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000135](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000135).
- Beldring, S., Roald, L. A. og Voksø, A. (2002). *Avrenningskart for Norge*. Tekn. rapp. NVE. URL: http://publikasjoner.nve.no/dokument/2002/dokument2002_02.pdf.
- Bengtsson, L., Olsson, J. og Meteorological, S. (2005). Hydrological function of a thin extensive green roof in southern Sweden. DOI: [10.2166/nh.2005.0019](https://doi.org/10.2166/nh.2005.0019).
- Berndtsson, J. C. (2010). *Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review*. DOI: [10.1016/j.ecoleng.2009.12.014](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.12.014).
- Berretta, C., Poë, S. og Stovin, V. (2014). Moisture content behaviour in extensive green roofs during dry periods: The influence of vegetation and substrate characteristics. *Journal of Hydrology*. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2014.01.036](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.01.036).
- Beven, K. (1989). Changing ideas in hydrology - The case of physically-based models. *Journal of Hydrology* 105 (1-2): 157–172. DOI: [10.1016/0022-1694\(89\)90101-7](https://doi.org/10.1016/0022-1694(89)90101-7).
- Beven, K. og Binley, A. (1992). The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes* 6 (3): 279–298. DOI: [10.1002/hyp.3360060305](https://doi.org/10.1002/hyp.3360060305).
- Braskerud, B. C. (2014). *Grønne tak og styrtregn. Effekten av ekstensive tak med sedumvegetasjon for redusert avrenning etter nedbør og snøsmelting i Oslo*. Tekn. rapp. NVE.
- Bøyum, Å., Eidsmo, T., Lindholm, O., Noreide, T., Semb, T., Skretteberg, R. og Markhus, E. (1997). *Anvendt urbanhydrologi*. Tekn. rapp. 10: 193. URL: http://publikasjoner.nve.no/publikasjon/1997/publikasjon1997_10.pdf.
- Carter, T. L. og Rasmussen, T. C. (2006). Hydrologic behavior of vegetated roofs. *Journal of the American Water Resources Association* 42 (5): 1261–1274. DOI: [10.1111/j.1752-1688.2006.tb05611.x](https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2006.tb05611.x).
- Chin, D. A. (2013). *Water-Resources Engineering*. Pearson Education.
- Darcy, H. (1856). Les fontaines publiques de la ville de Dijon. *Recherche*.
- Dooge, J. C. I. (1959). A general theory of the unit hydrograph. *Journal of Geophysical Research* 64 (2): 241–256. DOI: [10.1029/jz064i002p00241](https://doi.org/10.1029/jz064i002p00241).
- Dooge, J. C. (1973). *Linear Theory of Hydrologic System*. Tekn. rapp. DOI: [10.1016/0003-6870\(73\)90259-7](https://doi.org/10.1016/0003-6870(73)90259-7).
- Dyrddal, A. V. og Førland, E. J. (2019). *Klimapåslag for korttidsnedbør - Anbefalte verdier for Norge*. Tekn. rapp. URL: https://cms.met.no/site/2/klimaservicesenteret/rapporter-og-publikasjoner/_attachment/14869?_ts=16b02bdea3a.

