



**KLIMA
2050**

RAPPORT

Nr. 47 – 2023

OVERVANNSHÅNDTERING MED FORDRØYENDE TAK

Edvard Sivertsen, Stian Bruaset,
Noëlie Maurin, Elhadi Mohsen Hassan
Abdalla og Gema Raspati





KLIMA 2050

Klima 2050 Report No 47

Edvard Sivertsen, Stian Bruaset, Noëlie Maurin, Elhadi Mohsen Hassan Abdalla og Gema Raspati
Overvannshåndtering med fordrøyende tak

Keywords: Klimatilpasning, overvann, blågrønne tak, fordrøyning, dimensjonering

ISBN: 978-82-536-1811-1 (pdf)

Illustration front cover and page 3: Klima2050

Publisher: SINTEF Community, Høgskoleringen 7 b, PO Box 4760 Sluppen, N-7465 Trondheim

www.klima2050.no



Forord

Denne rapporten gir en presentasjon av de ulike vitenskapelige artiklene som er publisert med fokus på fordrøyende tak. Sentralt i dette arbeidet er testfeltet og pilotprosjektet på Høvringen utenfor Trondheim og fem tilknyttede PhD-studier i *Klima 2050*. Hensikten med rapporten er å synliggjøre de vitenskapelige resultatene med tanke på praktisk anvendelse, innovasjon og innovasjonspotensiale.

Rapporten er et resultat av en fortolkning gjort av forfatterne av rapporten og er ikke kvalitets-sikret av forfatterne av artiklene.

Klima 2050 – Reduksjon av samfunnsrisiko knyttet til klimaendringer på det bygde miljø er et senter for forskningsbasert innovasjon (SFI) finansiert av Norges forskningsråd og partnerne i konsortiet. SFI-statusen muliggjør langsiktig forskning i nært samarbeid med privat og offentlig sektor, samt med andre forskningspartnere som har som mål å styrke Norges innovasjons- og konkurransevne innen klimatilpasning. Sammensetningen av konsortiet er viktig for å kunne redusere samfunnsrisikoen forbundet med klimaendringer.

Senteret vil styrke bedriftenes innovasjonskapasitet gjennom fokus på langsiktig forskning. Det er også et klart mål å legge til rette for tett samarbeid mellom FoU-aktive bedrifter og fremtredende forskningsgrupper. Det blir lagt vekt på utvikling av fuktbestandige bygninger, overvannshåndtering, blågrønne løsninger, tiltak for forebygging av vannutløste skrev, sosio-økonomiske insentiver og beslutningsprosesser. Både ekstremvær og gradvise endringer i klimaet blir adressert.

Vertsinstitusjonen for SFI Klima 2050 er SINTEF Community, og senteret ledes i samarbeid med NTNU. De andre forskningspartnere er Handelshøyskolen BI, Norges geotekniske institutt (NGI) og Meteorologisk institutt (MET Norge).

Industripartnerne representerer viktige deler av norsk byggenæring; rådgivere, entreprenører og produsenter av byggevarer og teknologi: Skanska Norge, Multiconsult AS, Mesterhus, Norgeshus AS, Leca Norge AS, Isola AS og Skjæveland Gruppen AS. Senteret inkluderer også viktige offentlige byggherrer og eiendomsutviklere: Statsbygg, Statens vegvesen, Jernbanedirektoratet og Avinor AS. Sentrale aktører er også Trondheim kommune, Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) og Finans Norge.

Vi ønsker å rette en spesiell takk til Trondheim kommune som har stilt taket på Høvringen avløpsrensaneanlegg til disposisjon til uttesting av fordrøyende tak, noe som ligger til grunn for veldig mye av forskningen som er presentert i denne rapporten.

Trondheim, august 2023

Berit Time
Senterleder
SINTEF Community

Sammendrag

Fordrøyende tak har vært et sentralt forskningstema i Klima 2050 der testfeltet Høvringen utenfor Trondheim har spilt en særlig viktig og samlende rolle. Hensikten med denne rapporten er å gi en kort oversikt over de ulike vitenskapelige artiklene som omhandler fordrøyende tak og hvordan resultatene fra disse artiklene kan brukes. Videre veiledes interesserte lesere til riktig publisering avhengig av problemstilling.

For hver artikkel gis det et kort sammendrag av den vitenskapelige artikkelen før det gis en kort redegjørelse for hvordan resultatene kan tolkes og brukes. I noen tilfeller gis det også et eksempel på bruk og en kort oppsummering.

Helt kort kan resultatene fra Høvringen oppsummeres slik:

- Det er utviklet et støtteverktøy som kan brukes av prosjektorganisasjoner som jobber med det fordrøyende tak. Særskilte sjekklister og referanser til andre verktøy o.l. finnes for alle prosjektets faser og gir prosjektleder/ansvarlig prosjekterende/byggherre en enkel oversikt over kritiske punkter.
- Det kan i mange tilfeller være utfordrende å bruke kun en hendelsesbasert tilnærming til å vurdere ytelsen til fordrøyende tak (gjelder generelt alle naturbaserte løsninger). Bruk av varighetskurver kan være et supplement til å vurdere hvordan en løsning håndterer overvannet gjennom årets normalsituasjoner, og vil dermed kunne gi en god pekepinn på hvor mye kapasitet man kan frigjøre i ledningsnett (hvis det benyttes ledningsnett). Varighetskurver vil ikke være særlig nyttige for å si noe om effekten av en løsning for å redusere flomtopper i ekstreme nedbørsituasjoner. Kurvene vil uansett vise hvor mye reduksjon av totalt vannvolum man kan forvente nedstrøms en implementert løsning.
- En sammenligning av avrenningskoeffisienter målt på lignende takoppbygninger både i laboratorium og i felt viste store variasjoner. Den store variasjonen i målte avrenningskoeffisienter mellom lab og felt illustrerer utfordringene med å beregne effekten av fordrøyende tak med en enkel parameter.
- Det er utviklet modeller for å anslå retensjonen fra fordrøyende tak med et toppdekke av sedum. Særlig effekten av geografisk beliggenhet og klima er studert og det gis anbefalinger hvordan ta hensyn til dette.
- Videre viste en større sammenligning av ulike fordrøyende tak noen generelle trekk ved de ulike løsningene:
 - Takene med grønt toppdekke viste større variasjon i det målte fuktighetsinnholdet enn takene med toppdekke av belegningsstein på grunn av transpirasjonsprosessen. Dette resulterte i økt retensjon av vann (nedbør som ikke blir avrenning) fra takene med toppdekke av vegetasjon.
 - Takløsningene med ekstra fordrøyning viste større fordrøyning og flomtoppreduksjon enn tak uten ekstra fordrøyningslag.
 - Løsninger som kombinerte grønt toppdekke med fordrøyningslag under, oppnådde god fordrøyning og evapotranspirasjon. Dette viste seg å være den beste løsningen for både flomtoppreduksjon og retensjon av vann.
 - Det er utviklet noen enkle ligninger som gir overslag av hvor mye avrenning man kan forvente fra de ulike takløsningene.
- Det er undersøkt om modelleringsverktøyet SWMM kan brukes til å modellere fordrøyende tak. SWMM LID-modellen ble kalibrert ved å bruke avrenningsdata fra

ulike byer, og det er gjengitt en rekke ulike parameter-sett som kan brukes. Basert på resultatene er det imidlertid vanskelig å overføre modeller mellom ulike geografiske steder.

- Effekten av ulike størrelser er undersøkt i detalj på et fordrøyende tak med lettklinker der en har studert sammenhengen mellom de uavhengige variablene varighet, nedbørintensitet, gjennomsnittlig og toppintensitet, forutgående tørr våt periode og initiell metning med responsparameterne varighet avrenning, forsinkelse avrennings-topp, reduksjon avrenningstopp og innledende avrenning.
- Fordrøyende tak har betydelig konsentrasjonstid selv under ekstreme forhold, der vanninnhold i det fordrøyende taket ved starten av hendelsen har større påvirkning enn nedbørsprofilen, intensitet og varighet på kort-tids nedbørhendelsen. Det kan også være verdt å merke seg at nedbørsprofil, intensitet og varighet har liten effekt på forsinkelsen av indikatorene massetyngdepunkt og T50.
- Det er utviklet en konseptuell nedbør-avrenningsmodell som kan brukes til å estimere den hydrologiske ytelsen til fordrøyende tak. Modellen er kalibrert med data fra tak lokalisert i fire norske byer og resultatene har vist at modellen kan simulere avrenning fra fordrøyende tak på tvers av flere klimatiske soner og forskjellige takkonfigurasjoner. Oppgitte verdier for parameterne kan benyttes for å estimere den hydrologiske ytelsen til tak med lignende takkonstruksjoner i andre byer.
- Til slutt er det undersøkt om ulike maskinlæringsmodeller egner seg til å modellere fordrøyende tak. Det anbefales imidlertid bruk av den konseptuelle nedbør-avrenningsmodell framfor maskinlæringsmodellene for å estimere retensjon. Men det anbefales videre studier for å utforske det fulle potensialet til maskinlæringsmodellene.
- En gjennomgang av alle løsningene som er testet på Høvringen (i alt seks løsninger i tre generasjoner), viser gode fordrøyende egenskaper ved alle løsningene.
- Løsninger med vegetasjon har som forventet høyere retensjon enn løsninger uten vegetasjon.

Innhold

FORORD.....	5
SAMMENDRAG.....	6
1 INNLEDNING.....	10
1.1 MÅL MED RAPPORTEN	10
1.2 HVEM BØR BRUKE RAPPORTEN?	10
1.3 FORDRØYENDE TAK.....	10
1.4 OVERVANNSHÅNDBTERINGSEGENSKAPER.....	11
1.5 HØVRINGEN TESTFELT	11
1.6 TAKLØSNINGER TESTET PÅ HØVRINGEN.....	12
1.7 MODELLERING	12
1.8 HVORDAN BRUKE RAPPORTEN?	13
2 RISIKOVURDERING AV BLÅGRØNNE TAK.....	15
2.1 SAMMENDRAG.....	15
2.2 HVORDAN BRUKE / TOLKE RESULTATENE.....	15
2.3 AKTUELLE REFERANSER.....	15
3 VARIGHETSKURVER.....	16
3.1 SAMMENDRAG.....	16
3.2 HVORDAN BRUKE / TOLKE RESULTATENE.....	16
3.3 KORT FORTALT.....	17
3.4 EKSEMPEL	17
3.5 AKTUELL REFERANSE.....	18
4 AVRENNINGSKOEFFISIENT.....	19
4.1 SAMMENDRAG.....	19
4.2 HVORDAN BRUKE / TOLKE RESULTATENE.....	19
4.3 KORT FORTALT.....	19
4.4 AKTUELL REFERANSE.....	20
5 GEOGRAFISK OG TEMPORÆR FUNKSJON TIL GRØNNE TAK.....	21
5.1 SAMMENDRAG.....	21
5.2 HVORDAN BRUKE / TOLKE RESULTATENE.....	21
5.2.1 <i>Inndeling i geografiske grupper</i>	21
5.2.2 <i>Retensjon</i>	24
5.2.3 <i>Sammenhenger mellom geografi, klima og retensjon</i>	27
5.3 KORT FORTALT.....	28
5.4 AKTUELL REFERANSE.....	28
6 MODELLERING AV FORDRØYENDE TAK I SWMM.....	29
6.1 SAMMENDRAG.....	29
6.2 HVORDAN BRUKE / TOLKE RESULTATENE.....	29
6.2.1 <i>Retensjon og fordrøyning</i>	29
6.2.2 <i>Reduksjon av avrenningstopper</i>	30
6.3 KORT FORTALT.....	34
6.4 EKSEMPEL PÅ BRUK.....	34
6.5 AKTUELL REFERANSE.....	35
7 OVERFØRING AV SWMM-MODELLER MELLOM ULIKE GEOGRAFISKE OMRÅDER.....	36
7.1 SAMMENDRAG.....	36
7.2 HVORDAN BRUKE / TOLKE RESULTATENE.....	36
7.3 KORT FORTALT.....	40
7.4 AKTUELL REFERANSE.....	40
8 HYDROLOGISK YTELSE AV FORDRØYENDE TAK MED LETTKLINKER.....	41
8.1 SAMMENDRAG.....	41

8.2	HVORDAN BRUKE / TOLKE RESULTATENE.....	41
8.3	KORT FORTALT.....	44
8.4	EKSEMPEL PÅ BRUK.....	45
8.5	AKTUELL REFERANSE.....	45
9	FORDRØYENDE TAK UNDER EKSTREME FORHOLD.....	46
9.1	SAMMENDRAG.....	46
9.2	HVORDAN BRUKE / TOLKE RESULTATENE.....	46
9.3	KORT FORTALT.....	49
9.4	AKTUELL REFERANSE.....	49
10	BEDRE KALIBRERINGSRUTINER FOR MODELLERING AV AVRENNING FRA FORDRØYENDE TAK.....	50
10.1	SAMMENDRAG.....	50
10.2	HVORDAN BRUKE / TOLKE RESULTATENE.....	50
10.3	KORT FORTALT.....	52
10.4	AKTUELL REFERANSE.....	52
11	BRUK AV MASKINLÆRING FOR Å SIMULERE AVRENNING FRA FORDRØYENDE TAK.....	53
11.1	SAMMENDRAG.....	53
11.2	HVORDAN BRUKE / TOLKE RESULTATENE.....	53
11.3	KORT FORTALT.....	56
11.4	AKTUELL REFERANSE.....	56
12	NYTT RAMMEVERK FOR DIMENSJONERING AV BLÅGRØNN INFRASTRUKTUR.....	57
12.1	SAMMENDRAG.....	57
12.2	EKSEMPEL PÅ BRUK (FORDRØYENDE TAK).....	58
12.3	AKTUELLE REFERANSER.....	60
13	OVERSIKT OVER RESULTATER FRA HØVRINGEN.....	61
13.1	SAMMENDRAG.....	61
13.2	KOMMENTARER TIL DATABEHANDLING.....	61
13.3	OBSERVASJONER.....	61
13.4	KONKLUSJON.....	63
14	OPPSUMMERENDE FIGURER.....	66
14.1	OPPSUMMERING MÅLT RETENSJON.....	66
14.2	OPPSUMMERING MÅLT REDUKSJON AV AVRENNINGSTOPP.....	76
14.3	OPPSUMMERING AV MÅLT FORDRØYD CENTROIDAVRENNING.....	79
14.4	OPPSUMMERING MÅLT FORDRØYD AVRENNINGSTOPP.....	83
14.5	OPPSUMMERING BEREGNEDE VARIGHETSKURVER.....	83

1 Innledning

1.1 Mål med rapporten

Hensikten med rapporten er å gi en brukervennlig framstilling og gi en kort oversikt over de ulike vitenskapelige artiklene om fordrøyende tak som er publisert med utgangspunkt i Høvringen og hvordan resultatene kan brukes. Videre veiledes interesserte lesere til riktig publikasjon avhengig av problemstilling

For hver artikkel gis det et kort sammendrag av den vitenskapelige artikkelen før det gis en kort redegjørelse for hvordan resultatene kan tolkes og brukes. I noen tilfeller gis det også et eksempel på bruk og en kort oppsummering.

1.2 Hvem bør bruke rapporten?

Rapporten er ment som hjelp til fagpersoner i kommuner, rådgivere og planleggere som ønsker en kort oversikt over kunnskapsfronten på fordrøyende tak (pr 1. januar 2023).

1.3 Fordrøyende tak

I denne rapporten presenteres det resultater fra fordrøyende tak. Fordrøyende tak har et lag under toppdekket for å øke fordrøyningsegenskapene til taket. Det ekstra fordrøyende laget kan bestå av f.eks. en magasinerings- og dreneringsplate eller fordrøyende masse som for eksempel lettklinker. Topplaget kan bestå av sedum eller betongstein, men det finnes også andre alternativer som gress, heller av tre, større bed og ulike konsepter for grønnsakshage.

Figur 1 viser et eksempel på fordrøyende tak med både heller, gress og bed med fordrøyende masser under.



Figur 1 Fordrøyende tak (Foto: Edvard Sivertsen, SINTEF).

1.4 Overvannshåndteringsegenskaper

Fordrøyende tak håndterer overvann på to måter:

- 1) Fordrøyning (også kalt detensjon) av overvannet angir forsinkelsen som skjer når vann renner igjennom et ekstra lag (plate eller porøs masse) og dreneres sakte ut fra taket i løpet av timer og dager etter en regnhendelse.
- 2) Retensjon (også kalt tilbakeholdelse) er mengden vann som aldri drenerer ut, men som "forsvinner" fra taket gjennom evapotranspirasjon. Evapotranspirasjon er en kombinert effekt av fordampning og transpirasjon av vegetasjon. Transpirasjon er altså kun knyttet til grønne planter.

1.5 Høvringen testfelt

En gjennomgang av internasjonal forskning på fordrøyende tak viser at de fleste aspekter ved takene har blitt studert enkeltvis. Derimot forskes det lite på tak som faktisk har blitt bygget og drevet over lengre tid. Dette motiverte til etableringen av Høvringen testfelt for uttesting og dokumentasjon av fordrøyende tak.

Høvringen testfelt er lokalisert på taket til Trondheim kommune sitt avløpsrenseanlegg på Høvringen og består av tre store forsøksfelt, jmf. Figur 2. Feltstasjonen er utstyrt med egen meteorologisk målestasjon og et avansert opplegg for måling av mengde vann som passerer slukene fra hvert av forsøksfeltene. Opplegget for å måle avrenning spenner vidt fra små drypp til ekstremnedbør.



Figur 2 Høvringen testfelt med tre uavhengige tak, felt 1 nærmest kamera (Foto: Tore Kvande, NTNU).

1.6 Takløsninger testet på Høvringen

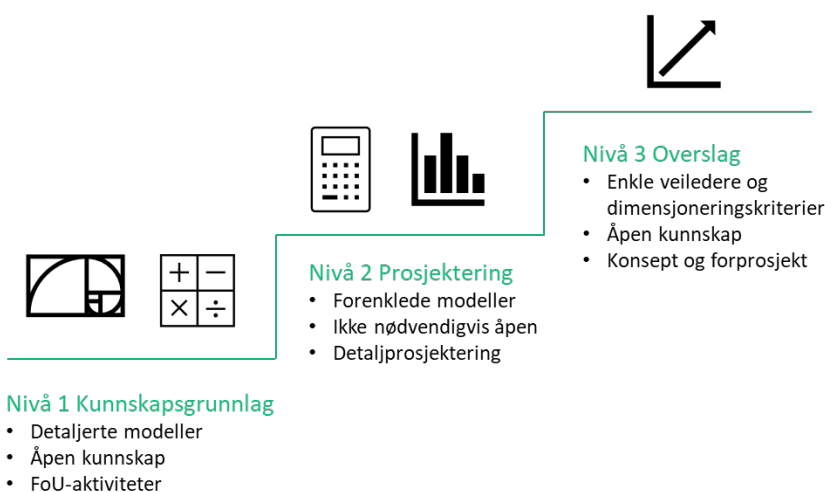
Testfeltet på Høvringen er bygget om to ganger i løpet av senterets 8-årige levetid, slik at det er testet i alt tre generasjoner ulike fordøyende tak. Tabell 1 viser en oversikt over de ulike løsningene, når de er testet, på hvilket felt de har vært installert og detaljert oppbygning.

Tabell 1 Takløsninger testet på Høvringen.