- Elvebakk, K., Time, B., Skjeldrum, P. M. og Kvande, T. (2018). *Ombygging til blågrønne tak*. Tekn. rapp. Klima 2050, Report No 10.
- Fassman-Beck, E., Voyde, E., Simcock, R. og Hong, Y. S. (2013). 4 Living roofs in 3 locations: Does configuration affect runoff mitigation? *Journal of Hydrology*. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2013.03.004](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.03.004).
- Fetter, C. (2001). *Applied Hydrogeology*. Red. av University of Wisconsin-Oshkosh. Prentice-Hall: 615. DOI: [0-13-088239-9](https://doi.org/0-13-088239-9).
- Fordal, E. (2018). Avrenning fra to grønne tak ved forskningsinfrastrukturen «Bia» i Ås kommune. M.Sc.-avh.
- Framtidens byer (2016). *Hovedrapport Framtidens byer*. Tekn. rapp. Regjeringen. 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).
- Hamouz, V., Lohne, J., Wood, J. og Muthanna, T. M. (2018). Hydrological Performance of LECA-Based Roofs in Cold Climates: 1–16. DOI: [10.3390/w10030263](https://doi.org/10.3390/w10030263).
- Hamouz, V. og Muthanna, T. M. (2019). Hydrological modelling of green and grey roofs in cold climate with the SWMM model. *Journal of Environmental Management* 249. DOI: [10.1016/j.jenvman.2019.109350](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109350).
- Hanslin, H. M. og Johannessen, B. G. (2018). *Grønne tak som LOD- og miljøtiltak*. Tekn. rapp. 172: 1–32. URL: <https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/m1153/m1153.pdf>.
- Hanssen-Bauer, I., Førland, E., Haddeland, I., Hisdal, H., Mayer, S., Nesje, A., Nilsen, J., Sandven, S., Sandø, A., Sorteberg, A. og Ådlandsvik, B. (2015). *Klima i Norge 2100. Kunnskapsgrunnlag for klimatilpasning oppdatert i 2015*. Tekn. rapp. 2. Norsk Klimaservicesenter: 204. URL: <https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/m406/m406.pdf>.
- Hendriks, M. R. (2010). *Introduction to Physical Hydrology*. Oxford University Press: 331.
- Hilten, R. N., Lawrence, T. M. og Tollner, E. W. (2008). Modeling stormwater runoff from green roofs with HYDRUS-1D. *Journal of Hydrology*. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2008.06.010](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.06.010).
- 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*. DOI: [10.1029/2007WR006052](https://doi.org/10.1029/2007WR006052).
- Johannessen, B. G. og Muthanna, T. M. (2016). Hydraulic performance of extensive green roofs in cold climate. I: *Novatech*: 1–4.
- Johannessen, B. G., Hanslin, H. M. og Muthanna, T. M. (2017). Green roof performance potential in cold and wet regions. *Ecological Engineering*. DOI: [10.1016/j.ecoleng.2017.06.011](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.06.011).
- Johannessen, B. G., Hamouz, V., Gagne, A. S. og Muthanna, T. M. (2019). The transferability of SWMM model parameters between green roofs with similar build-up. *Journal of Hydrology*. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2019.01.004](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.004).
- Kirchner, J. W. (2006). Getting the right answers for the right reasons: Linking measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology. *Water Resources Research* 42 (3). DOI: [10.1029/2005WR004362](https://doi.org/10.1029/2005WR004362).

- Kling, H., Fuchs, M. og Paulin, M. (2012). Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology* 424-425: 264–277. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2012.01.011](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.011).
- Knoben, W. J., 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).
- Krause, P., Boyle, D. P. og Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*. DOI: [10.5194/adgeo-5-89-2005](https://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005).
- Köhler, M., Schmidt, M., Wilhelm Grimme, F., Laar, M., Lúcia de Assunção Paiva, V. og Tavares, S. (2002). Green roofs in temperate climates and in the hot-humid tropics – far beyond the aesthetics. *Environmental Management and Health* 13 (4): 382–391. DOI: [10.1108/09566160210439297](https://doi.org/10.1108/09566160210439297).
- Leimgruber, J., Krebs, G., Camhy, D. og Muschalla, D. (2018). Sensitivity of model-based water balance to low impact development parameters. *Water (Switzerland)* 10 (12). DOI: [10.3390/w10121838](https://doi.org/10.3390/w10121838).
- Li, Y. og Babcock, R. W. (2014). Green roof hydrologic performance and modeling: A review. *Water Science and Technology* 69 (4): 727–738. DOI: [10.2166/wst.2013.770](https://doi.org/10.2166/wst.2013.770).
- Lindholm, O., Endresen, S., Thorolfson, S., Sægrov, S., Jakobsen, G. og Aaby, L. (2008). *A162 - Veiledning i klimatilpasset overvannshåndtering*. Tekn. rapp.: 79.
- Locatelli, L., Mark, O., Mikkelsen, P. S., Arnbjerg-Nielsen, K., Bergen Jensen, M. og Binning, P. J. (2014). Modelling of green roof hydrological performance for urban drainage applications. *Journal of Hydrology*. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2014.10.030](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.030).
- Mentens, J., Raes, D. og Hermy, M. (2006). Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and Urban Planning* 77 (3): 217–226. DOI: [10.1016/j.landurbplan.2005.02.010](https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2005.02.010).
- Miljødirektoratet (2016). *Vegetasjon til grønne tak, FAKTAARK M-627 / 2016*. Tekn. rapp.: 1–4. URL: <https://tema.miljodirektoratet.no/Documents/publikasjoner/M627/M627.pdf>.
- Monterusso, M. A., Rowe, D. B., Rugh, C. L. og Russell, D. K. (2004). Runoff water quantity and quality from green roof systems. I: *Acta Horticulturae*. DOI: [10.17660/ActaHortica.2004.639.49](https://doi.org/10.17660/ActaHortica.2004.639.49).
- Morgan, S., Celik, S. og Retzlaff, W. (2013). Green roof storm-water runoff quantity and quality. *Journal of Environmental Engineering (United States)* 139 (4): 471–478. DOI: [10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000589](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000589).
- 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*. DOI: [10.13031/2013.23153](https://doi.org/10.13031/2013.23153).
- Nash, J. E. og Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. DOI: [10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6).
- NGU (2019). *Vannets kretsløp*. URL: <https://www.ngu.no/grunnvanninorge/alt-om-grunnvann/generelt-om-gunnvann/vannets-kretslop>.
- Nophadrain (2010). *Extensive Green Roofs*. Tekn. rapp. 2001: 1–6. URL: <https://www.esha.bg/docs/0.2ExtensiveGreenRoofs.pdf>.
- Noreng, K., Brevik, B. G. og Jelle, B. P. (2008). Flate tak. Temaveileder om utførelse av flate, aktive tak. *TPF Informerer* (9). URL: <https://sintef.brage.unit.no/sintef->