Generasjon	Felt 1	Felt 2	Felt 3
1 (2017-2018)	Fordøyende tak med betongstein som toppdekke: - Betongstein (200x200x70 mm) - 200 mm Leca LWA 1.5-2.5 mm - Geotekstil	Svart tak (referanse)	Fordøyende tak med sedum som toppdekke: - Sedum - Filtduk 10 mm - Magasinerings- og dreneringsplate - Geotekstil
2 (2018-2021)	Fordøyende tak med betongstein som toppdekke: - Betong/Lecastein (200x200x70 mm) - Geonett BDGeo - 100 mm Leca LWA 0-6 mm - Geotekstil Isola Plantex	Svart tak (referanse)	Fordøyende tak med sedum som toppdekke: - Sedum - Filtduk Isola Plantex Patio Fiberduk - 100 mm Leca LWA 0-6 mm - Geotekstil Isola Plantex
3 (2021-2023)	Fordøyende tak med gress som toppdekke: - Gress (ferdigplen) - 100 mm jord - Filtduk Mila 1000 gr - 100 mm Leca LWA 0-6 mm - Geotekstil	Svart tak (referanse)	Fordøyende tak med sedum som toppdekke: - Sedum - Filtduk 800 gr - Ny magasinerings- og dreneringsplate (prototype) - Geotekstil

1.7 Modellering

Høvringen testfelt har vært utgangspunkt for fire PhD-kandidater og flere masteroppgaver, der alt vitenskapelig arbeidet er rapportert gjennom www.klima2050.no. Dette er et solid kunnskapsgrunnlag som danner et godt utgangspunkt for nye eller oppdaterte modeller for prosjektering, men også til å utarbeide noen enkle dimensjoneringskriterier til overslagsberegninger i en tidlig fase av prosjekter. Litt forenklet kan man klassifisere de ulike modellene inn i tre nivå som vist i Figur 3. Modeller på nivå 1 inkluderer detaljerte modeller som beskriver funksjonen til overvannstiltak med stor nøyaktighet. Modeller på nivå 2 inkluderer forenklete modeller som beskriver hovedfunksjonen og de viktigste parametere. Disse modellene kan brukes til detaljprosjektering. Modeller og sammenhenger på nivå 3 er "tommelfingerregler" som kan brukes til å gi enkle overslag i konsept og forprosjekt-faser. Disse modellene gir kun en indikasjon på funksjonen til overvannstiltaket.



Figur 3 Klassifisering av modeller av overvannstiltak.

1.8 Hvordan bruke rapporten?

Denne rapporten er ment som et oppslagsverk og veileder til å finne relevante vitenskapelige artikler som kan studeres i mer detalj. I Tabell 2 gis det en oversikt over tema og bruksområdet som diskuteres i de ulike kapitlene og hvilket modelleringsnivå resultatene er best egnet for.

Overvannshåndtering med fordrøyende tak

Tabell 2 Oversikt over alle kapitlene i rapporten og hvilket tema og bruksområde de omhandler. Nivå angir hvilket modelleringsnivå resultatene er mest egnet for (se Seksjon 1.7).

Kapitel	Tema	Bruksområdet	Nivå
2	Risikovurdering		-
3	Bruk av varighetskurver	Alternativ vurdering av overvannshåndteringsegenskapene.	1, 2
4	Avrenningskoeffisienter	Sammenligner koeffisienter målt i lab og felt.	3
5	Grønne ekstensive tak	Ytelse som funksjon av geografi og årstid.	3
6	Fordrøyende tak	Modeller i SWMM, men det er laget enkle ligninger for overslagsberegninger.	1, 3
7	Grønne ekstensive tak	Overføring av SWMM-modeller mellom ulike geografiske områder. Det er listet opp en god del verdier for ulike parametre benyttet i SWMM.	1, 2
8	Fordrøyende tak med lettklinker	Diskusjon rundt hvilke variabler som påvirker ytelsen til taket. Det er også laget enkle ligninger for overslagsberegninger.	3
9	Fordrøyende tak med lettklinker under intense nedbørshendelser	Vurderer effekten til fordrøyende tak under intens nedbør og ser bl.a. på formen på nedbørsprofilen, varighet og intensitet.	1
10	Fordrøyende tak	Vurderer egnetheten til en enkel konseptuell nedbør-avrenningsmodell og gir en del verdier på modellparametre.	2
11	Grønne ekstensive tak og fordrøyende tak	Bruk av maskinlæring til å forutsi ytelsene til grønne tak.	1, 2
12	Dimensjonering av blågrønn infrastruktur, inklusive tak	Presentasjon av nytt rammeverk som er omforent med treleddsstrategien for overvannshåndtering.	1, 2
13	Samlet oversikt over data fra Høvringen	Dokumentasjon på ytelse for de ulike løsningene testet på Høvringen	-

2 Risikovurdering av blågrønne tak

2.1 Sammendrag

Andenæs har gjennom sitt doktorgradsarbeid utviklet et støtteverktøy for utvikling og bygging av blågrønne tak (fordrøyende tak) (f.eks. Andenæs m.fl., 2022). Verktøyet er utformet som en matrise der fasene i et byggeprosjekt er koplet sammen med de forskjellige fagdisiplinene som er involvert under dimensjonering og bygging av taket. Verktøyet er bygget opp med «sjekkpunkter» for viktige avgjørelser for organisering av prosjektet, klare grensesnitt og tydelig plassering av ansvar. Dette er like viktig som teknisk informasjon for å få til et velfungerende blågrønt tak.

Støtteverktøyet med sjekklister supplerer tilsvarende anvisninger som er utviklet av Klima 2050 tidligere (f.eks. Sivertsen m.fl., 2019 og Elvebakk m.fl., 2018).

2.2 Hvordan bruke / tolke resultatene

Støtteverktøyet kan brukes av prosjektorganisasjonen som jobber med det blågrønne taket, f.eks. i opplæringsøyemed, som del av kontrakt osv. Særskilte sjekklister og referanser til andre verktøy o.l. finnes for alle prosjektets faser og som gir prosjektleder/ansvarlig prosjekterende/byggherre muligheten til å "sjekke ut" de ulike punktene.

2.3 Aktuelle referanser

Andenæs, E, Time, B, Muthanna, T & Kvande, T: Risikorammeverk for blågrønne tak. Klima 2050 Rapport 30, Trondheim 2022. ISBN 978-82-536-1736-7

Andenæs E: Risikorammeverk for blågrønne tak. Byggeindustrien 10/2021 s 26

Andenæs E, Time B, Muthanna T.M Asphaug S & Kvande T: Risk Reduction Framework for Blue-Green Roofs. Buildings 2021, Vol 11(5), 185; doi.org/10.3390/buildings11050185

Elvebakk, K, Time, B, Skjeldrum, P.M & Kvande, T: Ombygging til blågrønne og blågrå tak. Problemstillinger og sjekklister. Klima 2050 Report 10. Trondheim, 2018. ISBN 978-82-536-1583-7

Sivertsen, E, Elvebakk, K, Kvande, T & Time B: Klimatilpasset bygning. Anvisning for anskaffelse i plan- og byggeprosessen. Klima 2050 Report 12. Trondheim 2019. ISBN 978-82-536-1610-0

3 Varighetskurver

3.1 Sammendrag

Johannessen m.fl. (2018) undersøkte retensjon og fordrøyningsegenskapene til grønne ekstensive tak. Arbeidet er basert på 3–8 års felldata fra fire norske byer; Oslo, Trondheim, Sandnes og Bergen. De grønne takene som ble undersøkt representerer flere forskjellige typiske kommersielle konfigurasjoner. Akkumulert retensjon ble funnet å være mellom 11–30 % året sett under ett, mens retensjonen økte til mellom 22–46 % for perioden mai til og med oktober. Retensjonen ble funnet å være primært avhengig av evapotranspirasjon og i mindre grad av lagringskapasiteten til underliggende lag. Videre ble det angitt tilgjengelig lagringskapasitet for større nedbørshendelser enn 5 mm, noe som kan være nyttige for å designe takene med hensyn på fordrøyning. Observert (median) reduksjon i avrenningstopp sammenlignet med nedbøren varierte fra 65 til 90 % avhengig av beliggenhet og takkonfigurasjon. Arbeidet konkluderer med at en hendelsesbasert tilnærming for å evaluere fordrøyningsegenskapene er utfordrende på grunn av lokale variasjoner i nedbør og nedbørmønstre. En alternativ tilnærming ved å bruke varighetskurver av observert nedbør og avrenning ble introdusert, testet og funnet å gi verdifull informasjon om avrenningsmønsteret.

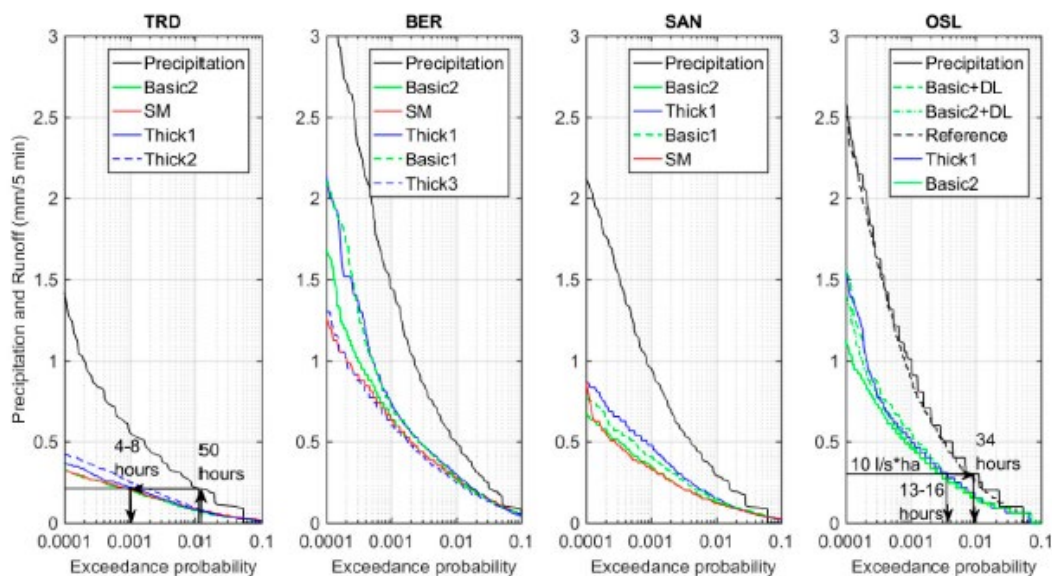
3.2 Hvordan bruke / tolke resultatene

En varighetskurve er en kurve som viser sammenhengen mellom størrelsen av en variabel og den del av observasjonstiden den variabelen har hatt minst samme eller høyere verdi, se Figur 4. Ofte brukes ett år eller mer som observasjonstid, for eksempel vil en varighetskurve for avrenningen vise en kumulativ frekvenskurve over prosent av (den observerte) tiden at en spesifisert nedbørshendelse (eller avrenning) ble oppnådd/overgått. En slik kurve inkluderer alle data om nedbør eller avrenning i observasjonsperioden, uten å ta hensyn til når nedbøren/avrenningen skjedde. Dataene sorteres istedenfor etter størrelse på nedbøren.

Varighetskurver over nedbør og avrenning viser størrelse og omfang av høy-intensiv nedbør og avrenning som typisk vil inntreffe sjelden oppe og til venstre i grafene vist i Figur 4. Denne delen vil være avhengig av lokale klimatiske forhold og nedbørmønstre. Nede til høyre i grafene vises lav-intensive nedbørhendelser som vil inntreffe med stor sannsynlighet, og samtidig indikerer denne delen midlertidig lagringskapasitet i systemet. For et svart tak vil varighetskurven for avrenning være noenlunde lik varighetskurven for nedbør. Johannessen m.fl. (2018) beskriver at de målte dette for et svart tak i Oslo, men nevner at økt dreneringslengde (lengde på tak, dvs. konsentrasjonstid) vil føre til små forskjeller mellom de to kurvene. En måte å bruke disse kurvene på er å sammenligne ulike løsninger, der den løsningen som har den varighetskurven som ligger lavest vil ha bedre fordrøyningsegenskaper enn de andre løsningene.

Varighetskurver gjelder kun for den perioden man har observasjonsdata fra. Hvis en kurve er basert på det man definerer som en langtids-serie så kan kurven ansees som en sannsynlighetskurve for den gitte avrenningen eller nedbøren. Kurven kan da brukes til å estimere hvor stor prosent av tiden en angitt avrenning/nedbør vil oppnås eller overgås i framtiden (pluss eventuelle klimapåslag).

I forhold til overvannshåndtering vil det være interessant å bruke varighetskurver fra et gitt område for å kunne definere hvor stor andel av den årlige nedbøren som kan håndteres ved å installere en løsning, eller en serie av løsninger.



Figur 4 Eksempel på varighetskurver for nedbør og avrenning, fra Johannessen m.fl. (2018).

Fordelen med en varighetskurve er at den inkluderer avrenning fra alle tids-steg, og blir derfor ikke påvirket av hvordan man definerer en nedbørshendelse. Kurvene baserer seg på all avrenningsdata, inkludert effekten av regnvarigheten og effekten av variabel intensitet på nedbøren. Man kan derfor ut fra slike kurver kunne vurdere hvordan en løsning reduserer avrenning, gitt alle nedbørshendelser. X-aksen til kurvene angir sannsynligheten for at taket skal oppleve nedbør som overgår grenseverdier for avrenning (hver enkelt løsning har en gitt grenseverdi på hvor mye nedbør/avrenning den kan håndtere), og for å undersøke mulige kapasitetsproblemer over tid.

3.3 Kort fortalt

Bruk av varighetskurver kan benyttes til å vurdere hvordan en løsning (eventuelt flere løsninger i serie) kan redusere avrenning gjennom årets normalsituasjoner, og vil dermed kunne gi en god pekepinn på hvor mye kapasitet man kan frigjøre i ledningsnettet (hvis det benyttes ledningsnett). Kurvene vil ikke være særlig nyttige for å si noe om effekten av en løsning for å redusere flomtopper i ekstreme nedbørsituasjoner. Kurvene vil uansett vise hvor mye reduksjon av totalt vannvolum man kan forvente nedstrøms en implementert løsning.

Utfordringen er at man må samle inn observasjonsdata for nedbør over en lengre periode, helst ett år eller mer. Dette må gjøres før man installerer noen form for løsning. Varighetskurver representerer situasjonen på et lokalt gitt sted. Kurvene er basert på målinger på et gitt sted over en gitt periode, og vil derfor kun representere effekten på avrenning for den gitte lokasjonen. Den gitte lokasjonen har spesifikke klimatiske karakteristikk som påvirker hvordan nedbør fordeler seg, total mengde nedbør, intensitet på nedbør etc.

3.4 Eksempel

En måte å bruke kurvene på er å sammenligne ulike løsninger, der den løsningen som har den varighetskurven som ligger lavest vil ha bedre fordrøyningsegenskaper enn de andre løsningene. Dette gjelder hvis man måler avrenningskurvene for de ulike løsningene (i 1 år +).

Johannessen m.fl. (2018) viser flere eksempler på varighetskurver, jmf. Figur 4. For Trondheim er det vist et tenkt eksempel der man har overløpsdrift 50 timer i året fra et gitt system. Ved å installere en av variantene av grønt tak slik som diskutert i artikkelen vil overløpstiden reduseres til et sted mellom 2-8 timer. For Oslo er det ofte et påslippskrav fra et

område lik 10 l/s/ha. Fra figurene ser man at ved å benytte kun svart tak vil dette kravet overstiges 34 timer i året, mens ved å installere en variant av det grønne taket vil kravet kun overstiges 13-16 timer. I det siste tilfellet vil det være nødvendig å installere flere løsninger for å møte kravet om påslipp, men man ser at det grønne taket hjelper et godt stykke på veg.

3.5 Aktuell referanse

Johannessen, B.G, Muthanna, T.M & Braskerud, B.C: Detention and Retention Behavior of Four Extensive Green Roofs in Three Nordic Climate Zones. Water 2018, Vol. 10(6), p. 671; doi: 10.3390/w10060671, ISSN 2073-4441

4 Avrenningskoeffisient

4.1 Sammendrag

Schärer m.fl. (2020) sammenligner avrenningskoeffisienter fra ulike grønne ekstensive tak målt både i laboratoriet og i feltstudier. Laboratoriemålingene følger metodikken beskrevet i den tyske 'FLL Guideline', en av verdens mest brukte standarder for grønne tak. Laboratoriemålingene ble utført både for komplette tak og for enkeltkomponenter, der bidraget fra hvert lag gjenspeiles i den totale avrenningskoeffisienten for en løsning. Avrenningskoeffisientene fra laboratoriemålingene ble sammenlignet med målinger av lignende tak plassert i Oslo, Trondheim, Sandnes og Bergen, der avrenningskoeffisientene ble beregnet ved å bruke observert nedbør og avrenning. Hendelser som hadde en kumulativ nedbør som er sammenlignbare med laboratoriehendelsene, men lengre varigheter, ble valgt. Disse hendelsene gav betydelig lavere og varierende avrenningskoeffisienter, noe som tydelig viser begrensningen ved å velge en passende avrenningskoeffisient for et gitt tak basert på laboratorieforsøk. Det ble imidlertid konkludert med at laboratorieforsøk er viktig i å forstå de underliggende strømningsprosessene i de forskjellige lagene i et fordrøyende tak.

4.2 Hvordan bruke / tolke resultatene

Avrenningskoeffisienten fra vanlige komponenter i typiske grønne ekstensive tak ble testet individuelt og som system tilsvarende oppbygningen av grønne tak. Den tyske standarden for testing av grønne tak, FLL, ble brukt for gjennomføringen av testen. FLL-metoden bruker en 15 minutters nedbørshendelse på 27 mm. Dette tilsvarer en ekstrem hendelse i Norge, over 100 års gjentakintervall for Oslo, Bergen og Trondheim, men FLL-metoden er mye brukt i tidligere studier, og ble valgt i denne oppgaven for å kunne sammenstille resultater med tidligere resultater. I tillegg ble en hendelse tilsvarende 11.4 mm på 15 minutter brukt, noe som er mer relevant for norske forhold. Til sammenligning tilsvarer dette en 5 års hendelse i Bergen, 10 års hendelse i Sandnes, mellom en 2 og 5 års hendelse i Oslo, og en 50 års hendelse i Trondheim. Det ble også gjort en sammenstilling mellom avrenningskoeffisienter beregnet basert på observerte data på Klima 2050 sin pilot og testfelt på Høvringen og laboratorieforsøkene.

Laboratorieforsøkene gav stor variasjon i beregnet avrenningskoeffisient basert på FLL-metoden. I FLL-metoden defineres avrenningskoeffisient som forholdet mellom totalt volum i nedbørshendelsen og volumet som har rent av ved nedbørens slutt, dvs. etter 15 minutter i disse forsøkene. Avrenningskoeffisienten varierte fra 0.3 til 0.9 for de fire ulike oppbygningene for grønne tak.

4.3 Kort fortalt

Avrenningskoeffisienter for reelle takoppbygninger ble målt i laboratorium og i felt. Tre av de grønne takene var like de som ligger på Klima 2050 sin pilot og testfelt på Høvringen og som fire av de grønne takene bygget for forskning i Oslo, Bergen, Sandnes og Trondheim. Avrenningskoeffisienter fra et grønt ekstensivt tak uten ekstra fordrøyning varierte fra 0.02 til 0.41. Sammenlignet med laboratorieforsøkene for samme type tak ble avrenningskoeffisienten funnet å være 0.74 for FLL hendelsen med 27 mm nedbør. Variasjonene i avrenningskoeffisienten kan forklares med fuktigheten i substratet på taket ved start av nedbør, luftfuktighet, temperatur og vind, da dette driver evapotranspirasjonen.

Den store variasjonen i målte avrenningskoeffisienter mellom lab og i felt illustrerer utfordringene med å beregne effekten av grønne tak med en enkel avrenningskoeffisient. Ved den rasjonelle metoden prøver vi å «beregne hele hydrologien» i en enkel koeffisient, det sier seg selv at det er utfordrende. Metoden gir en beregning for maksavrenning, men dette er bare

delvis nyttig for prosjektering av grønne tak. Bruk av den rasjonelle metoden bør gjøres sammen med en volumbasert metode.

4.4 Aktuell referanse

FLL 2008 Guideline for the Planning, Construction and Maintenance of Green-Roofing-Green Roofing Guideline. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V.

Schärer L.A, Busklein J.O, Sivertsen E & Muthanna E: Limitations in using runoff coefficients for green and gray roof design. Hydrology Research 2020, Vol 51(2), p. 339–350; doi:10.2166/nh.2020.049

5 Geografisk og temporær funksjon til grønne tak

5.1 Sammendrag

Johannessen m.fl. (2017) brukte historiske data om daglig temperatur og nedbør sammen med en vannbalansemodell for grønne tak kombinert med Oudin-modellen for evapotranspirasjon for å se på effekten av maksimal lagringskapasitet for grønne tak (S_{max}) og evapotranspirasjon. Både årstidsvariasjoner og ulike geografiske klimatiske gradienter i Nord-Europa ble studert. Det ble funnet store forskjeller i årlig retensjon av overvann mellom lokasjoner forårsaket av forskjeller i temperatur og nedbørmengder. Høyeste retensjon i absolutte verdier ble funnet for de våteste stedene, mens de varmeste og tørreste stedene viste høyest retensjon i prosent av årlig nedbør (opptil 58 % sammenlignet med 17 % for det nedre området). Den høyeste retensjon ble observert om sommeren, fra 52 % til 91 %.