- [xmlui/bitstream/handle/11250/2434611/TemaveilederFlateTak%255B1%255D.pdf?sequence=2&isAllowed=y.](#)
- Noreng, K., Kvalvik, M., Busklein, J. O., Ødegård, I. M., Corinna, S. C. og French, H. K. (2012). *Grønne tak Resultater fra et kunnskapsinnhentingsprosjekt*. Tekn. rapp.
- Norsk Vann (2013). *VA ordbok*. URL: <https://kurs.norskvann.no/mod/glossary/view.php?id=676&mode=letter&hook=A&sortkey&sortorder&fullsearch=0&page=8>.
- NOU2010:10 (2010). *Tilpassing til eit klima i endring*. Tekn. rapp.: 240. URL: <https://www.regjeringen.no/contentassets/01c4638b3f3e4573929f3b375f4731e0/nn-no/pdfs/nou201020100010000dddpdfs.pdf>.
- NOU2015:16 (2015). *Overvann i byer og tettsteder*. Tekn. rapp. URL: <https://www.regjeringen.no/contentassets/e6db8ef3623e4b41bcb81fb23393092b/no/pdfs/nou201520150016000dddpdfs.pdf>.
- NVE (1978). *Hydrologi ved vassdragsdirektoratet*. Tekn. rapp. NVE. URL: <http://publikasjoner.nve.no/diverse/1978/hydrologivassdragsdirektoratet1978.pdf>.
- NVE (2020). *Urbanhydrologi*. URL: <https://www.nve.no/hydrologi/urbanhydrologi/?ref=mainmenu>.
- Oslo kommune (2018). *Strategi for grønne tak og fasader i Oslo*. URL: https://www.oslo.kommune.no/getfile.php/13303950-1542702482/Tjenester%20og%20tilbud/Politikk%20og%20administrasjon/Etater%2C%20foretak%20og%20ombud/Bymilj%C3%B8etaten/Kunngj%C3%B8ringer%20fra%20Bymilj%C3%B8etaten/16-22144-35%20Strategi%20for%20gr%C3%B8ne%20tak%20og%20fasader%202018-2030%202685808_4_1.pdf.
- OTT (2019). *Operating Instructions Precipitation gauge OTT Pluvio 2*. URL: <https://www.ott.com/download/operating-instructions-precipitation-gauge-ott-pluvio2-1/>.
- Palla, A. og Gnecco, I. (2015). Hydrologic modeling of Low Impact Development systems at the urban catchment scale. *Journal of Hydrology*. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2015.06.050](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.050).
- Paus, K. H. (2018). Forslag til dimensjonerende verdier for trinn 1 i Norsk Vann sin tre-trinns strategi for håndtering av overvann. *Vannforeningen*: 12.
- Poë, S., Stovin, V. og Berretta, C. (2015). Parameters influencing the regeneration of a green roof's retention capacity via evapotranspiration. *Journal of Hydrology*. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2015.02.002](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.002).
- Ramírez, J. A. (2010). Prediction and Modeling of Flood Hydrology and Hydraulics. I: *Inland Flood Hazards*. DOI: [10.1017/cbo9780511529412.012](https://doi.org/10.1017/cbo9780511529412.012).
- 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* 480: 33–45. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2012.12.004](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.004).
- Salvadore, E., Bronders, J. og Batelaan, O. (2015). Hydrological modelling of urbanized catchments: A review and future directions. *Journal of Hydrology* 529 (P1): 62–81. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2015.06.028](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.028).
- Seametrics (2008). *Seametrics PT12*. URL: <https://www.seametrics.com/wp-content/uploads/LT14338r25-20180306-PT12-Specs.pdf>.
- She, N. og Pang, J. (2010). Physically based green roof model. *Journal of Hydrologic Engineering*. DOI: [10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000138](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000138).
- Sherman, L. R. K. (1932). The relation of hydrographs of runoff to size and character of drainage-basins. *Eos, Transactions American Geophysical Union*. DOI: [10.1029/TR013i001p00332](https://doi.org/10.1029/TR013i001p00332).

- Skaugen, T. (2020). A parameter parsimonious approach for modelling catchment scale urban hydrology – which processes are important?
- Skaugen, T. og Onof, C. (2014). A rainfall-runoff model parameterized from GIS and runoff data. *Hydrological Processes* 28 (15): 4529–4542. 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 (12): 4963–4981. DOI: [10.5194/hess-20-4963-2016](https://doi.org/10.5194/hess-20-4963-2016).
- Soulis, K. X., Valiantzas, J. D., Ntoulas, N., Kargas, G. og Nektarios, P. A. (2017). Simulation of green roof runoff under different substrate depths and vegetation covers by coupling a simple conceptual and a physically based hydrological model. *Journal of Environmental Management* 200: 434–445. DOI: [10.1016/j.jenvman.2017.06.012](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.06.012).
- 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. M.Sc.-avh.
- Stenius, S., Glad, P. A., Wang, T. K. og Væringstad, T. (2015). *Veileder for flomberegninger i små uregulerte felt*. Tekn. rapp. NVE. URL: <https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/2498051?show=full>.
- Stovin, V., Vesuviano, G. og Kasmin, H. (2012). The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions. *Journal of Hydrology*. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2011.10.022](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.10.022).
- Stovin, V., Poë, S. og Berretta, C. (2013). A modelling study of long term green roof retention performance. *Journal of Environmental Management* 131: 206–215. DOI: [10.1016/j.jenvman.2013.09.026](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.09.026).
- Stovin, V., Vesuviano, G. og De-Ville, S. (2017). Defining green roof detention performance. *Urban Water Journal* 14 (6): 574–588. DOI: [10.1080/1573062X.2015.1049279](https://doi.org/10.1080/1573062X.2015.1049279).
- Subramanya, K. (2008). *Engineering Hydrology*. 3. utg. New Delhi: Tata McGraw-Hill Education: 195–235.
- Svensson, A. (2014). Estimation of Hydraulic Conductivity from Grain Size Analyses, A comparative study of different sampling and calculation methods focusing on Vestlænken. Ph.d.-avh. URL: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/200291/200291.pdf>.
- Trommald, J. og Øyre, A. S. (2018). Etablering av Bia , en forskningsinfrastruktur med grønne tak. M.Sc.-avh.
- Tsegaw, A. T., Alfredsen, K., Skaugen, T. og Muthanna, T. M. (2019). Predicting hourly flows at ungauged small rural catchments using a parsimonious hydrological model. *Journal of Hydrology*. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2019.03.090](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.090).
- Ueland, J. S. (2018). Effekten av Bia, en forskningsinfrastruktur med grønne tak, innledende studier. M.Sc.-avh.
- Uhl, M. og Schiedt, L. (2008). Green roof storm water retention–monitoring results. *on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK*.
- van Seters, T., Rocha, L., Smith, D. og MacMillan, G. (2009). Evaluation of green roofs for runoff retention, runoff quality, and leachability. *Water Quality Research Journal of Canada* 44 (1): 33–47. DOI: [10.2166/wqrj.2009.005](https://doi.org/10.2166/wqrj.2009.005).
- VanWoert, N. D., Rowe, D. B., Andresen, J. A., Rugh, C. L., Fernandez, R. T. og Xiao, L. (2005). Green Roof Stormwater Retention. *Journal of Environmental Quality* 34 (3): 1036–1044. DOI: [10.2134/jeq2004.0364](https://doi.org/10.2134/jeq2004.0364).

- Vesuviano, G. og Stovin, V. (2013). A generic hydrological model for a green roof drainage layer. *Water Science and Technology*. DOI: [10.2166/wst.2013.294](https://doi.org/10.2166/wst.2013.294).
- Villarreal, E. L. og Bengtsson, L. (2005). Response of a Sedum green-roof to individual rain events. *Ecological Engineering*. DOI: [10.1016/j.ecoleng.2004.11.008](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2004.11.008).
- Wolff, M., Isaksen, K., Ødemark, K., Petersen-Øverleir, A., Reitan, T. og Brækkan, R. (2013). *Vindkorreksjon av nedbør*. Tekn. rapp. 22. MET. URL: <https://www.met.no/publikasjoner/met-report/met-report-2013>.
- Zhou, Y. og Li, W. (2011). A review of regional groundwater flow modeling. *Geoscience Frontiers* 2 (2): 205–214. DOI: [10.1016/j.gsf.2011.03.003](https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.03.003).

Vedlegg A. Inputparametere til DDD-modellen

I tabell A.1 og A.2 presenteres parameterfil med forklaring og verdier for de ulike parametere. I alle tilfeller er P(=permeabel), IP(=impermeabel) og Bog(=myr). Det er bare Af1 og Af2 som presenteres. Verdier for Gsh og Gsc tilknyttet avstandsfordelingene er vist i tabell 4.6 og 4.7.