Årlig retensjon økte både med en økning i plantevannbruk (spesifikke avlingsfaktorer, K_c) og med en økning i S_{max} , men ble funnet å være mer følsom for endringer i K_c enn for endringer i S_{max} . Derfor er evapotranspirasjonen den begrensede faktoren for retensjonskapasitet av grønne tak på kalde og våte steder, men relativt store endringer i evapotranspirasjon vil være nødvendig for å ha innvirkning på retensjonen. Potensialet for å bruke vegetasjon med høyere vannbruk for å gjenvinne retensjonskapasiteten raskere mellom hendelser i disse regionene er imidlertid begrenset av risikoen for permanent utdøing av ikke-sukkulente vegetasjon. Det konkluderes med at en betydelig økning i taklagringskapasiteten i de underliggende lagene vil være nødvendig for å redusere denne risikoen.

5.2 Hvordan bruke / tolke resultatene

5.2.1 Inndeling i geografiske grupper

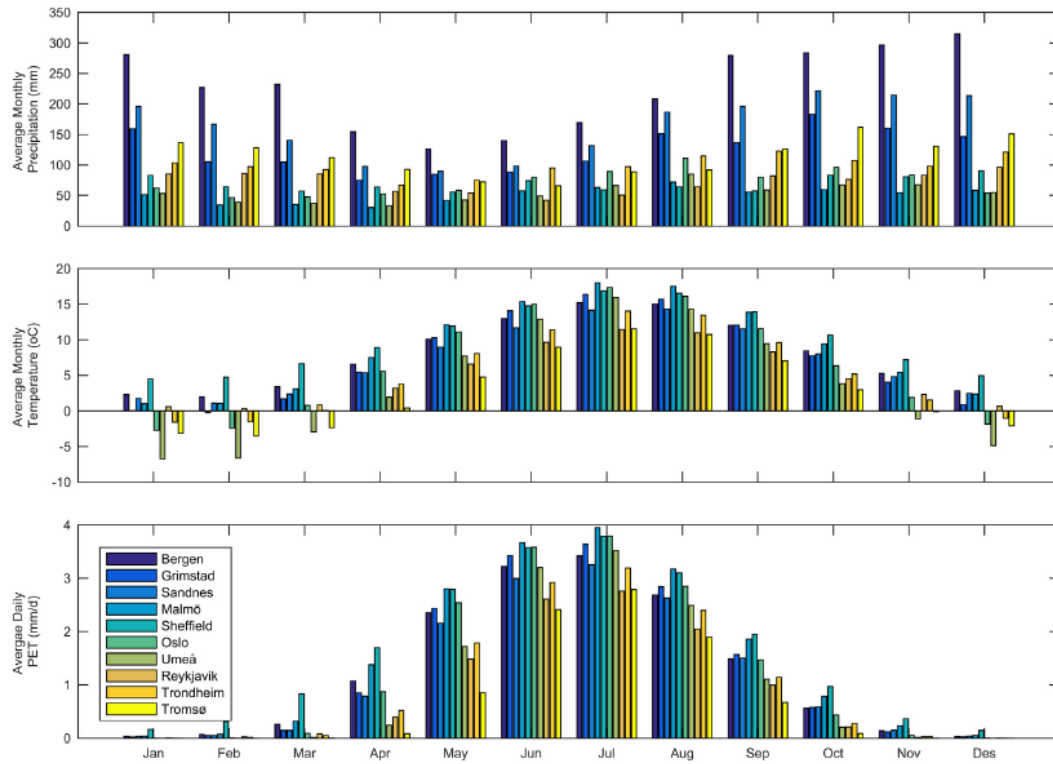
Betydelige forskjeller i kritiske faktorer for ytelsen til de grønne takene ble funnet mellom lokasjoner, men korrelerte som forventet sterkt med klimaindekser. Noen av dataene er gjengitt i Figur 5 og Tabell 3.

Det våteste stedet, Bergen har fire ganger mer akkumulert årlig nedbør, og dobbelt så mange nedbørsdager som det tørreste stedet, Malmö. Vekstsesongen i Sheffield er mer enn dobbelt så lang som i Tromsø. Gjennomsnittlig årstemperatur var sterkt korrelert med flere av indeksene, og kan brukes som en indikator på klimatiske forhold. Basert på månedlig gjennomsnittstemperatur og akkumulert nedbør ble fire hovedgrupper av lokaliteter identifisert. Grimstad, Sandnes og Bergen ble klassifisert som kystklima med mye årlig nedbør og milde vintre (gruppe 1). Malmö og Sheffield hadde lav årlig nedbør, varme somre og mild vinter (gruppe 2). Oslo og Umeå hadde mer et innlandsklima med lav årsnedbør, høye sommertemperaturer, men også kalde og lange vintre (gruppe 3). De nordlige kyststedene Reykjavik, Trondheim og Tromsø hadde lave temperaturer hele året, middels årlig nedbør og lange og kalde vintre (gruppe 4).

Oppsummert:

- Gruppe 1: Kystmiljø. Høy årlig nedbør. Milde vintere. (Bergen, Grimstad, Sandnes)
- Gruppe 2: Lav årlig nedbør. Varme somre. Milde vintere. (Malmö, Sheffield)
- Gruppe 3: Innenlandsklima. Lav årlig nedbør. Varme somre. Kalde og lange vintere. (Oslo, Umeå)
- Gruppe 4: Nordlige kystmiljø. Årlig lave temperaturer. Medium årlig nedbør. Lange og kalde vintere. (Reykjavik, Trondheim, Tromsø)

Overvannshåndtering med fordøyende tak



Figur 5 Akkumulert gjennomsnittlig månedlig nedbør (topp), temperatur (middel) og gjennomsnittlig daglig evapotranspirasjon (nederst) for normalperioden 1986-2015 sortert for hver by, fra Johannessen m.fl. (2017).

Tabell 3 Oversikt over historiske værdata og klimaindikatorer for de ulike byene, fra Johannessen m.fl. (2017). Tall i parentes er standardavvik eller minimum/maksimumsverdier (gjelder for *)

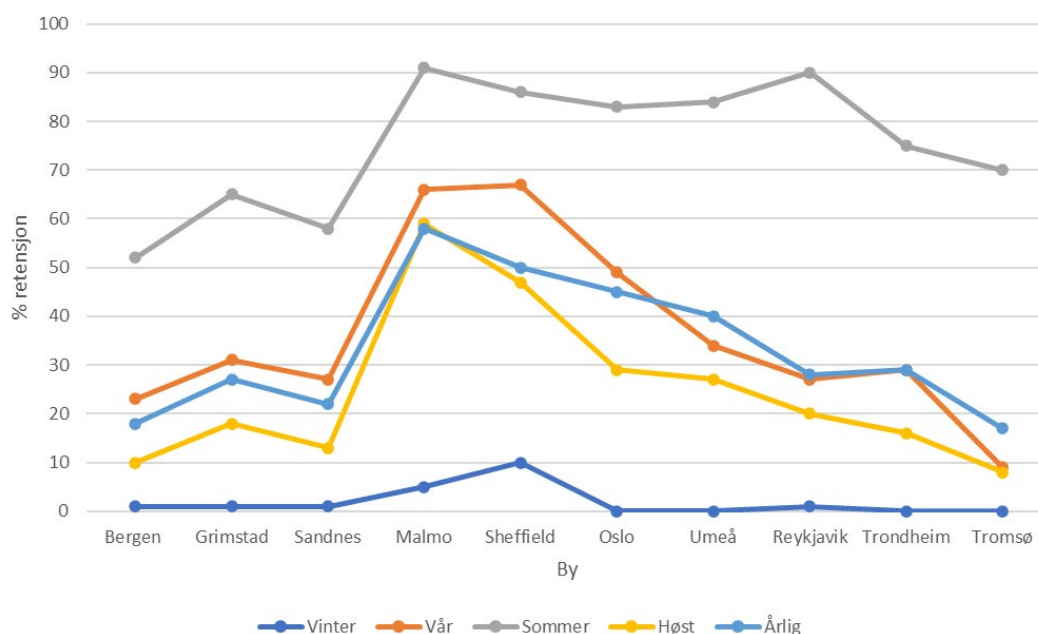
	Gruppe 1			Gruppe 2		Gruppe 3		Gruppe 4		
	Bergen Norway	Grimstad Norway	Sandnes Norway	Malmö Sweden	Sheffield England	Oslo Norway	Umeå Sweden	Reykja-vik Iceland	Trondheim Norway	Tromsø Norway
Latitude	60.38	58.34	58.87	55.58	53.38	59.94	63.81	64.08	63.41	69.65
Longitude	5.33	8.52	5.76	20.24	1.48	10.72	13.08	21.54	10.41	18.94
Altitude	12	6	19	10	131	94	20	52	127	100
Köppen-Geiger klimatisk klasse	Cfb	Dfb	Cfb	Cfb	Cfb	Dfb	Dfc	Cfc	Dfc	Dfc
Årlige værindikatorer										
Akkumulert nedbør (mm)	2715 (450)	1502 (375)	1953 (281)	612 (91)	833 (143)	861 (146)	653 (119)	861 (133)	1191 (184)	1358 (156)
Dager med nedbør	205 (18)	144 (18)	193 (20)	107 (11)	132 (14)	122 (15)	106 (13)	154 (17)	174 (14)	170 (15)
Gjennomsnittlig temperatur	8.0 (0.9)	7.4 (0.9)	7.2 (0.9)	8.9 (0.8)	10.2 (0.6)	6.6 (1.0)	3.7 (1.0)	5.0 (0.7)	5.3 (1.1)	3.0 (0.8)
Vinter forhold										
Akkumulert nedbør som snø (mm)	48 (36)	126 (89)	66 (40)	28 (25)	9 (12)	104 (43)	172 (50)	93 (45)	177 (70)	461 (140)
Antall vinterdager	28 (18)	50 (24)	35 (20)	35 (21)	7 (7.8)	79 (21)	122 (17)	65 (17)	77 (23)	123 (21)
Gjennomsnittlig minimum vintertemperatur*	-6 (-14)	-11 (-19)	7 (-16)	-9 (-20)	-2 (-7)	-13 (-22)	-22 (-31)	-9 (-12)	-14 (23)	-12 (16)
Barfrost (d)	8 (8)	11 (10)	7 (5)	15 (11)	3 (3)	17 (9)	17 (13)	17 (13)	9 (8)	7 (9)
Gjennomsnittlig minimumstemperatur under barfrost *	-3.6	-4.8	-3.7	-5.3	-1.7	-6.8		-5.7		-2.7
Antall fryse-tine sykluser	7 (3)	11 (4)	8 (2)	9 (4)	2 (2)	13 (4)	18 (4)	19 (5)	14 (3)	17 (4)
Vekstsesong										
Antall sommerdager	6 (6)	5 (5)	3 (3)	14 (9)	9 (7)	12 (8)	3 (5)	0.3 (0.2)	3 (4)	0 (0)
Lengde på vekstsesong	258 (44)	224 (34)	235 (46)	254 (27)	318 (27)	196 (18)	160 (13)	177 (30)	182 (26)	131 (19)
Varmesum	1391 (207)	1450 (186)	1212 (201)	1830 (159)	1948 (184)	1518 (164)	1107 (137)	686 (121)	1016 (187)	603 (106)

5.2.2 Retensjon

Artikkelen presenter resultater for retensjon av regnvann (% holdt igjen) av grønne tak for de ulike byene. Det er presentert verdier både som funksjon av årstid, samt årlig retensjon, se Tabell 4 og Figur 6.

Tabell 4 Minimum lagringskapasitet for å unngå tørke, foreslått minimum lagringskapasitet og årlig retensjon som funksjon av gruppe/byer, data fra Johannessen m.fl. (2017).

		Minimum lagringskapasitet for å unngå tørke < 1/3.3–3.9 år (mm)	Minimum lagringskapasitet for å unngå tørke < 1/30 år (mm)	Foreslått design lagringskapasitet (mm)	Retensjon av overvann (%)				
					Vinter	Vår	Sommer	Høst	Årlig
Gruppe 1	Bergen	27	45	30	1	23	52	10	18
	Grimstad	35	52	40	1	31	65	18	27
	Sandnes	27	42	30	1	27	58	13	22
Gruppe 2	Malmö	50	>65	50	5	66	91	59	58
	Sheffield	40	>65	40	10	67	86	47	50
Gruppe 3	Oslo	39	50	40	0	49	83	29	45
	Umeå	38	59	40	0	34	84	27	40
Gruppe 4	Reykjavik	26	41	30	1	27	90	20	28
	Trondheim	24	44	30	0	29	75	16	29
	Tromsø	25	29	30	0	9	70	8	17



Figur 6 Retensjon av grønne tak i de ulike byene som funksjon av årstidene.

Ut fra Figur 6 kan man observere følgende:

- Gruppe 1 og 2: % retensjon følger samme mønster for alle årstider/årlig. Milde vintere.
- Gruppe 3 og 4: % retensjon årlig avviker fra vår/sommer, og følger sin egen kurve. Kalde og lange vintere.

Man kan dermed konkludere med:

- Gruppe 1 og 2: Retensjon styres av alle årstider, da vinteren ikke er så kald og lang.
- Gruppe 3 og 4: Kalde og lange vintere. Retensjon styres derfor mye av sommer-situasjonen.

Det er også sett nærmere på forskjellen mellom retensjon om sommer versus retensjon om vår/høst. Det er valgt å se bort fra retensjon om vinter da den er neglisjerbar for alle grupper utenom gruppe 2. Gruppe 2 har lav årlig nedbør og milde vintere, noe som kan legge til rette for retensjon også om vinteren da de grønne takene ikke vil være mettet, og temperaturen ofte er av en slik grad at retensjon/fordampning kan oppnås. For å få en lik sammenligning har vi i tabellene under valgt å se bort fra vinter retensjon også for gruppe 2 (som var henholdsvis 5 og 10 % for Malmø og Sheffield).

Hvor mye høyere retensjon er om sommeren enn om vår og høst er angitt i Tabell 5 og Tabell 6 for henholdsvis byene og gruppene. Retensjon om vår og høst er angitt som et snitt av de to. Man kan se at det er svært stor forskjell mellom byene, noe som også gjengir seg i gruppene hvor snittet av byene er beregnet. Tallene fra Tabell 5 viser derimot at tallene innad i gruppene ligger noenlunde på samme nivå, utenom for Tromsø, som for så vidt er en by som ligger en god del lenger nord enn da andre byene og derfor også har en lengere og kaldere vinter (som påvirker både høst- og vårdato). Når man ser på tallene for snittet innad i gruppene, Tabell 6, ser man hvor stor forskjell det er mellom de ulike klimaene. I et generelt kaldere klima vil retensjon om sommeren utgjøre en mye større andel enn retensjon om vår/høst enn i et klima med mildere vintere, slik som representert ved gruppe 2. Grunnen til dette er at retensjon i disse byene også vil skje i større grad om vår, høst og sommer på grunn av høyere temperatur enn i de kalde klimaene.

Tabell 5 Sommer retensjon sammenlignet med vår/høst retensjon for byene.

	Gruppe 1			Gruppe 2		Gruppe 3		Gruppe 4		
	Bergen	Grimstad	Sandnes	Malmö	Sheffield	Oslo	Umeå	Reykjavik	Trondheim	Tromsø
Gjennomsnitt høst-vår-vinter [%]	17	25	20	63	57	39	31	24	23	9
Forskjell sommer mot gjennomsnitt over året [%]	215	165	190	46	51	113	175	283	233	724

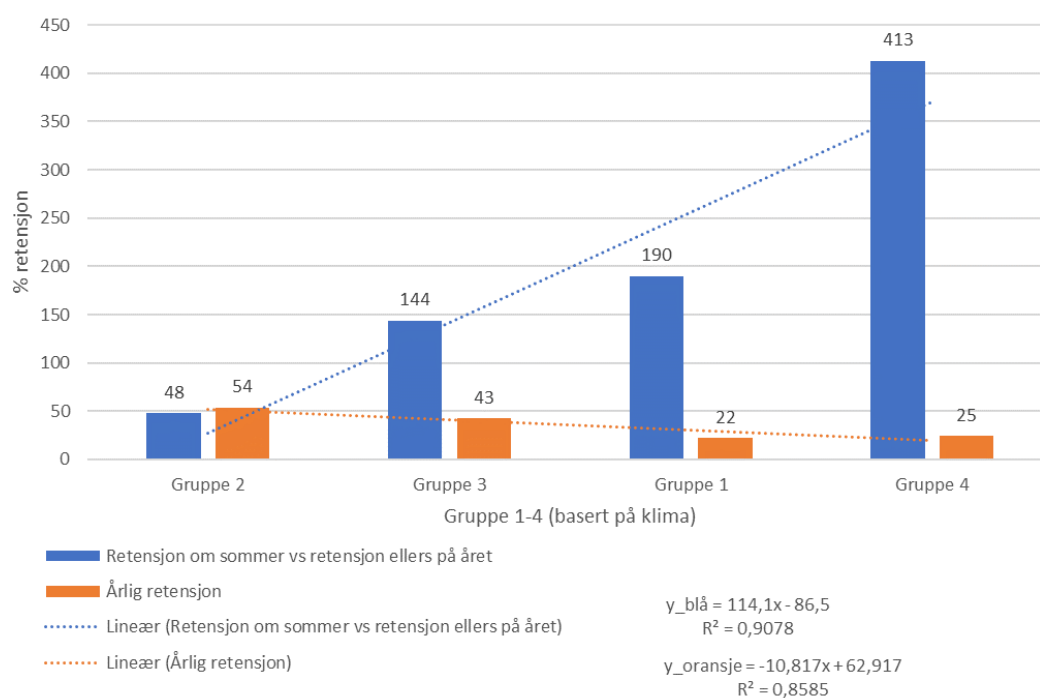
Tabell 6 Sommer retensjon sammenlignet med vår/høst retensjon for gruppene (gjennomsnitt av byene i de ulike gruppene).

	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	Gruppe 4
Forskjell sommer mot gjennomsnitt [%]	190	48	144	413
Årlig retensjon [%]	22	54	43	25

I Figur 7 er dataene fra Tabell 7 plottet. De viser at det kan være en korrelasjon mellom årlig retensjon og hvor mye retensjon har å si i forhold til total retensjon. Det kan også tyde på at dette korrelerer mot typen klima; generelt varmere klima har høyere årlig retensjon (som forventet), og sommerens betydning er redusert. En lavere årlig retensjon er korrelert med en høyere betydning av sommerens retensjon, og et klima som har lange og kalde vintere.

Tabell 7 Data for retensjon for de ulike grupper av byer, sortert etter årlig retensjon, jmf. Figur 7.

	Gruppe 2	Gruppe 3	Gruppe 1	Gruppe 4
Forskjell sommer mot gjennomsnitt [%]	48	144	190	413
Årlig retensjon [%]	54	43	22	25
Byer	Malmø, Sheffield	Oslo, Umeå	Bergen, Grimstad, Sandnes	Reykjavik, Trondheim, Tromsø



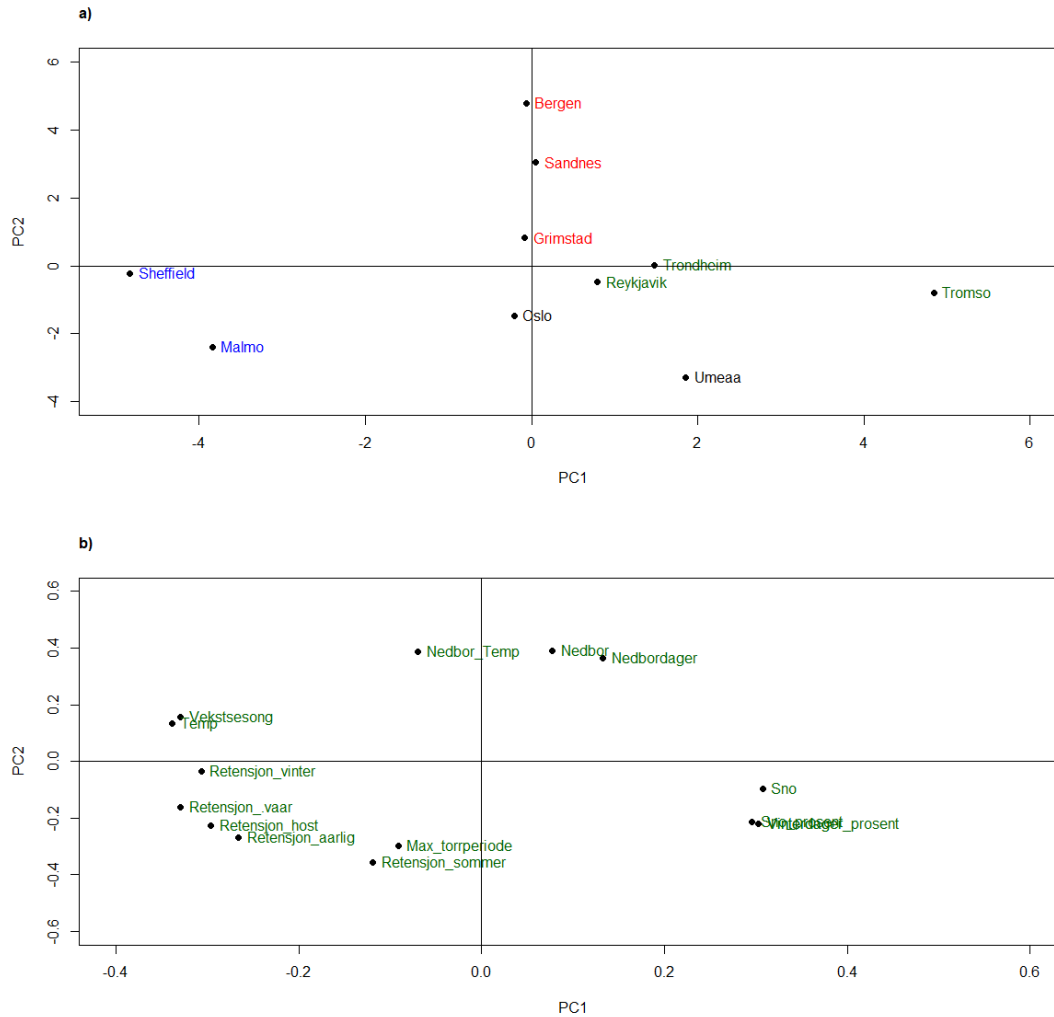
Figur 7 Årlig retensjon og sommerens betydning for retensjon som funksjon av gruppe.

5.2.3 Sammenhenger mellom geografi, klima og retensjon

For å se etter sammenhenger mellom dataene for klima og retensjon er det utført en prinsipalkomponentanalyse. Figur 8 viser skårplott og tilhørende ladningsplott for prinsipalkomponentene 1 og 2 (a og b). I ladningsplottene er de ulike byene farget i henhold til de fire gruppene. Prinsipalkomponentene 1 og 2 forklarer 89 % av variasjonen i dataene og viser klare korrelasjoner. Vi kan bl.a. observere:

- Prinsipalkomponent 1 skiller mellom byer som har mye snø versus byer som har høy temperatur og lang vekstsesong:
 - Malmø og Sheffield skårer lavt og har dermed høy temperatur, lang vekstsesong og lite snø.
 - Tromsø skårer høyt langs denne akse og har dermed lav temperatur, kort vekstsesong og mye snø.
 - Umeå, Trondheim og til dels Reykjavik skårer middels høyt langs denne akse og har mer snø enn, lavere temperatur og kortere vekstsesong enn Oslo, Grimstad og Sandnes.

- Prinsipalkomponent 2 skiller mellom byer som har mye nedbør og mange nedbørdager versus byer som har lang tørreperiode:
 - Sandnes har høy nedbør og mange nedbørdager, mens Umeå, Malmø og Oslo har mindre nedbør og færre nedbørdager.
 - De øvrige byene samler seg rundt null og denne komponenten skiller lite med hensyn på nedbør, nedbørdager og tørke.



Figur 8 Skår (a) og ladningsplott (b) for et utvalg av data, PC1-PC2 forklarer hhv. 50%, 39% av variasjonen i dataene (de tre punktene som ligger oppå hverandre nederst til høyre i ladningsplottet er hhv. "Vinter_dager", "Vinterdager_prosent" og Sno_prosent").

5.3 Kort fortalt

Artikkelen diskuterer ulike modeller for å modellere evapotranspirasjon for grønne tak og presenterer mye data fra ulike byer. Resultatene kan brukes til å anslå en forventet årlig retensjon basert på geografisk beliggenhet og klimatisk nærhet til de byene som er benyttet.

5.4 Aktuell referanse

Johannessen, B.G, Hanslin, H.M & Muthanna, T.M: Green roof performance potential in cold and wet regions. Ecological Engineering 2017, Vol. 106, Part A, p. 436-447; doi:10.1016/j.ecoleng.2017.06.011, ISSN 0925-8574

6 Modellering av fordrøyende tak i SWMM

6.1 Sammendrag

Hamouz og Muthanna (2019) har studert hvordan blågrønne tak kan modelleres med fokus på retensjons- og fordrøyningsegenskapene. Studien har brukt *Storm Water Management Model* (SWMM) 5.1.012 og den innebyggede *Low Impact Development* (LID)-modulen. Den hydrologiske ytelsen til både et grønt («sedumtak») og et grått (ikke-vegetert) fordrøyende tak basert på ekstrudert lettvekts klinker montert på Høvringen, Trondheim, ble modellert ved å definere de fysiske parameterne til de individuelle taklagene. Høyoppløselige 1-minuttsdata ble brukt i kalibrering og validering. Seks parametere innenfor de enkelte LID-lagene: jord (fire parametere) og dreneringsmatte (to parametere) ble valgt for kalibrering. Kalibrering simulerte SWMM-modellen avrenning med en Nash-Sutcliffe-modelleffektivitet (NSME) på 0,94 (grønt tak) og 0,78 (grått tak) og en volumfeil på 3 % for det grønne taket, og 10 % for det grå taket. Validering av modellen indikerer god overensstemmelse mellom observert og simulert avrenning med en NSME på 0,88 (grønt tak) og 0,81 (grått tak) og med volumfeil på 29 % (grønt tak) og 11 % (grått tak).

Når det gjelder snøsmeltingsmodelleringen, viste den kalibrerte modellen en NSME på 0,56 (grønt tak) og 0,37 (grått tak) gjennom vinterperioden. Når det gjelder volumfeil er det imidlertid behov for ytterligere modellutvikling for vinterforhold; 30 % (grønt tak) og 11 % (grått tak). Optimale parametersett ble foreslått innenfor både den grønne og grå konfigurasjonen.

Resultatene fra kalibrering og spesielt validering indikerte at SWMM kunne brukes til å simulere ytelsen til forskjellige takløsninger. Studien gir innsikt for byplanleggere i hvordan de kan målrette og fokusere implementeringen av takløsninger som overvannstiltak.

6.2 Hvordan bruke / tolke resultatene

Artikkelen har anvendt store mengder data for fordrøyende tak fra Høvringen i Trondheim for å lage en SWMM-modell som kan simulere den hydrologiske ytelsen til slike tak. Det er et verktøy som er tilgjengelig for alle å ta i bruk, men avhenger av at man har kjennskap til bruken av SWMM. Tabell 8 gjengir utvalgte data fra Hamouz og Muthanna (2019) og viser blant annet hydrologiske data for vanlig svart tak og et grønt og et grått fordrøyende tak gjennom ulike nedbørsepisoder (takene er generasjon 1-løsningene vist i Tabell 1).

6.2.1 Retensjon og fordrøyning

Resultatene viser at det grå taket yter bedre enn det svarte taket og det grønne taket når det gjelder fordrøyning av nedbøren. Det grå taket endrer avrenningen fra hurtig og intens til en avrenning definert av lav intensitet og lang varighet. Artikkelen viser videre en forskjell mellom grått og grønt tak når det gjelder antallet overløpshendelser og varigheten på disse hendelsene. Da de grå takene klarer å holde tilbake en større mengde vann enn de grønne takene, og reduserer på denne måten avrenningstoppene. Dette gjelder både for kortere og mer intense nedbørshendelser, som vi skal se nærmere på under, og for lengere og mindre intense nedbørshendelser. **Grå tak bør derfor benyttes hvis hovedhensikten er fordrøyning.**

Når man ser på takenes evne til å holde igjen vann gjennom evapotranspirasjon, så snus naturlig nok trenden ved at det grønne taket yter bedre enn det grå taket. Dette fordi det grå taket har ingen transpirasjon. Selve lagringskapasiteten er mindre (i et grønt) enn i et grått tak (som man også ser av fordrøyningseffekten), men vannet slippes saktere videre enn fra et grått tak. I varme perioder (hvor fordamping er høyest) holdt det grønne taket igjen betydelige mengder vann. Det grønne taket holdt igjen 29 % av total nedbør, og holdt igjen 73 % mer enn det grå taket. **Grønne tak bør derfor benyttes hvis hovedhensikten er retensjon.**

I områder med mye kaldt klima anbefaler artikkelen at man bør vurdere grå tak på grunn av at fordampning har en begrensende effekt fra grønne tak i kaldere områder. Det er også mindre behov for drift og vedlikehold av et grått tak sammenlignet med et grønt tak.

Tabell 8 Hydrologiske data for svart, grønt og blått tak på Høvringen, fra Hamouz og Muthanna (2019).

Hendelse	Varighet [min]	Nedbør [mm]	Avrenningstopp [l/min]			Avrenningsvolum [mm]		
			Svart	Grønt	Grått	Svart	Grønt	Grått
1	2129	18.8	10.73	1.2	1.4	18.3	5.6	15.4
2	1017	15.1	14.62	4.22	2.08	15.9	6.9	14.8
3	4479	65.4	20.63	12.78	4.17	62.4	57.5	62.6
4	3341	26.4	26.55	3.31	0.91	25.5	19.6	22.7
5	7	3.2	62.12	2.87	1.65	3	0.2	0.2
6	1086	12.8	12.1	3.24	2.08	13.9	6.3	12.5
7	1727	57.7	102.74	26.03	7.09	63.8	58.6	61.3
8	934	12.4	48.07	2.21	1.34	12.2	5.6	9.2
9	579	7.9	17.3	1.38	0.87	7.7	0.7	5
10	4556	23.7	19.83	5.84	2.3	26.3	24.4	25.7
11	10067	94.7	12.67	10.21	5.85	97.3	94.6	96.6

6.2.2 Reduksjon av avrenningstopper

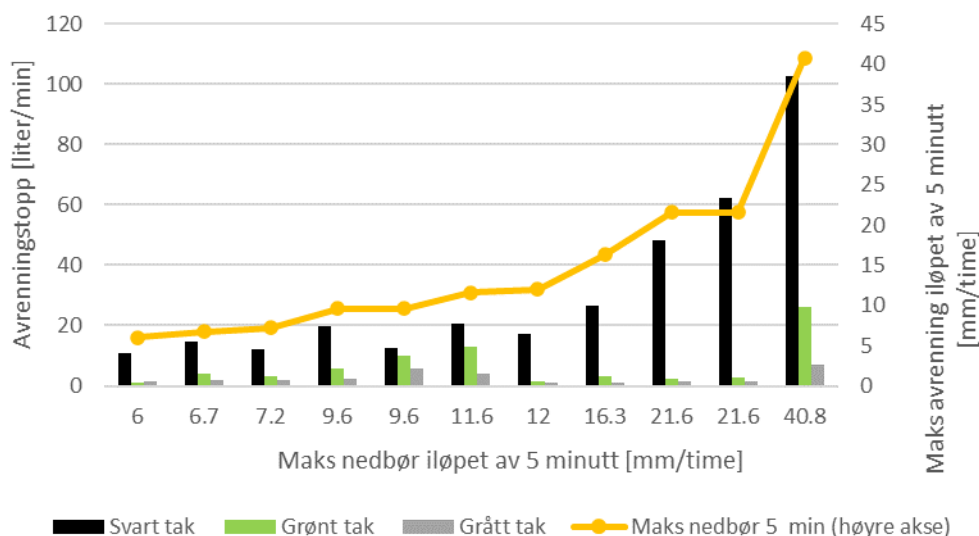
For å se om man kan få data ut av artikkelen som kan praktisk anvendes ble de hydrologiske data fra Tabell 8 plottet og analysert for sammenhenger som kan anvendes i planlegging og dimensjonering av grønne og grå fordøyende tak. Nyttige resultater fra disse analysene gjengis her.

Man vet fra før av at det er en nær korrelasjon mellom nedbør og avrenningstopper fra svarte tak. Avrenningen fra svarte tak følger stort sett intensiteten på nedbøren. Data for maksimum 5 minutter intensitet ble derfor plottet mot avrenningstopp for de ulike takene. Resultatene vises i Figur 9. Man kan se at avrenning fra det grønne og grå taket under verdiene 12, 16.3, og 21.6 avviker noe fra de andre verdiene. Vi så dermed nærmere på dette og fant ut at disse målingene var utført under regnhendelser som var kortere i varighet og mindre i mengde enn målingene utført under de andre hendelsene. Vi så også at man hadde mer intens nedbør i disse måleperiodene. Vi valgte derfor å dele opp data i følgende nedbørshendelser:

- a. Lengre nedbørshendelser med større mengder nedbør, og med lavere intensitet
- b. Kortere nedbørshendelser med mindre mengder nedbør, og med høyere intensitet

Disse ble så plottet i Figur 10 (regnhendelser type a) og Figur 11 (regnhendelser type b). Prosent reduksjon av avrenningstopp i forhold til svart tak ble beregnet for grønt og grått tak for begge typer regnhendelser, i henholdsvis Figur 12 (regnhendelse type a) Figur 13 (regnhendelse type b).

Overvannshåndtering med fordrøyende tak



Figur 9 Avrenningstopp versus maks nedbør i løpet av 5 minutt fra svart, grønt og grått tak.

Man kan se av Figur 10 at avrenningstoppene fra grønt og grått tak øker noenlunde lineært i takt med intensiteten på nedbøren. Basert på disse lineære korrelasjonene vil det være mulig, ved hjelp av Ligning 1 og Ligning 2, å beregne et anslag på liter vann man kan forvente at renner av fra et grønt eller grått tak per minutt under ulike nedbørintensiteter. Figur 11 viser tilsvarende verdier for regnhendelser type b, der de lineære korrelasjonene er gitt i Ligning 3 og Ligning 4. Det er verdt å merke seg at Ligning 3 har en dårlig korrelasjon, slik at man bør være forsiktig med å bruke denne.

$$y \text{ Grønt tak} = (3,5207x - 5,0086) / 88 = [l/min/m^2] \quad R^2 = 0,8023 \quad (1)$$

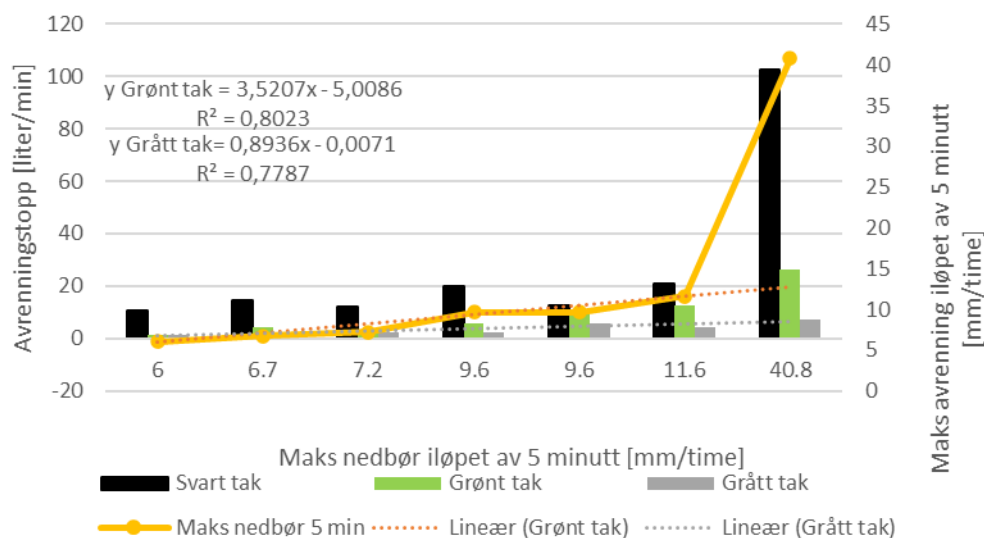
$$y \text{ Grått tak} = (0,8936x - 0,0071) / 88 = [l/min/m^2] \quad R^2 = 0,7787 \quad (2)$$

$$y \text{ Grønt tak} = (0,337x + 1,6) / 88 = [l/min/m^2] \quad R^2 = 0,2681 \quad (3)$$

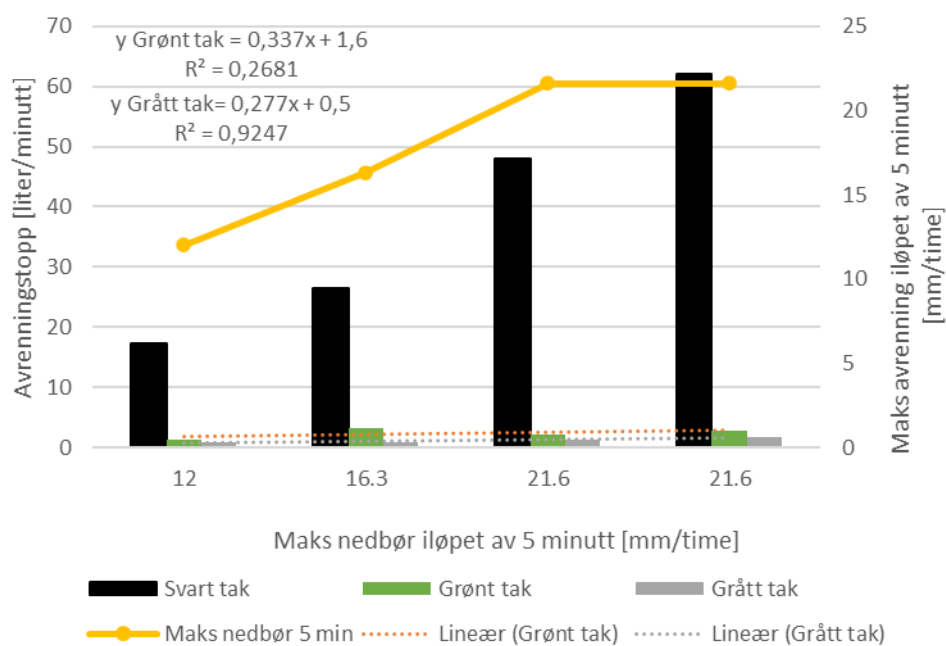
$$y \text{ Grått tak} = (0,277x + 0,5) / 88 = [l/min/m^2] \quad R^2 = 0,9247 \quad (4)$$

I praktisk bruk kan dimensjonerende nedbørintensiteter brukes til å anslå hvor mye avrenning man kan forvente fra et grønt eller grått tak ut fra Ligning 1 til 4. Svaret man får fra Ligningene 1 til 4 må så multipliseres med størrelsen på det taket som skal bygges (eller er bygget). Hvis man har et krav om maks påslipp fra kommunen kan man så vurdere om man klarer å opprettholde dette kravet, eller om det er behov for ytterligere tiltak (eks. regnbed, grønne grøfter etc.).

Overvannshåndtering med fordøyende tak



Figur 10 Avrenningstopp versus maks nedbør i løpet av 5 minutt fra svart, grønt og grått tak for regnhendelser av type a.



Figur 11 Avrenningstopp versus maks nedbør i løpet av 5 minutt fra svart, grønt og grått tak for regnhendelser av type b.

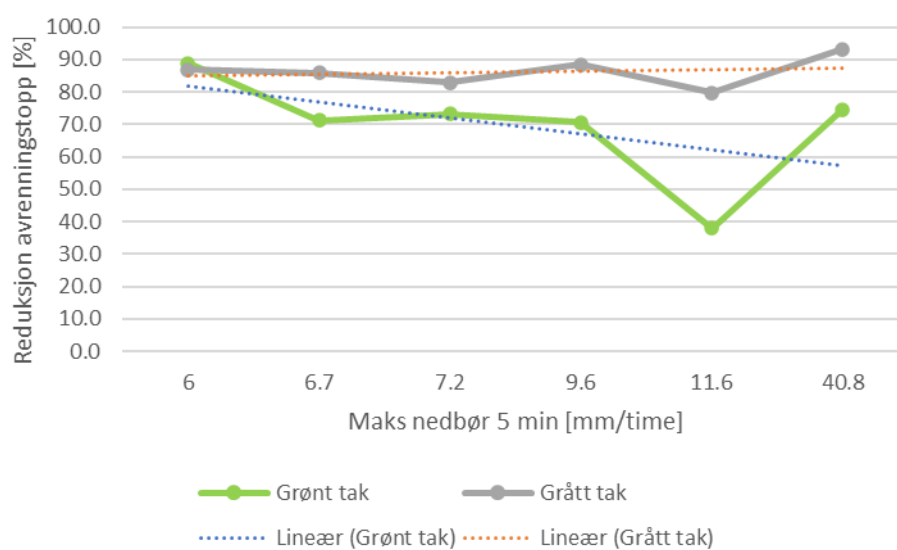
Figur 12 og Figur 13 angir forventet reduksjon av avrenningstopp for grønne og grå tak, for henholdsvis regnhendelser etter type a og b og som funksjon av 5 minuttets høy intensitets regn sammenlignet med det svarte taket. Figur 13 vil være representative for mer intense regnhendelser som opptrer i løpet av kortere nedbørsepisoder da dette er gitt av dataene (regnhendelse type b). Figur 12 er representativ for intense regnskyll som skjer i løpet av lengre regnhendelser, men intensiteten på disse regnene er som oftest noe mindre. Det finnes unntak, og dette kan man se av Figur 10, hvor det ble registrert en hendelse med 40,8 mm/time nedbør i løpet av 5 minutt. Dette er høyere enn noen hendelse registrert i Figur 11.

Figur 12 angir altså % reduksjon av avrenningstopp (sammenlignet med svart tak) for regnhendelser av type a. For regn av lavere intensitet, men lenger varighet og større vannmengder totalt kan man dermed konkludere med følgende:

- Grått tak: reduksjon av avrenning sammenlignet med svart tak er >80 %, uavhengig av intensitet på nedbør.
- Grønt tak: reduksjon av avrenning sammenlignet med svart tak er avtagende med økt nedbørintensitet, fra maks 90 % reduksjon til minimum 35 % reduksjon (medium intenst regn).

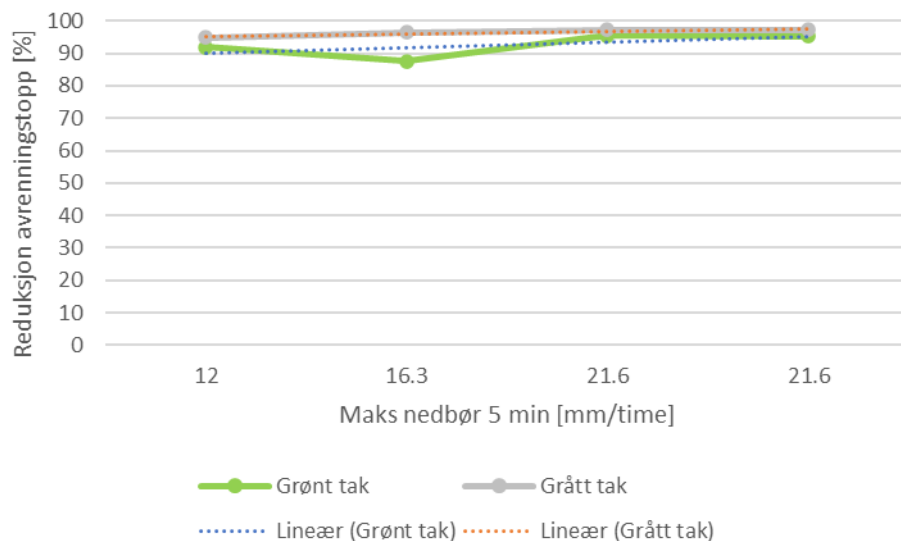
Figur 13 angir % reduksjon av avrenningstopp (sammenlignet med svart tak) for regnhendelser av type b. For regn av høyere intensitet, med kortere varighet og lavere vannmengder totalt kan man dermed konkludere med følgende:

- Grått tak: reduksjon av avrenning sammenlignet med svart tak >95 %, og øker noe med økning av intensitet på nedbør
- Grønt tak: reduksjon av avrenning sammenlignet med svart tak > 85 %, og øker noe med økning av intensitet på nedbør.



Figur 12 Reduksjon av avrenningstopp ved type a regnhendelser (sammenlignet med svart tak).

Overvannshåndtering med fordrøyende tak



Figur 13 Reduksjon av avrenningstopp ved type b regnhendelser (sammenlignet med svart tak).

6.3 Kort fortalt

Kort oppsummert:

- Grå tak bør benyttes hvis hovedhensikten er fordrøyning.
- Grønne tak bør benyttes hvis hovedhensikten er retensjon.

I områder med mye kaldt klima bør man vurdere grå tak fordi fordampning har en begrensende effekt fra grønne tak i kaldere områder.

For å få praktisk nytte ut av de hydrologiske data, ble disse plottet og analysert. Vi valgte å dele opp data i følgende nedbørshendelser:

- a. Lengre nedbørshendelser med større mengder nedbør, og av lavere intensitet.
- b. Kortere nedbørshendelser med mindre mengder nedbør, og av høyere intensitet

I praktisk bruk kan dimensjonerende nedbørintensiteter brukes til å anslå hvor mye avrenning man kan forvente fra et grønt eller grått tak ut fra Ligningene 1 til 4. Ligningene 1 og 2 må anvendes hvis man skal dimensjonere etter regnhendelser av type a. For dimensjonering av regnhendelser etter type b må Ligningene 3 og 4 benyttes.

6.4 Eksempel på bruk

I praktisk bruk kan dimensjonerende nedbørintensitet brukes til å anslå hvor mye avrenning man kan forvente fra et grønt eller grått fordrøyende tak ut fra Formlene 1 til 4. Svaret man får fra formlene må så multipliseres med størrelsen på det taket som skal bygges (eller er bygget). Er det et krav om maks påslipp fra kommunen kan man så vurdere om man klarer å opprettholde dette kravet, eller om det er behov for ytterligere tiltak (eks. regnbed, grønne grøfter etc.).

6.5 Aktuell referanse

Hamouz V & Muthanna T.M: Hydrological modelling of green and grey roofs in cold climate with the SWMM model. Journal of Environmental Management 2019, Vol 249 109350; doi:10.1016/j.jenvman.2019.109350

7 Overføring av SWMM-modeller mellom ulike geografiske områder

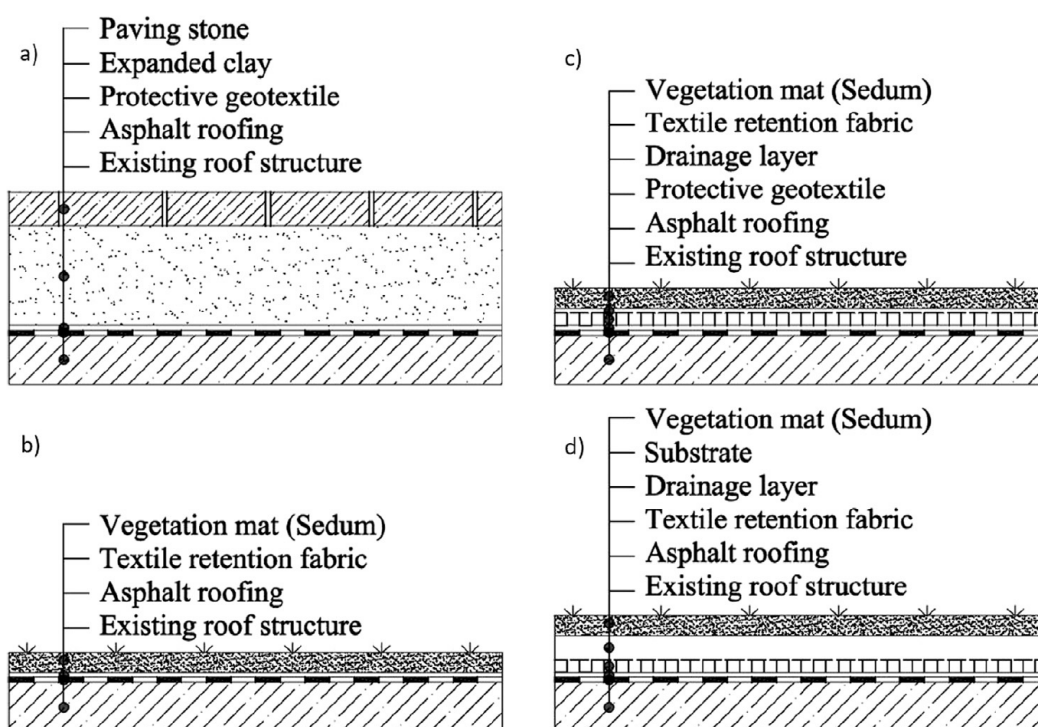
7.1 Sammendrag

Johannessen m.fl. (2019) har undersøkt hvordan verktøyet Storm Water Management Model (SWMM) og den innebygde LID-modulen kan brukes til å forutsi hydrauliske egenskaper til grønne tak basert på ulike variabler. Fokus har vært på variabler som beskriver egenskapene til de ulike lagene til det grønne taket, geometri og klimatiske forhold. Generelt er de individuelle modellene gode til å forutsi hendelsesbasert avrenning fra takene som funksjon av ulike geometriske og klimatiske variabler. Langtidsmodellering av de samme takene viste imidlertid store avvik i modellerte volumbalanser, noe som mest sannsynlig kan tilskrives utilstrekkelig modellering av evapotranspirasjonsprosessene i modellen. Når det gjelder overførbarhet er modellparametre beregnet på ett sted bare delvis overførbare til tilsvarende takoppbygging andre steder. Overførbarheten var bedre for modeller som ble kalibrert for steder med våtere klima og hendelser med høyere intensitet som ble benyttet på steder med tørrere klima enn motsatt. Modeller som ble kalibrert med data fra flere steder resulterte i modellparametre som gav brukbare resultater for de fleste lokasjonene, og kan være et utgangspunkt for dimensjonering av lignende tak i sammenlignbare klimaer. Men, stor volumfeil og det at de kalibrerte modellparameterne ikke direkte samsvarte med målte materialeegenskaper, gjør at det må tas visse forbehold når SWMM brukes som designverktøy uten å gjøre en lokal modellkalibrering først.

7.2 Hvordan bruke / tolke resultatene

Dette arbeidet har analysert en rekke hydrologiske data fra ulike grønne tak plassert ved ulike geografiske steder i Norge. Figur 14 viser en skjematisk oversikt over de ulike takoppbygningene benyttet i studiet, mens Tabell 9 gir detaljer om de geometriske variablene for hvert tak. Tabell 10 viser hvilke parametre som inngår i SWMM-LID modellen og hvilket område verdien til disse parameterne kan variere innenfor. Disse oversiktene kan benyttes som utgangspunkt for modellering av de ulike takoppbygningene, der en vil se på hendelsesbaserte avrenningsprofiler.

Tabell 11 viser en mer detaljert oversikt over alle kalibreringene som er utført ved å inkludere tak ved ulike geografiske steder. Basert på resultatene er det konkludert med at modellene har begrenset overføringsverdi mellom lokasjoner, men det kan uansett ha verdi å få sett i hvilket område verdien til hver enkelt parameter varierer innenfor.



Figur 14 Fire ulike takoppbygninger av grønne tak, a) ikke-vegeterte tak (HOV1, LAB6), b) Grønt tak type A og B med helning (RIS1, BER1, SAN1, BER4, SAN3), c) grønt tak type B flatt tak (HOV3), d) grønt tak type C med helning (RIS3, BER3, SAN2). Fra Johannessen m.fl. (2019).

Tabell 9 Beskrivelse av hvert teststed, oppbygning henviser til takoppbygning i Figur 14, fra Johannessen m.fl. (2019).

Id	Størrelse [m ²]	Helning [%]	Berm høyde [mm]	Substrat tykkelse [mm]	Dreneringsmatte tykkelse [mm]	Takoppbygning
RIS1	15	16	10	30	10	A
RIS3	15	16	10	80	25	C
BER1	8	16	10	30	10	A
BER3	8	16	10	80	75	C
BER4	8	16	10	30	3	B
SAN1	9	27	10	30	10	A
SAN2	9	27	10	80	75	C
SAN3	9	27	10	30	3	B
OSL1	8	5.5	–	–	–	Ref
HOV1	100	2	500	200	20	Gray
HOV2	100	2	–	–	–	Ref
HOV3	100	2	500	30	36	B
LAB1	4	2	–	–	–	Ref
LAB2	4	2	1	1	10	A + drain
LAB3	4	2	10	0	7	B + drain
LAB4	4	2	10	30	47	B
LAB6	4	2	10	100	10	Gray

Tabell 10 Parametere brukt til kalibrering i SWMM, fra Johannessen m.fl. (2019). (NG = nedre grense, ØG = øvre grense).

Parameter	Grønt tak			Grått tak			Svart tak (referanse)		
	Start verdi	NG	ØG	Start verdi	NG	ØG	Start verdi	NG	ØG
Nedbørsfelt									
Overflate ruhet (Manning's n)*							0.011	0.001	0.2
Lagringskapasitet (mm)*							1	0.1	2.5
Metning ved start*	50	10	95	50	10	95	–	–	–
Jordsmonn gjennvinningskoeffisient*	0.5	0.1	1.0	0.5	0.1	1.0	0.5		
LID Kontroll Overflate									
Berm høyde (mm)	Site spesifikk			Site spesifikk					
Vegetasjon volumfraksjon	0.15			0					
Overflate ruhet (Manning's n)	0.15			0.015					
Overflate helning (%)	Site spesifikk			Site spesifikk					
Subtrat									
Tykkelse (mm)	Site spesifikk			Site spesifikk					
Porøsitet (volum fraksjon)*	0.6	0.45	0.7	0.6	0.45	0.7			
Feltkapasitet (volum fraksjon)*	0.35	0.2	0.45	0.03	0.01	0.2			
Wilting punkt (volum fraksjon)*	0.05	0.01	0.1	0.05	0.01	0.1			
Konduktivitet (mm/h)*	100	10	1000	2500	100	5000			
Konduktivitet stigningstall*	30	5	60	30	5	60			
Undertrykk (mm)*	10	1	100	10	1	100			
Dreneringsmatte									
Tykkelse (mm)	Site spesifikk			Site spesifikk					
Hulromsfraksjon*	0.5	0.01	1	0.5	0.01	1			
Ruhet (Manning's n)*	0.1	0.01	0.4	0.1	0.01	0.4			

Tabell 11 Optimale kalibreringsparametere for hvert tak, manuelt valgt og felles, a) referanse tak, b) Type A grønt tak, c) type B grønt tak, d) type C grønt tak, e) grått tak og type B flatt tak.

a)	Individuell kalibrering			Manuell	Multi-site kalibrering	
	OSL1	HOV2	LAB1			
Overflate parameter						
Manning's n	0.03	0.01	0.02	0.02	0.01	
Lagringskapasitet (mm)	0.20	0.30	0.60	0.30	0.30	
Modell evaluering						
NSE			0.89		0.90	
NSE OSL1	0.80			0.79	0.81	
NSE HOV2		0.96		0.95	0.96	
b)						
	Individuell kalibrering				Manuell	Multi-site kalibrering
	RIS1	BER1	SAN1	LAB2		
Substrat parameter						
Feltkapasitet (%)	31	44	29		32	43
Wilting punkt (%)	2	1	9		5	2
Porøsitet (%)	70	70	70		70	61
Konduktivitet (mm/h)	65	43	63		60	42
Konduktivitet stigningstall	14	16	15		15	32
Undertrykk (mm)	77	13	6		40	28
Dreneringsmatte						
Hulromsfraksjon	0.01	0.03	0.03	0.10	0.03	0.56
Manning's n	0.18	0.22	0.21	0.10	0.21	0.32
Modell evaluering						
NSE				0.84		0.52
NSE RIS1	0.65				< 0.5	< 0.5
NSE BER1		0.77			< 0.5	0.77
NSE SAN1			0.66		< 0.5	0.59
c)						
	Individuell kalibrering			Manuell	Multi-site kalibrering	
	BER4	SAN3	LAB4			
Substrat parameter						
Feltkapasitet (%)	44	28	17		30	35
Wilting punkt (%)	4	10	7		7	10
Porøsitet (%)	70	69	47		70	67
Konduktivitet (mm/h)	183	108	982		180	292
Konduktivitet stigningstall	24	18	16		23	20
Undertrykk (mm)	39	51	71		45	18
Dreneringsmatte						
Hulromsfraksjon	0.13	0.11	0.02		0.13	0.16
Manning's n	0.09	0.1	0.23		0.10	0.09
Modell evaluering						
NSE			0.82			0.85
NSE BER4	0.77				< 0.5	0.82
NSE SAN3		0.92			< 0.5	0.89

d)	Individuell kalibrering				Manuell	Multi-site kalibrering
	RIS3	BER3	SAN2	LAB3		
Substrat parameter						
Feltkapasitet (%)	24	44	32		30	23
Wilting punkt (%)	15	7	15		2	14
Porøsitet (%)	43	59	50		60	40
Konduktivitet (mm/h)	782	549	1183		800	596
Konduktivitet stigningstall	43	46	47		45	53
Undertrykk (mm)	55	64	45		50	90
Dreneringsmatte						
Hulromsfraksjon	0.01	0.47	0.06	0.21	0.2	0.89
Manning's n	0.13	0.07	0.24	0.11	0.15	0.01
Modell evaluering						
NSE				0.82		0.83
NSE RIS3	0.60				< 0.5	0.81
NSE BER3		0.85			0.86	0.82
NSE SAN2			0.87		0.71	0.89

e)	Individuell kalibrering			Manuell	Multi-site kalibrering
	HOV1	HOV3	LAB6		
Substrat parameter					
Feltkapasitet (%)	15	18	27		
Wilting punkt (%)	15	15	10		
Porøsitet (%)	35	49	57		
Konduktivitet (mm/h)	3 366	645	80		
Konduktivitet stigningstall	48	60	19		
Undertrykk (mm)	79	41	49		
Dreneringsmatte					
Hulromsfraksjon	0.72	0.64	0.40		
Manning's n	0.48	0.07	0.35		
Modell evaluering					
NSE HOV1	0.90				
NSE HOV3		0.90			
NSE LAB6			0.60		

7.3 Kort fortalt

Artikkelen handler om å kalibrere SWMM LID-modellen til virkelig avrenningsdata, slik at modellen skal kunne brukes til å designe og estimere hvordan grønne tak oppfører seg. Basert på resultatene er det imidlertid vanskelig å overføre modeller mellom ulike geografiske steder.

7.4 Aktuell referanse

Johannessen, B.G, Hamouz, V, Gragne, A.S & Muthanna, T.M: The transferability of SWMM model parameters between green roofs with similar build-up. Journal of Hydrology 2019, Vol 569 p. 816-828; doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.004, ISSN 0022-1694

8 Hydrologisk ytelse av fordrøyende tak med lettklinker

8.1 Sammendrag

Grønne tak kan redusere mengden og fordrøye avrenningstoppen av overvann fra hustak, noe som kan ha stor betydning på den totale overvannshåndteringen i urbane områder. I områder med et klima som gir begrenset evapotranspirasjon kan et fordrøyende tak med et ikke-vegetert toppdekke være et praktisk alternativ for overvannshåndtering. Hamouz m.fl. (2018) har studert effekten til et fordrøyende tak som har lettklinker som fordrøyende lag. Testtaket er lokalisert på Høvringen utenfor Trondheim og ble etablert i 2016. Takkonstruksjonen består av et 200 mm tykt lag av lettklinker som er dekket av et lag med permeabel belegningsstein i betong. Retensjonen i taket ble estimert til 9 %, noe som tilsvarer 0.27 mm/døgn for hele perioden. Konfigurasjonen (til taket) ga en reduksjon i toppavrenningen på 95 % (median) og en forsinkelse av toppavrenningen på 1 time og 15 minutter (median). De relativt høye fuktighetsnivåene i lettklinkeren på taket påvirket ikke retensjonskapasiteten. Ettermontering av fordrøyende tak kan bidra til endring i avrenningsegenskapene fra et område i forhold til om kun svarte tak er brukt.

8.2 Hvordan bruke / tolke resultatene

Det er utført ulike statistiske analyser av dataene som er presentert i artikkelen. Data som er benyttet er gjengitt i Tabell 12. Følgende parameterer er vurdert som uavhengige parametere:

- Nedbørens varighet
- Nedbør
- Gjennomsnittlig nedbørintensitet
- Topp 5-minutters nedbørintensitet
- ADWP (antecedent dry weather period = tørrværsperiode før hendelse)
- Initiell metningsgrad

Følgende parametere er vurdert som avhengige parametere:

- Forsinkelse i avrenningstopp
- Reduksjon i avrenningstopp
- Initiell avrenning
- Varighet avrenning

Tabell 12 Resultater fra de ulike hendelsene, fra Hamouz m.fl. (2018).

Varighet [min]	Nedbør [mm]	Gjennomsnittlig intensitet [mm/h]	Topp 5-min intensitet [mm/h]	ADWP [min]	Initiell metning [%]	Initiell avrenning [l/min]	Varighet avrenning [min]	Forsinkelse avrennings-topp [min]	Reduksjon avrennings-topp [%]
8	3.2	25.58	21.6	1436	32.1	0	82	0	97
98	3.3	2.13	14.4	1421	0	0.27	866	0	95
325	7.9	1.51	12	9912	32.1	0.01	1791	0	95
435	11.2	1.57	21.6	3996	32.2	0.01	2008	455	97
1175	8.8	0.46	16.32	524	35.7	0.42	1622	1	97
1727	57.7	2.02	40.8	44	32.5	0.02	3484	737	93
4174	35.6	0.57	17.64	457	0	0.7	5620	150	85
4478	59.6	0.81	11.64	1034	0	0.08	4901	2202	80

Tabell 13 viser resultatene av Pearson korrelasjonsanalyse av de uavhengige versus de avhengige parameterne. De 'sterke' korrelasjonene (dvs. verdi $> \pm 0,6$) er markert med fet skrift. Som det fremgår av tabellen, påvirker nedbørens varighet og nedbøren de avhengige parameterne. I tillegg påvirker initiell metningsgrad reduksjonen i avrenningstoppen. De negative/positive verdiene reflekterer den tilsvarende positive/negative innvirkningen av de uavhengige parameterne på de avhengige parameterne. For eksempel resulterer en lengre nedbørsvarighet i en lengre avrenning og lengre forsinkelse av avrenningstoppen, mens den gir en mindre reduksjon i avrenningstoppen.

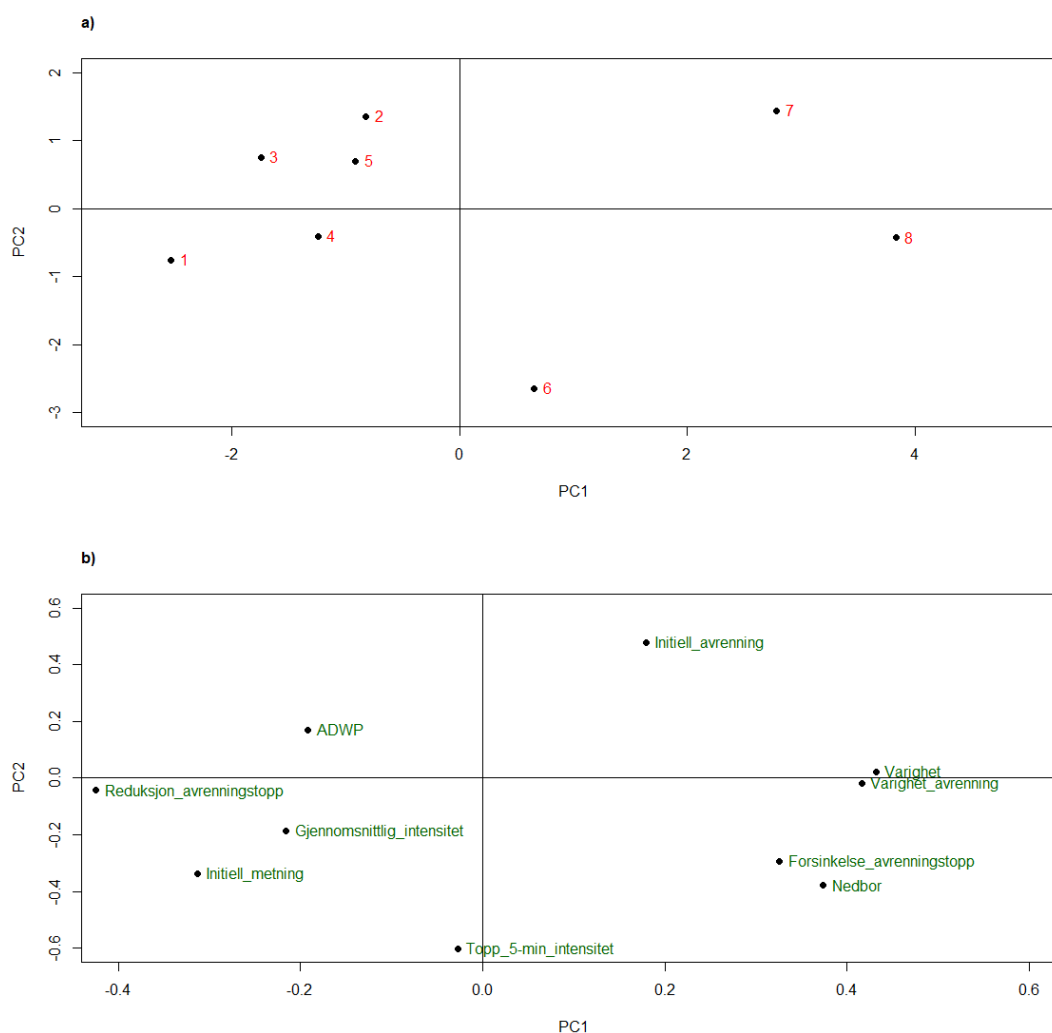
Tabell 13 Pearson korrelasjonskoeffisient mellom uavhengige versus de avhengige parameterne.

	Varighet avrenning	Forsinkelse avrenningstopp	Reduksjon avrenningstopp	Initiell avrenning
Varighet	0.94	0.67	-0.95	0.46
Nedbør	0.83	0.79	-0.77	0.01
Gjennomsnittlig intensitet	-0.54	-0.25	0.32	-0.34
Topp 5-min intensitet	0.05	-0.02	0.23	-0.25
ADWP	-0.27	-0.24	0.28	-0.41
Initiell metning	-0.53	-0.38	0.74	-0.48

Figur 15 viser skårplott og tilhørende ladningsplott for prinsipalkomponentene 1 og 2 (a og b) basert på en prinsipalkomponentanalyse av dataene i Tabell 12. Prinsipalkomponentene 1 og 2 forklarer 69 % av variasjonen i dataene og viser klare korrelasjoner. Vi kan bl.a. observere:

- Langs prinsipalkomponent 1 ser vi en korrelasjon mellom redusert avrenningstopp, gjennomsnittlig intensitet, initiell metningsgrad og ADWP, som igjen er motsatt korrelert til varighet, initiell avrenning. Forsinket avrenningstopp og nedbørintensitet er også svakt korrelert til varighet og initiell avrenning.
 - Initiell metningsgrad varierer lite og har noen manglende data, så vi ser bort fra denne.
 - Forsinket avrenningstopp avhenger av ADWP, noe som virker intuitivt riktig. Er det lenge siden forrige regn vil taket ha rukket å gjenvinne en stor del av lagringskapasiteten og vil kunne lagre mye vann ved starten av nedbørhendelsen.
 - Forsinkelsen av avrenningstoppen samvarierer med nedbørsintensiteten.
 - Varigheten på avrenningen samvarierer med varigheten av nedbøren.

- Langs prinsipalkomponent 2 er det i hovedsak den initielle avrenningen som er motsatt korrelert til topp-5min intensitet. I tillegg er initiell metningsgrad, nedbørintensitet og forsinket avrenningstopp korrelert til topp-5min intensitet.
 - Det er uklart hvorfor disse to er motsatt korrelert, men skyldes antagelig begrenset antall hendelser (kun 8).
 - Intuitivt riktig at topp-5min intensitet og nedbørintensitet er korrelert
- I skårplottet ligger hendelsene 1-5 relativt godt samlet til venstre i plottet, mens hendelsene 6-8 ligger spredt til høyre.
 - Hendelse 6 korrelerer med høy topp-5min intensitet og fra Tabell 12 ser man at denne hendelsen har den største verdien av denne variabelen.
 - Hendelse 7 korrelerer med høy initiell avrenning og fra Tabell 12 ser man at denne hendelsen har den største verdien av denne variabelen.
 - Hendelse 8 korrelerer med høy varighet og varighet avrenning og fra Tabell 12 ser man at denne hendelsen har den største verdien av varighet og nest størst av varighet avrenning.



Figur 15 Skår og ladningsplott for et utvalg av data, PC1-PC4 forklarer hhv. 51% og 18% av variasjonen i dataene.

For dataene i Tabell 12 er det utført en variansanalyse av alle de uavhengige variablene mot de avhengige variablene. Det er kun varighet som er funnet signifikant i forhold til varighet avrenning og reduksjon avrenningstopp. Videre er Topp 5-min intensitet og initiell metningsgrad funnet signifikant i forhold til reduksjon avrenningstopp. Initiell metningsgrad

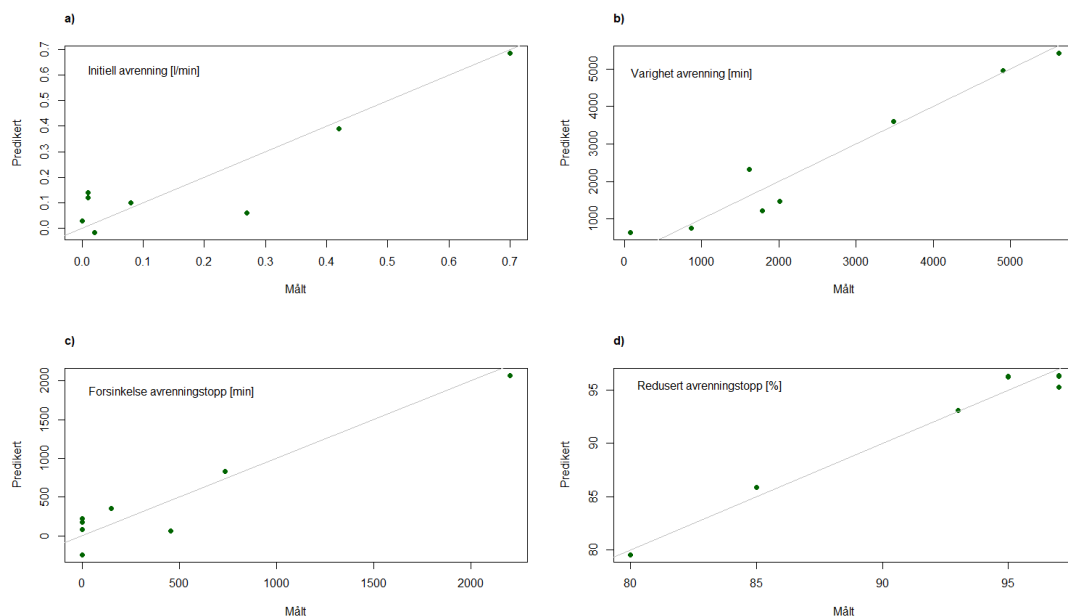
mangler data og topp_5min intensitet korrelere til nedbørintensitet, så det er valgt å gå videre med varighet og nedbørintensitet for å se om det kan oppnås forenklete regresjonsligninger for de avhengige parameterne. Tabell 14 viser regresjonskoeffisientene for henholdsvis konstantleddet og variablene varighet, nedbørintensitet og samspillseffekten mellom varighet og nedbørintensitet. De fire responsene (y) kan da estimeres ved følgende ligning:

$$y = b_{\text{konstant}} + b_{\text{Varighet}} * \text{Varighet} + b_{\text{Nedbør}} * \text{Nedbør} + b_{\text{Varighet} \times \text{Nedbør}} * \text{Varighet} * \text{Nedbør} \quad (6)$$

Figur 16 viser målte verdier plottet mot predikerte verdier for de fire parameterne og viser relativt god sammenheng. Forklaringsgraden uttrykt med R^2 er også relativt høy, slik at ytelsen til det grå lettlinkertaket kan da (rimelig godt) forutsies ved å bruke regnvarighet og nedbørintensitet som designparametere.

Tabell 14 Regresjonskoeffisienter og forklart varians for enkle lineære regresjonsligninger for de fire avhengige parameterne.

	Initiell avrenning [l/min]	Varighet avrenning [min]	Forsinkelse avrenningstopp [min]	Reduksjon avrenningstopp [%]
Konstant	3.62E-02	502.17	229.38	9.60E+01
Varighet [min]	3.69E-04	1.39	-0.53	-7.03E-04
Nedbør [mm]	-2.75E-03	38.40	-1.67	9.31E-02
Varighet x Nedbør [min x mm]	-5.33E-06	-0.015	0.016	-7.07E-05
R^2	0.83	0.94	0.91	0.97



Figur 16 Målt mot predikert for initiell avrenning (a), varighet avrenning (b), forsinkelse avrenningstopp (c) og redusert avrenningstopp (d).

8.3 Kort fortalt

Resultatene fra denne artikkelen viser ulike mål på lettlinkertakets evne til å håndtere overvann. Dataene fra artikkelen ble omorganisert og regresjonsanalyse ble utført for å se etter korrelasjoner mellom de uavhengige variablene (varighet, nedbørintensitet, gjennomsnittlig

og toppintensitet, forutgående tørr våt periode og initiell metning) og responsparameterne (varighet avrenning, forsinkelse avrenningstopp, reduksjon avrenningstopp og innledende avrenning).

De statistiske analysene ble utført i to trinn: undersøkelse av korrelasjon ved Pearson-analyse og prinsipalkomponentanalyse og deretter en enkel linear regresjonsanalyse. Varighet nedbør og nedbørintensitet ser ut til å korrelere med varighet avrenning, forsinkelse avrenningstopp og reduksjon avrenningstopp.

8.4 Eksempel på bruk

Resultatene kan brukes som enkle designligninger for lettklinker baserte tak, dvs. vurdere den 'forventede' ytelsen til denne type tak under gitte meteorologiske forhold (regnvarighet og nedbørintensitet). Resultatene som presenteres her er basert på begrensede data, men tilnærmingen er generisk og kan oppdateres og forbedres når nye data foreligger.

8.5 Aktuell referanse

Hamouz, V, Lohne, J, Wood, J.R & Muthanna, T.M: Hydrological Performance of LECA-Based Roofs in Cold Climates. *Water* 2018, Vol. 10(3), p. 263; doi:10.3390/w10030263, ISSN 2073-4441

9 Fordrøyende tak under ekstreme forhold

9.1 Sammendrag

Taket dekker en stor prosentandel av landarealet i urbane områder, et areal som potensielt kan brukes til å håndtere overvann, for eksempel ved å bruke grønne og/eller fordrøyende tak. Det finnes en del data for hvordan disse takene håndtere overvannet ved små og mellomstore nedbørshendelser, men det mangler data om den hydrologiske ytelsen ved ekstreme nedbørshendelser. Hamouz m.fl. (2020) har studert ytelsen til et fordrøyende tak med sedum under ekstreme hendelser ved å utvikle en metode basert på en kunstig regnsimulator. Ved å benytte en kunstig regnsimulator kunne man studere både nåværende og fremtidige klimaforhold. Avrenningen fra det grønne fordrøyende taket ble funnet å være mer følsom for det opprinnelige vanninnholdet enn formen på hyetografen til nedbørshendelsen. Det grønne fordrøyende taket hadde klart bedre overvannshåndteringsegenskaper enn det svarte taket som ble brukt som referanse (målt med indikatorene konsentrasjonstid, tyngdepunktforsinkelse¹, T50² og reduksjon avrenningstopp). Mens konsentrasjonstiden for referansetaket var rundt 5 minutter uavhengig av nedbørintensiteten, ble for det grønne fordrøyende taket funnet å være mellom 30 og 90 minutter med nedbørintensitet fra 0.8 til 2.5 mm/min. Å legge til et lag fordrøyende masse (i dette tilfelle lettklinker) ga en betydelig forbedring av fordrøyningsegenskapene under ekstrem nedbør, noe som vil kunne være et viktig tiltak for å ta høyde for fremtidig våtere klima.

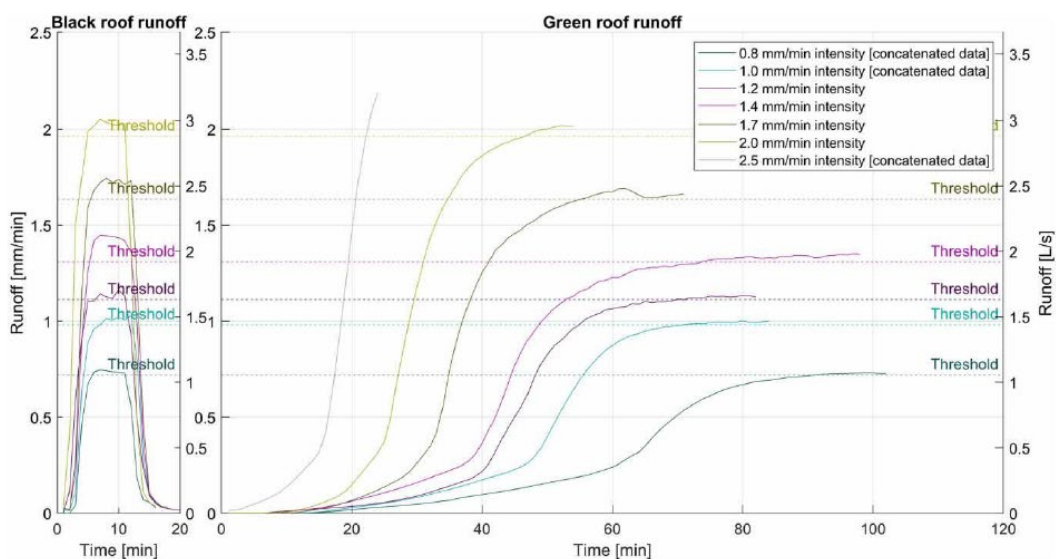
9.2 Hvordan bruke / tolke resultatene

Konsentrasjonstid er den tiden det tar fra en hendelse starter til hele taket bidrar til avrenningen. Dette kan måles ved å ta tiden fra man starter en nedbørshendelse med konstant intensitet til det blir konstant avrenning ved utløpet. Ulike tak vil ha forskjellige konsentrasjonstid avhengig av flere faktorer som oppbygning av de ulike lagene, egenskaper til den fordrøyende massen, størrelse på taket og helning på taket. Konsentrasjonstiden vil også være avhengig av hvor mye vanninnhold det er i taket (de fordrøyende massene) ved start og nedbørsintensiteten. Artikkelen har målt konsentrasjonstiden for både et svart referansetak og et fordrøyende tak med sedum for ulike nedbørintensiteter (tilsvarende generasjon 2 og løsningene på felt 2 og 3, jmf. Tabell 1). Resultatene er illustrert i Figur 17 som viser to viktige poeng:

- Konsentrasjonstiden til det svarte referansetaket er rundt 5 minutter og uavhengig av nedbørintensitet.
- Konsentrasjonstiden til det fordrøyende taket med sedum er omvendt proporsjonal med nedbørsintensiteten og varierer mellom 90 minutter og 30 minutter for intensiteter mellom 0.8 og 2.5 mm/min.

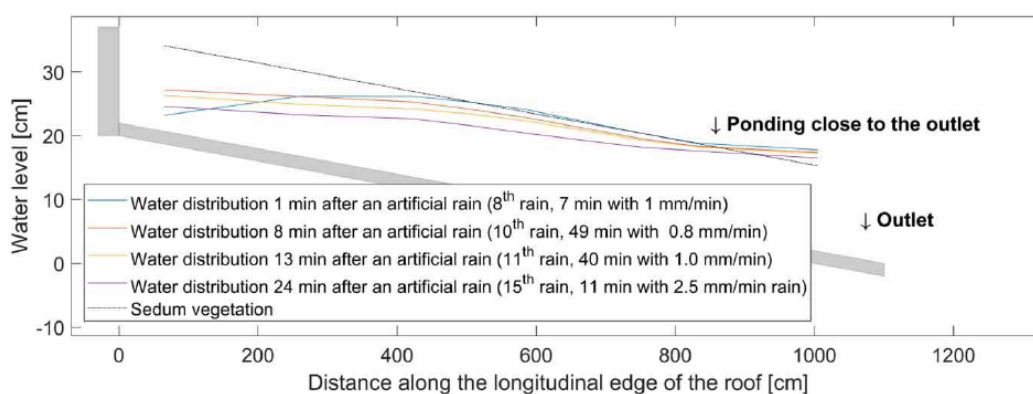
¹ Tyngdepunktforsinkelse er tidsforsinkelsen mellom tidspunktene for når man når tyngdepunktet til nedbørsprofilen og tyngdepunktet til avrenningsprofilen.

² T50 er tidsforsinkelsen målt mellom tidspunktene for når man når 50% akkumulert nedbørsvolum og 50% akkumulert avrenningsvolum.



Figur 17 Målt konsentrasjonstid for referansetaket og det grønne fordrøyende taket som funksjon av nedbørintensitet. For intensitetene 0.8, 1.0 og 2.5 mm/min var takene delvis mettet ved start. Hentet fra Hamouz m.fl. (2020).

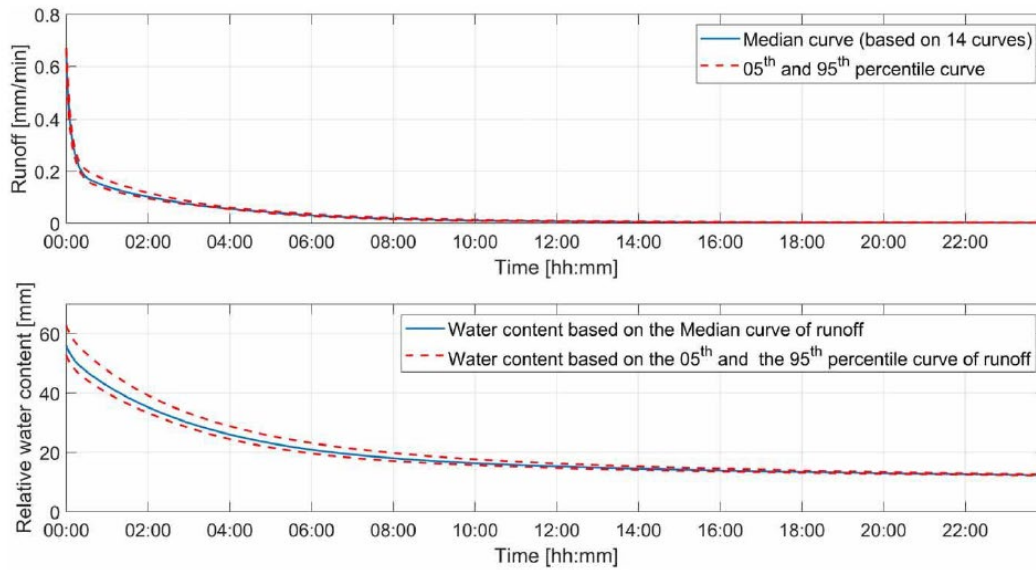
For alle testene ble vanninnholdet i det fordrøyende laget på taket målt manuelt. Målingene ble utført på åtte punkter langs den ene langsiden av taket. Figur 18 viser noen profiler av vanninnholdet ved slutten av ulike hendelser. Nært utløpet var det for flere av hendelsene observert damdannelse på toppen av det sedumdekket, mens det ved toppen av taket (til venstre i figuren) sjelden ble observert høyt vanninnhold. For hver hendelse ble det beregnet et gjennomsnittlig vanninnhold for hele taket.



Figur 18 Tverrsnitt av det grønne fordrøyende taket som viser vannivå som funksjon av nedbørshendelse og plassering langsmed taket. Hentet fra Hamouz m.fl. (2020).

En interessant observasjon er at avrenningskurven etter en hendelse fra et tak nær metningspunktet var omtrent lik for alle hendelsene. Figur 19 viser median-kurven for 14 hendelser sammen med 5% og 95% persentilene. Som vi ser, varierer avrenningskurven lite. Vanninnholdet er også vist i figuren og vi ser en større variasjon mellom hendelsene i starten av avrenningen. Avrenningskurven viser tydelig to mekanismer i det fordrøyende laget:

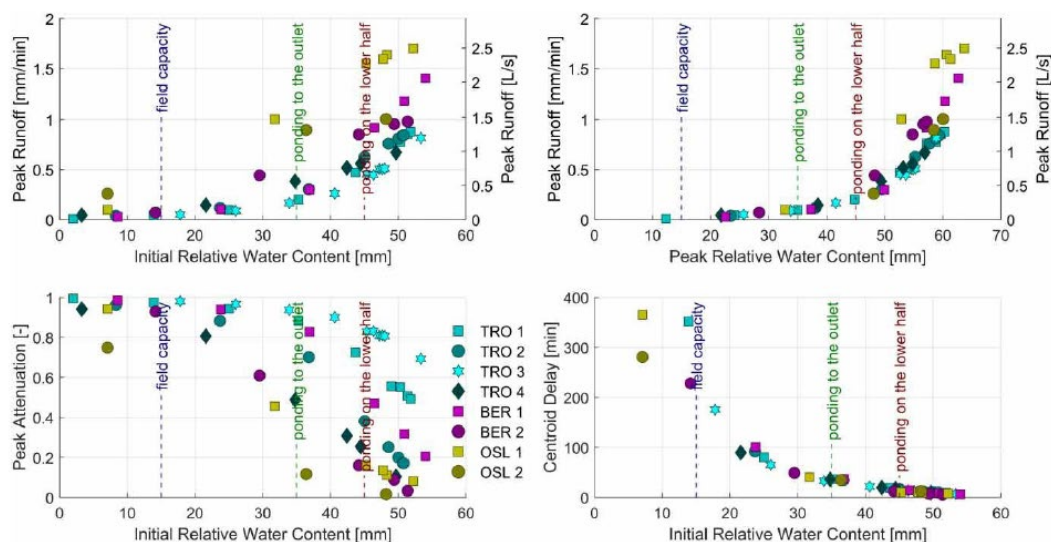
- En rask avrenning av vannet som det stående vannet i laget, starter med vanninnhold rundt 60 mm og drenerer til 50% i løpet av 3 timer og 66% i løpet 6 timer.
- En langsom avrenning av vannet som er tatt opp i LECA-massen i det fordrøyende laget.



Figur 19 Median avrenningskurve og relative vannivå i det grønne taket etter en hendelse. Hentet fra Hamouz m.fl. (2020).

Figur 20 viser avrenningstoppen, redusert avrenningstopp og forsinkelse i massetyngdepunktet til en rekke hendelser fra studien. Merk at det er snakk om "ekstreme" hendelser med returperiode mellom 20 og 200 år. Det er også ulike initielle betingelser innbakt i dataene. Følgende punkter er verdt å merke seg:

- Initiell vanninnhold har større påvirkning enn formen på kort-tids nedbørhendelsen.
- Avrenningstoppen øker betraktelig ved høyt vanninnhold ved starten av hendelsen.
- Reduksjonen i avrenningstopp avtar med høyt vanninnhold ved starten av hendelsen.
- Forsinkelsen i massetyngdepunktet avtar eksponentielt med vanninnhold ved starten av hendelsen.
- Men, nedbørsprofil, intensitet og varighet har liten effekt på massetyngdepunkt-forsinkelsen (og T50).



Figur 20 Observert avrenningstopp, massetyngdepunktforsinkelse og T50 versus initiell vanninnhold og observert avrenningstopp versus vanninnhold ved avrenningstopp. Hentet fra Hamouz m.fl. (2020).

9.3 Kort fortalt

Fordrøyende tak har betydelig konsentrasjonstid selv under ekstreme forhold.

Vanninnhold i det fordrøyende taket ved starten av hendelsen har større påvirkning enn nedbørsprofilen, intensitet og varighet på kort-tids nedbørhendelsen.

Nedbørsprofil, intensitet og varighet har liten effekt på forsinkelsen av massetyngdepunkt og T50.

9.4 Aktuell referanse

Hamouz, V, Pons, V, Sivertsen, E, Raspati, G.S, Bertrand-Krajewski, J.L & Muthanna, T.M: Detention-based green roofs for stormwater management under extreme precipitation due to climate change. Blue-Green Systems 2020, Vol 2(1), p. 250-266; doi.org/10.2166/bgs.2020.101

10 Bedre kalibreringsrutiner for modellering av avrenning fra fordrøyende tak

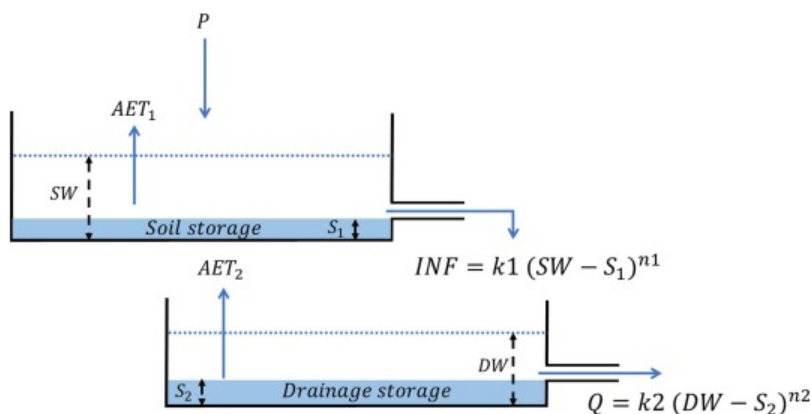
10.1 Sammendrag

Abdalla m.fl. (2022) har undersøkt hvordan konseptuelle nedbør-avrenningsmodeller kan brukes som designverktøy for grønne tak. Studien viste hvordan usikkerheten til parameterne som inngår i konseptuelle nedbør-avrenningsmodeller kan reduseres med å endre kalibreringspraksis, noe som igjen forbedrer tolkningen av parameterne. En konseptuell nedbør-avrenningsmodell ble utviklet og testet på et datasett med 14 grønne tak lokalisert i fire norske byer med ulike klimatiske forhold. To kalibreringsprosedyrer ble sammenlignet: en vanlig prosedyre som bruker avrenningsdata som et grunnlag for kalibrering og en prosedyre som kombinerer data for avrenning og jordfuktighet som grunnlag for kalibreringen. Resultatene bekreftet at den konseptuelle nedbør-avrenningsmodellen klarte å simulere avrenning fra fordrøyende tak over flere klimasoner og forskjellige takkonfigurasjoner (Kling Gupta-effektivitet $> 0,75$). Ved å benytte både avrenning- og jordfuktighetsdata i kalibreringen ble usikkerheten til modellparameterne redusert. Studien presenterte retningslinjer for å estimere parametere til konseptuelle nedbør-avrenningsmodeller som kan brukes av andre når nye takkonfigurasjoner under forskjellige klimatiske forhold skal undersøkes.

10.2 Hvordan bruke / tolke resultatene

Hydrologiske modeller av grønne tak er et verdifullt verktøy for beslutningstakere og overvannsingeniører for planlegging og designformål. Ofte er de fysisk-baserte modellene kompliserte og krever mange parametere. Konseptuelle nedbør-avrenningsmodeller er ofte enklere og i) krever mindre innsats å sette opp, ii) kjører med lavere beregningskostnader, og iii) gir tilstrekkelig pålitelige resultater.

Flere har benyttet konseptuelle nedbør-avrenningsmodeller for grønne tak, der den vanligste konseptualiseringen er å representere taket med en kaskade av lineære eller ikke-lineære tanker som representerer de forskjellige taklagene (dvs. vegetasjon, substrat og dreneringslag), se Figur 21. Lagringen av vann i tankene og strømmen av vann mellom tankene kontrolleres via ulike parametere. På grunn av forenklingen av disse konseptuelle modellene, er de fleste av parameterne deres ikke fysisk målbare, og derfor er kalibrering nødvendig for å finne brukbare verdier.



Figur 21 Konseptuell nedbør-avrenningsmodell utviklet for grønne tak, inklusive modellparametere, fra Abdalla m.fl. (2022).

Den konseptuelle nedbør-avrenningsmodellen som er benyttet for grønne tak er vist i Figur 21, der den hydrologiske ytelsen til taket er beskrevet med en enkel tottrinns reservoarmodell. Modellen representerer taklagene ved to tanker: en øvre tank for substratlaget og en nedre tank

for dreneringslaget. Nedbøren (P) kommer inn i substratet og fyller det tilgjengelige vannlageret til substratlaget (S_1). Vann trenger inn i den nedre tanken når lagringen av substratlaget overskrides. Evapotranspirasjon er tillatt fra begge lagertankene. Infiltrasjonsprosessen bestemmes av ligning (7). Dreneringslaget lagrer vannet (S_2), og vannet begynner å strømme fra S_2 (Q) etter at lageret av dreneringslaget er fylt (ligning (8)).

Modellen kan representeres ved følgende ligninger:

$$INF_t = k_1(\max(SW_t - S_1, 0))^{n1} \quad (7)$$

$$Q_t = k_2(\max(DW_t - S_2, 0))^{n2} \quad (8)$$

$$SW_t = \max(SW_{t-1} + P_t - AET1_t - S_1, 0) \quad (9)$$

$$DW_t = \max(DW_{t-1} + INF_t - AET2_t - S_2, 0) \quad (10)$$

$$AET1_t = PET_t \times \frac{S_{t-1}}{S_{max}} \quad (11)$$

der:

- k_1 = vertikal bevegelse av vann
- k_2 = horisontal bevegelse av vann
- S_1 = tilgjengelig permanent lagring i alle substrat/jordlag
- S_2 = tilgjengelig permanent lagring i alle vegetasjons- og dreneringslag
- P = nedbør
- SW = benyttet lagringskapasitet i substrat/jordlag
- DW = benyttet lagringskapasitet i vegetasjons- og dreneringslag
- AET = Faktisk evapotranspirasjon
- PET = Potensiell evapotranspirasjon

Videre er Oudin-modellen anbefalt å bruke for å bestemme evapotranspirasjonen (anbefalt av studien presentert i Kapittel 5). Oudin-modellen er gitt ved:

$$PET \left[\frac{mm}{dag} \right] = \begin{cases} 0 & \text{hvis } T_{Gjsnitt} \leq 5C \\ \frac{Ra}{\lambda\rho} \times 0.01 \times (T_{Gjsnitt} + 5) & \text{hvis } T_{Gjsnitt} > 5C \end{cases} \quad (12)$$

der:

- $T_{Gjsnitt}$ = daglig gjennomsnittlig temperatur
- Ra = netto innstråling i forhold til geografisk lokasjon og dag i den Julianske kalender
- λ = fordampningsentalpi
- ρ = vanntetthet

I tillegg er det benyttet en korreksjonsfaktor for tap av vannlagringskapasitet i substrat/jordlaget:

$$f_t = \min\left(1, \frac{SW_{t-1}}{S_{11}}\right) \quad (13)$$

der S_{11} er en kalibreringsfaktor som representerer en grenseverdi for vannmetning etter at AET er blitt lik PET .

Studien ser nærmere på de ulike parameterne, usikkerheten og følsomheten ved å benytte data fra en rekke grønne tak i Norge. Følgende verdier og betraktninger er gitt:

- $k_1 = 0.75$: Passer til ulike takegenskaper og klimatiske forhold.

- k_2 varierer mellom 0.01 og 0.15: Det forventes lav k_2 -verdi på tørre steder, og høy k_2 -verdi på våte steder og mildt hellende tak.
- S_I :
 - For vegetasjonsmatter varierer S_I mellom 23 og 36 % av total dybde.
 - For teglbaserte underlag er S_I rundt 40 % av total dybde.
- S_2 varierer mellom 1 og 2 mm for de fleste takene.
- S_{II} : ytterligere studier er nødvendig for å gi anbefalinger.

10.3 Kort fortalt

Det er utviklet en konseptuell nedbør-avrenningsmodell som kan brukes til å estimere den hydrologiske ytelsen til grønne tak. Modellen er kalibrert med data fra grønne tak lokalisert i fire norske byer og resultatene har vist at modellen kan simulere avrenning fra grønne tak på tvers av flere klimatiske soner og forskjellige takkonfigurasjoner. Oppgitte verdier for parameterne kan benyttes for å estimere den hydrologiske ytelsen til tak med lignende takkonstruksjoner i andre byer.

Videre er det vist at å benytte såkalt multi-objektive kalibreringer, der både avrenningsdata og data for jordfuktighetsmålinger brukes til kalibrering av modellen, gir mer nøyaktige og robuste modeller.

10.4 Aktuell referanse

Abdalla E.M.H, Alfredsen K & Muthanna T.M: Towards improving the calibration practice of conceptual hydrological models of extensive green roofs. Journal of Hydrology 2022, Vol 607, 127548; doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127548

11 Bruk av maskinlæring for å simulere avrenning fra fordrøyende tak

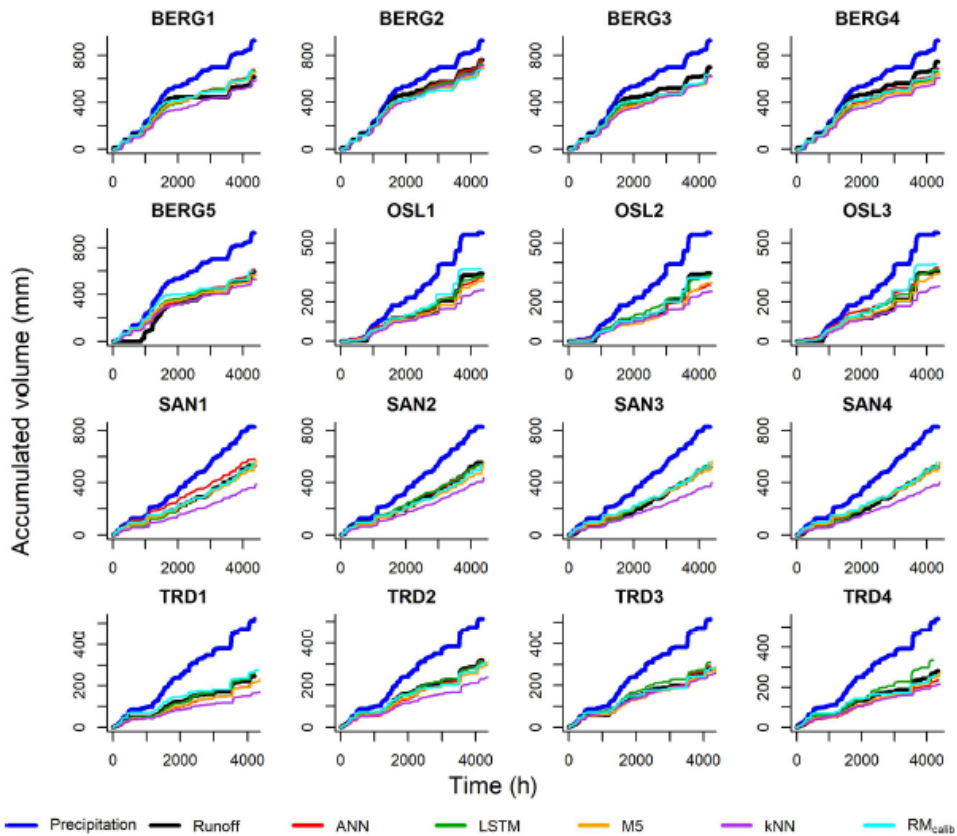
11.1 Sammendrag

Grønne tak er stadig mer populære tiltak for å redusere eller forsinke avrenning av overvann. Abdulla m.fl. (2021) har undersøkt potensialet ved bruk av maskinlæring (ML) for å simulere avrenning fra grønne tak og for å estimere takenes hydrologiske ytelse. Fire maskinlæringsmetoder, kunstig nevralt nettverk (ANN), M5 modelltre, lang-korttidsminne (LSTM) og k nærmeste nabo (kNN), ble brukt for å simulere overvannsavrenning fra 16 grønne tak plassert i fire norske byer på tvers av ulike klimasoner. Potensialet til disse ML-metodene for å estimere retensjonen til grønne tak ble vurdert ved å sammenligne simuleringene med en konseptuell nedbør-avrenningsmodell (se kap. 10). Videre er overførbarheten av ML-modeller mellom de ulike grønne takene i studien testet for å undersøke potensialet ved å bruke ML-modeller som et verktøy for planlegging og designformål. ML-modellene gav sammenlignbare resultater som den konseptuelle nedbør-avrenningsmodell i å estimere årlig retensjon. Videre ga ML-modellene tilfredsstillende modelleringsresultater (Nash–Sutcliffe-effektivitet (NSE) > 0.5) for de fleste takene, noe som indikerer at modellene kan brukes til å estimere fordrøyningsegenskapene til takene. Variasjonene i ML-modellenes ytelse mellom byene var større enn mellom de forskjellige takkonfigurasjonene, noe som ble tilskrevet de forskjellige klimatiske forskjellene mellom de fire byene. Overførte ML-modeller mellom byer med lignende egenskaper for nedbørshendelser (Bergen–Sandnes, Trondheim–Oslo) ga tilfredsstillende modelleringsnøyaktighet (NSE > 0.5 og prosentvis skjevhet |PBIAS| < 25 %) i de fleste tilfeller. Vi anbefaler imidlertid bruk av den konseptuelle nedbør-avrenningsmodell framfor de overførte ML-modellene, for å estimere retensjon, siden denne modellen gir mer nøyaktig volumanslag. Mer studier er nødvendig for å utforske det fulle potensialet til ML-modeller i å estimere fordrøyning.

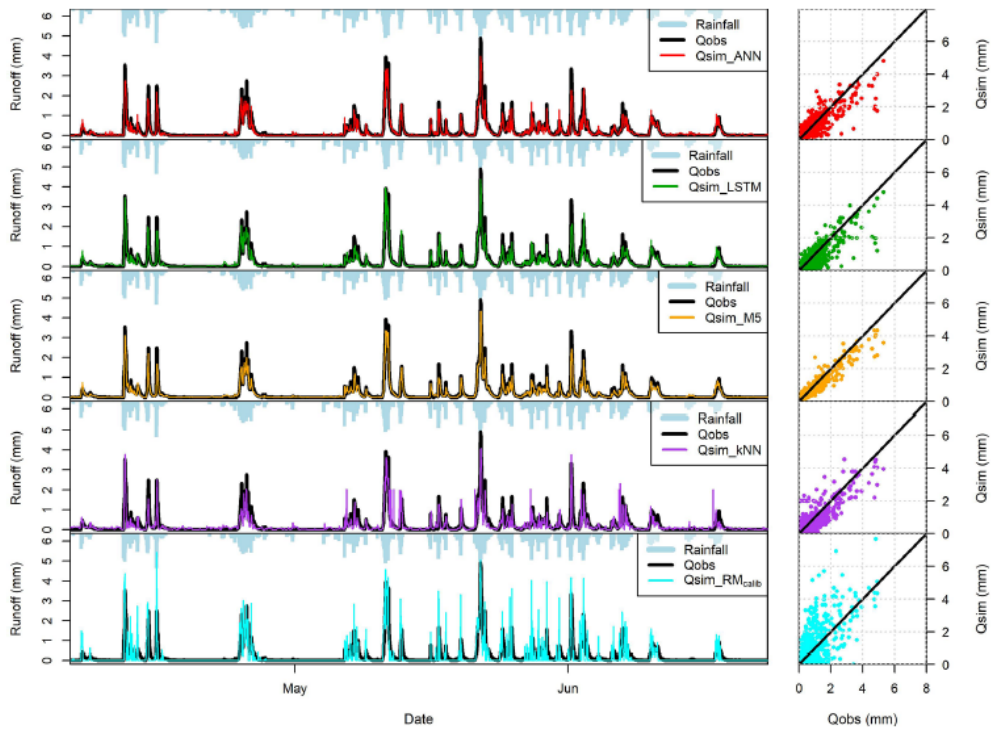
11.2 Hvordan bruke / tolke resultatene

Artikkelen har testet ulike modeller på 16 ulike tak (de samme takene som også er brukt i andre kapitler) og vurderer egnetheten til å simulere akkumulert avrenning og avrenningsprofil. Figur 22 viser akkumulerte verdier nedbør, observert avrenning og simulert avrenning for de 16 takene. Figur 23 viser et eksempel på simuleringer for et tak i Bergen (BERG1) over en 3 måneders periode.

Overvannshåndtering med fordøyende tak



Figur 22 Akkumulert nedbør, observert avrenning og simulert avrenning fra de grønne takene, fra Abdalla m.fl. (2021).



Figur 23 Modellering av BERG2-taket (eksempel) som viser nedbør, observert og simulert avrenning og tilhørende Q-Q plott, fra Abdalla m.fl. (2021).

Vurdering av hvor bra modellen klarer å modellere akkumulert avrenning og avrenningsprofiler er gjort ved å benytte en volumetrisk faktor (vol) og Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE). Den volumetriske faktoren beregnes fra prosentvis feil (percentage bias = PBIAS) for akkumulerte volum. Følgende sammenhenger er benyttet:

$$PBIAS = 100 \times \frac{\sum Q_{obs} - \sum Q_{sim}}{\sum Q_{obs}} \quad (14)$$

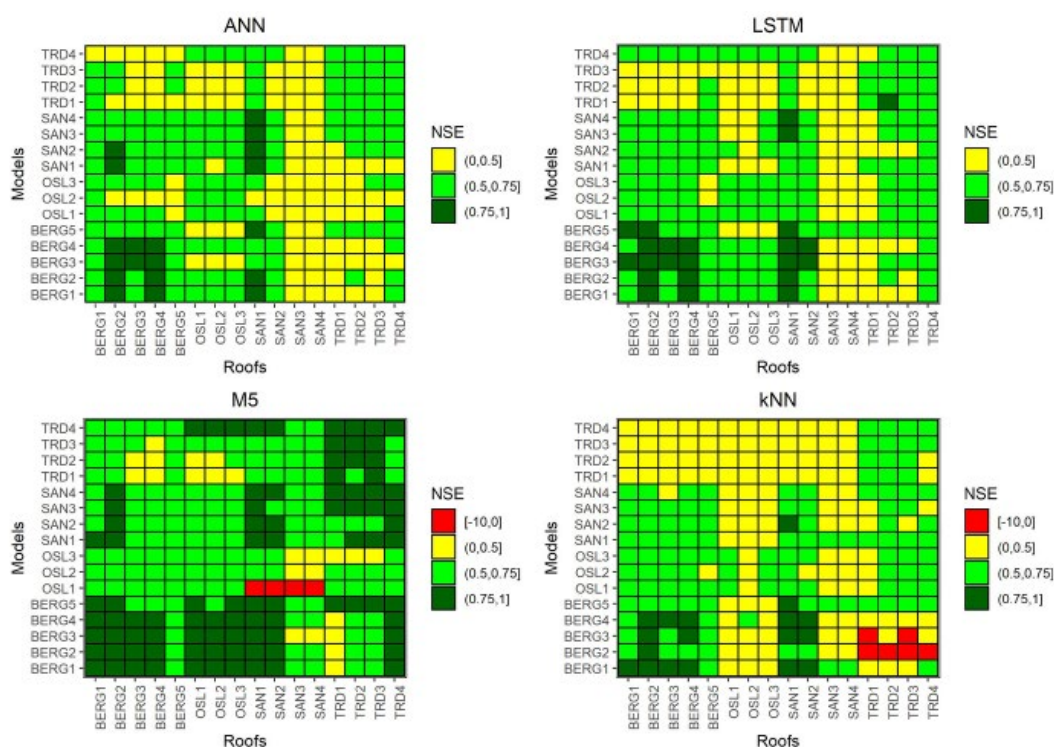
$$NSE = 1 - \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum (Q_{obs} - Q_{gjsnitt,obs})^2} \quad (15)$$

$$vol = 1 - \frac{|PBIAS|}{100} \quad (16)$$

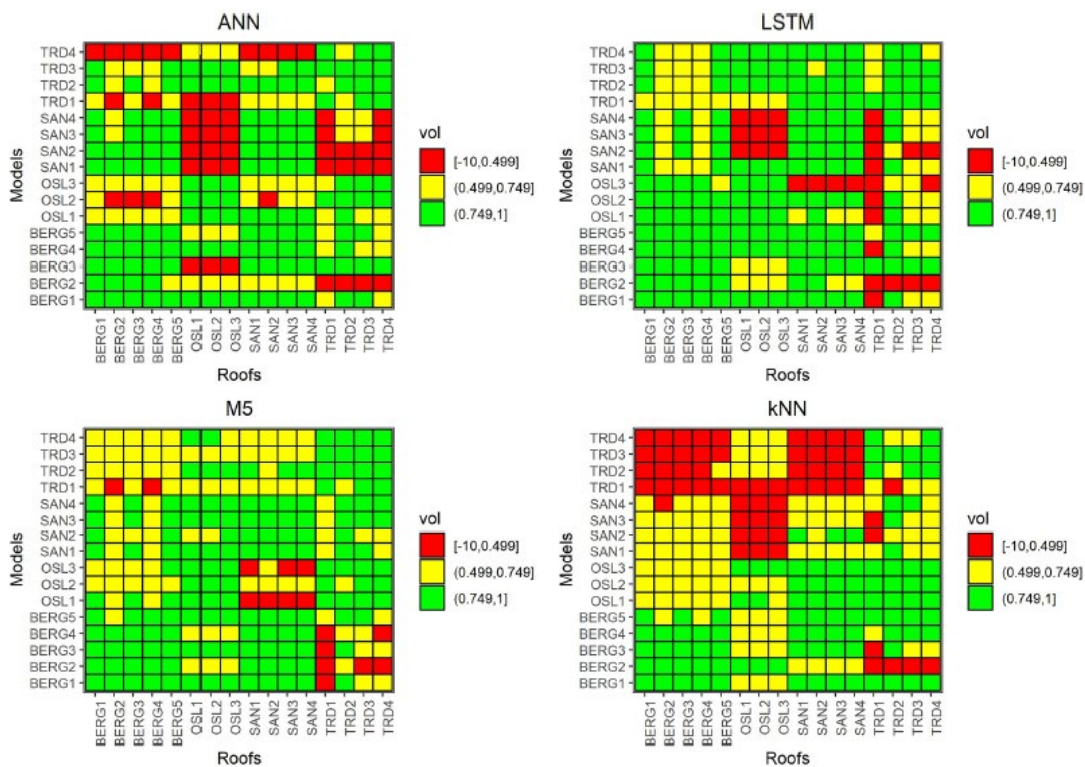
der Q_{obs} er observert avrenning, Q_{sim} er simulert avrenning og $Q_{gjsnitt,obs}$ er gjennomsnittlig observert avrenning beregnet med utgangspunkt i alle observerte avrenninger.

Basert på disse størrelsen konkluderte artikkelen at alle fire ML-modeller og den konseptuelle vannbalansemodellen beregner tilfredsstillende resultater for retensjon. For simulering av avrenningsprofilene gir de fire ML-metodene bedre resultater enn den enklere konseptuelle vannbalansemodellen.

De samme vurderingskriteriene er brukt for å vurdere om modellene kan benyttes på andre tak enn det taket modellen er utviklet for. Figur 24 og Figur 25 viser henholdsvis NSE og vol for modeller som er testet på andre tak, merk at i figurene er det modellen til taket som er angitt på y-aksen som er testet på takene som er angitt på x-aksen. Alle kombinasjoner som er lys eller mørk grønne har tilfredsstillende overføring av modellen fra et tak til et annet tak. Som vist i figurene har noen av modellene tilfredsstillende resultater mens andre ikke egner seg for bruk andre steder.



Figur 24 Overførbarhet mellom forskjellige modeller og forskjellige tak, avrenning. Modellen på y-aksen er brukt til å simulere de målte takene langs x-aksen. Hentet fra Abdalla m.fl. (2021).



Figur 25 Overførbarhet mellom forskjellige modeller og forskjellige tak, akkumulert volum. Modellen på y-aksen er brukt til å simulere de målte takene langs x-aksen. Hentet fra Abdalla m.fl. (2021).

11.3 Kort fortalt

Artikkelen anbefaler å bruke den konseptuelle nedbør-avrenningsmodellen med litteraturverdier for maksimal lagringskapasitet for grønne tak (S_{max} -parameteren) for å estimere den årlige retensjonen av nye grønne tak framfor å bruke ML-modeller utviklet for tak lokalisert andre steder.

Veltrente ML-modeller viste mer nøyaktige prediksjoner av avrenningsprofilene enn den konseptuelle vannbalansemodellen.

11.4 Aktuell referanse

Abdalla E, Pons V, Stovin V, De-Ville S, Fassman-Beck E, Alfredsen K & Muthanna T.M: Evaluating different machine learning methods to simulate runoff from extensive green roofs. Hydrology and Earth Systems Science 2021, Vol 25, p. 5917–5935; doi.org/10.5194/hess-25-5917-2021

12 Nytt rammeverk for dimensjonering av blågrønn infrastruktur

[Teksten er publisert som populærvitenskapelig artikkel i VANN, nr. 2, 2023³]

12.1 Sammendrag

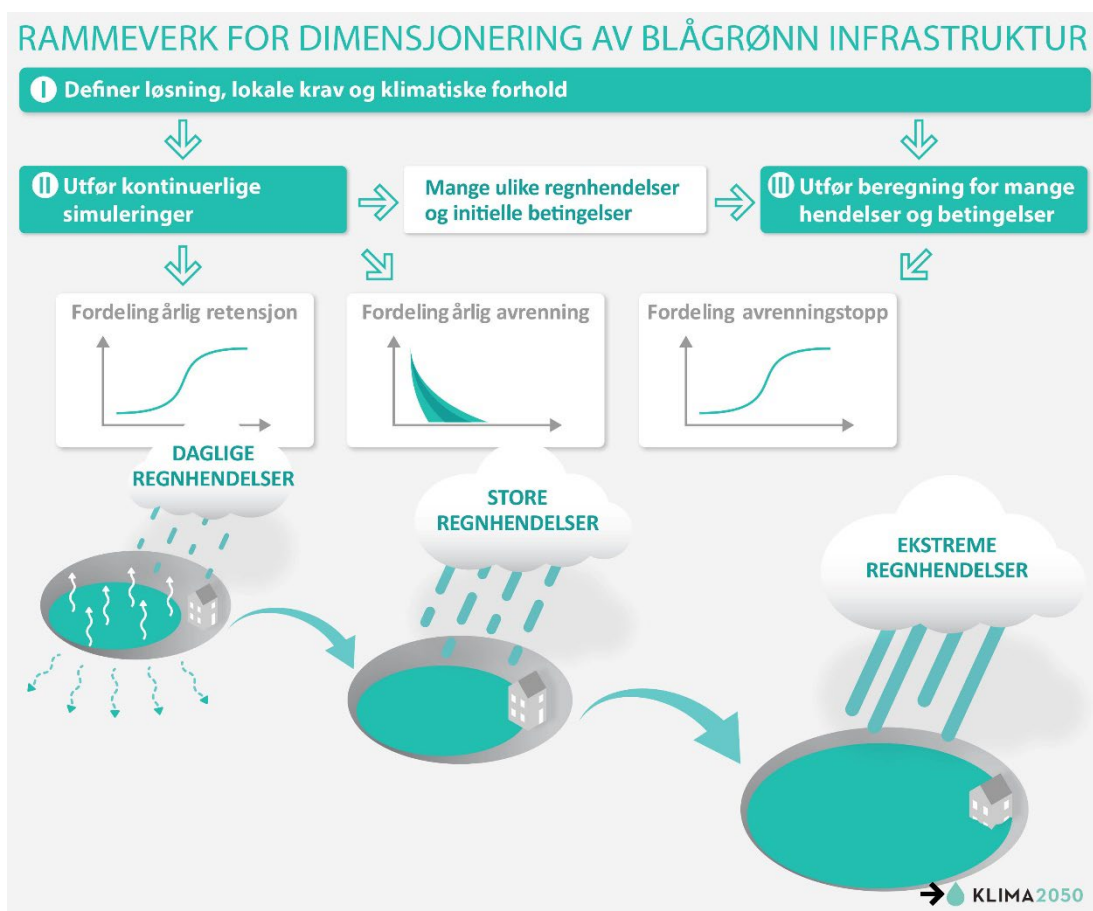
Blågrønn infrastruktur (naturbaserte løsninger) for å håndtere overvann vil være viktige løsninger for å møte økende mengder overvann som følge av urbanisering og klimaendringer. I Norge brukes 3-trinnstrategien til å håndtere overvann, hvor 1) det daglige regnet skal håndteres lokalt med retensjonsbaserte løsninger, 2) kraftigere regn skal håndteres med detensjonsbaserte løsninger, mens 3) ekstreme nedbørmengder skal håndteres med en sikker flomvei. Hvordan de ulike løsningene innenfor hvert trinn skal dimensjoneres og hvordan de samhandler med hverandre er imidlertid ikke klart. En enhetlig tilnærming til dimensjonering mangler fortsatt i Norge og det er behov for å kople ulike fagfelt som klimatologi, urban hydrologi og risikokvantifisering for å øke forståelsen av hvordan de tre trinnene i 3-trinnstrategien kan jobbe sammen for å gi en robust og klimatilpasset overvannshåndtering i byer og tettsteder. Pons m.fl. (2022, a og b) har foreslått et nytt rammeverk som tar høyde for disse aspektene og som inkluderer tre deler.

En skjematisk oversikt over de enkelte delene i det nye rammeverket er gitt i Figur 26. Del I handler om å velge løsninger, få oversikt over lokale krav, finne relevante modeller og tilgjengelige hydro-meteorologiske data. I del II gjøres det en kontinuerlig simulering av ulike løsninger basert på lange tidsserier og under ulike scenarier for å beregne fordelingen av årlig retensjon og avrenning fra valgte løsninger. Simuleringene forutsetter at løsningen er godt beskrevet med en hydrologisk modell som tar høyde for evapotranspirasjon, infiltrasjon og fordrøyningsmekanismer. Videre kreves det temperatur- og nedbørsdata med høy tidsoppløsning. I del III av rammeverket lages det et stort antall regnhendelser for en gitt returperiode, der hendelsene har ulike initialbetingelser bestemt ut ifra den kontinuerlige simuleringen og forskjellig fordeling av nedbørsintensiteten. Ved å beregne funksjonen til valgt løsning for mange hendelser vil man få informasjon om hvor robust og pålitelig løsningen er, samtidig som man vil få informasjon om når og hvor ofte løsningen ikke klarer å håndtere overvannet.

Den kontinuerlige simuleringen vil gi grunnlag for å vurdere løsningens funksjon etter trinn 1 og trinn 2 i 3-trinnstrategien og vil kreve enten lange tidsserier med fin oppløsning eller en nedskaleringmodell og lange tidsserier med daglig oppløsning. Den lokale hendelsesbaserte tilnærmingen vil gi grunnlag for vurderinger knyttet til trinn 2 og trinn 3 i 3-leddstrategien og vil kreve intensitet-varighet-frekvens (IDF)-kurver, en nedskaleringmodell og startbetingelser hentet fra den kontinuerlige simuleringen.

Det foreslåtte rammeverket er et nytt paradigme i måten blågrønn infrastruktur dimensjoneres og vurderes for å håndtere overvannet etter 3-trinnsstrategien, der man går fra å vurdere én hendelse til å studere funksjonen til den blågrønne infrastrukturen for et bredt spekter av hendelser, inkludert under hvilke hendelser infrastrukturen ikke klarer å håndtere overvannet. Det foreslåtte rammeverket er spesielt relevant i urbane områder med økende urbanisering og/eller økende utfordringer knyttet til klimaendringer. Rammeverket vil gi mer robust og pålitelig informasjon om ytelsen til de blågrønne infrastruktur-løsningene sammenlignet med den tradisjonelle tilnærmingen.

³ <https://vannforeningen.no/dokumentarkiv/nytt-rammeverk-for-dimensjonering-av-blagronn-infrastruktur-for-overvannshandtering/>

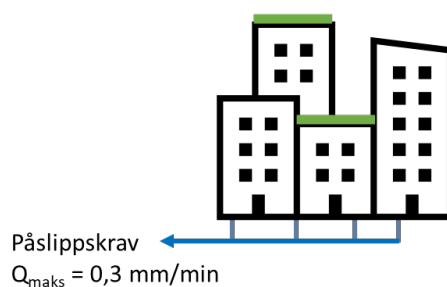


Figur 26 Skjematisk fremstilling av det nye rammeverket.

12.2 Eksempel på bruk (fordrøyende tak)

For å demonstrere det nye rammeverket vil vi bruke et eksempel med et nytt bygg som skal bruke et grønt fordrøyende tak til lokal overvannshåndtering. Lokale krav fra kommunen krever at vi bruker en returperiode på 20 år og at utslippet fra taket som helhet ikke overstiger 0,3 mm/min. Basert på beregnet konsentrasjonstid og lokale IVF-kurver, er det beregnet et nødvendig areal av det fordrøyende taket for å håndtere en tradisjonell dimensjonerende 20-års regnhendelse med eller uten klimafaktor, se Figur 27. Med dette som utgangspunkt kan vi benytte det nye rammeverket og se hvilken tilleggsinformasjon vi kan fremskaffe for å få en bedre oversikt over hvordan det grønne fordrøyende taket vil fungere under lokale forhold og forskjellige regnhendelser.