Tabell A.1: Avstandsfordeling 1

Parametere	Verdi	Forklaring	Metode for estimering
a00 - a10 [m.o.h]	97	Hypsografisk kurve, høyde ved kvantiler: 0,10,20,30,40,50,60,70,80,90,100	seNorge.no
xcorr	59.67015	x-koordinat, lat	seNorge.no
ycorr	10.76970	y-koordinat, long	seNorge.no
pcorr [-]	1.0	korreksjonsfaktor, regn	Satt til 1.0
scorr [-]	1.0	korreksjonsfaktor, snø	Satt til 1.0
u [m/s]	0.56	vindhastighet, gjennomsnittlig årsverdi	R, data fra vindmåler
pro [%]	0.05	Maks vannkapasitet i snø	Satt til 0.05
TX [C °]	0.5	Terskeltemperatur, regn til snø	Satt til 0.5
a0P, a0IP	42.36, 42.36	Shape parameter per enhet snø Ikke relevant	Verdi tilhørende oversendt parameterfil
dP, dIP	413.0, 413.0	Korrelasjonslengde per enhet snø Ikke relevant	se over
AprimP, AprimIP	0.86, 0.86	Albedo Ikke relevant	se over
tauxP, tauxIP	0.0, 0.0	Aldring av snø Ikke relevant	se over
Timerinsec [s]	60	Tidsoppløsning i sekunder	Satt til 60
MADP, MADIP [m ³ /s]	0.000001315823	Gjennomsnittlig årlig avrenning	Bestemt fra datamålinger
area [m ²]	45.59	Nedbørfeltets areal	Bestemt fra oppmåling
NoL	5	Antall lag under overflaten	Satt til 5
R	0.3	Feltkapasitet	Satt til 0.3
PCritflux, IPCritflux [m ³ /dt]	5.1, 10.0	Vannstrømning over bakken som generer RN	Satt til 5.1, 10.0
Pfrac, IPfrac, Boqfrac [-]	0.999, 0.001, 0.0	Andel areal permeabelt/impermeabelt/våtmyr	Observasjon
Pmax, IPmax, Bogmax [m]	6.93, 6.93, 0.0	Lengste strømningsdistanse	Tatt fra avstandsfordeling
Pmid, IPmid, Bogmid [m]	2.43, 2.43, 0.0	Midlere stømningsdistanse	Tatt fra avstandsfordeling
Pz, IPz, Bogz [-]	0.001	Andel areal med nulldistanse til RN (RN = river network)	Ingen RN, satt til 0.001
midFL [m]	1.00	Gjennomsnittlig avstand i RN	Ingen RN, satt til 1.00
stdFL [m]	1.00	Standardavvik av avstander i RN	Ingen RN, satt til 1.00
maxFL [m]	1.00	Lengste reisevei i RN	Ingen RN, satt til 1.00
OFVP, OFVIP [m/s]	0.0005, 0.01	Hastighet på overflatestrømning	(Holden mfl., 2008)
Gshint [-]		Shapeparameter i gammafordeling	Kalibrert
Gscint [-]		Scaleparameter i gammafordeling	Kalibrert
rv [m/s]	1.5	Hastighet i elv	Satt til 1.5
Personer [stk]	0.0	Antall personer tilknyttet området	Satt til 0

Tabell A.2: Avstandsfordeling 2

Parametere	Verdi	Forklaring	Metode for estimering
a00 - a10 [m.o.h]	97	Hypsografisk kurve, høyde ved kvantiler: 0,10,20,30,40,50,60,70,80,90,100	seNorge.no
xcorr	59.67015	x-koordinat, lat	seNorge.no
ycorr	10.76970	y-koordinat, long	seNorge.no
pcorr [-]	1.0	korreksjonsfaktor, regn	Satt til 1.0
scorr [-]	1.0	korreksjonsfaktor, snø	Satt til 1.0
u [m/s]	0.56	vindhastighet, gjennomsnittlig årsverdi	R, data fra vindmåler
pro [%]	0.05	Maks vannkapasitet i snø	Satt til 0.05
TX [C °]	0.5	Terskeltemperatur, regn til snø	Satt til 0.5
a0P, a0IP	42.36, 42.36	Shape parameter per enhet snø Ikke relevant	Verdi tilhørende oversendt parameterfil
dP, dIP	413.0, 413.0	Korrelasjonslengde per enhet snø Ikke relevant	se over
AprimP, AprimIP	0.86, 0.86	Albedo Ikke relevant	se over
tauxP, tauxIP	0.0, 0.0	Aldring av snø Ikke relevant	se over
Timerinsec [s]	60	Tidsoppløsning i sekunder	Satt til 60
MADP, MADIP [m ³ /s]	0.000001315823	Gjennomsnittlig årlig avrenning	Bestemt fra datamålinger
area [m ²]	45.59	Nedbørfeltets areal	Bestemt fra oppmåling
NoL	5	Antall lag under overflaten	Satt til 5
R	0.3	Feltkapasitet	Satt til 0.3
PCritflux, IPCritflux [m ³ /t]	5.1, 10.0	Vannstrømning over bakken som generer RN	Satt til 5.1, 10.0
Pfrac, IPfrac, Boqfrac [-]	0.999, 0.001, 0.0	Andel areal permeabelt/impermeabelt/våtmyr	Observasjon
Pmax, IPmax, Bogmax [m]	12.01, 12.01, 0.0	Lengste strømningsdistanse	Tatt fra avstandsfordeling
Pmid, IPmid, Bogmid [m]	6.22, 6.22, 0.0	Midlere stømningsdistanse	Tatt fra avstandsfordeling
Pz, IPz, Bogz [-]	0.001	Andel areal med nulldistanse til RN (RN = river network)	Ingen RN, satt til 0.001
midFL [m]	1.00	Gjennomsnittlig avstand i RN	Ingen RN, satt til 1.00
stdFL [m]	1.00	Standardavvik av avstander i RN	Ingen RN, satt til 1.00
maxFL [m]	1.00	Lengste reisevei i RN	Ingen RN, satt til 1.00
OFVP, OFVIP [m/s]	0.0005, 0.01	Hastighet på overflatestrømning	(Holden mfl., 2008)
Gshint [-]		Shapeparameter i gammafordeling	Kalibrert
Gscint [-]		Scaleparameter i gammafordeling	Kalibrert
rv [m/s]	1.5	Hastighet i elv	Satt til 1.5
Personer [stk]	0.0	Antall personer tilknyttet området	Satt til 0

Vedlegg B. Avstandsfordelinger

Tabell B.1: Beskrivelse av alle vurderte avstandsfordelinger

Avstandsfordeling	Beskrivelse
Flatt tak	3 Uavhengig av hvor på taket vanndråpene treffer, vil de alltid ta korteste vei til utløpet.
Renne som transportvei	2 Vanndråpene følger takets lengderetning til det treffer på renna, og transporteres til utløpet.
Renne som elv	4 Vanndråpene følger takets lengderetning til det treffer på renna, renna fungerer som elv/utløp.
	5 Vanndråpene som treffer på øvre del av taket følger takets lengderetning til de treffer midtskjøtet, og tar deretter korteste vei til renna. Nedbøren som treffer på nedre del av taket tar korteste vei direkte til renna.
	1 Uavhengig av hvor på taket vanndråpene treffer, vil de alltid ta korteste vei til renna.

Vedlegg C. Månedlig nedbør og avrenning

Tabell C.1: Registrert nedbør og avrenning for hver måned

Måned	Total nedbør (mm)	Avrenning (mm)		
		Tak 1	Tak 2	Tak 3
Jan	27.0	4.2	5.8	5.0
Feb	126.4	131.2	141.2	127.1
Mars	88.5	105.9	92.7	99.7
April	12.8	3.4	12.0	1.2
Mai	91.8	32.2	84.3	29.6
Juni	126.8	70.8	110.0	71.2
Juli	47.5	1.4	44.0	1.8
August	101.3	38.2	89.8	36.9
September	170.2	128.0	152.8	123.4
Oktober	115.7	102.2	108.4	103.4
November	148.0	114.1	116.7	111.2
Desember	85.4	82.1	70.8	84.8
Total	1141.3	813.6	1028.6	795.4



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway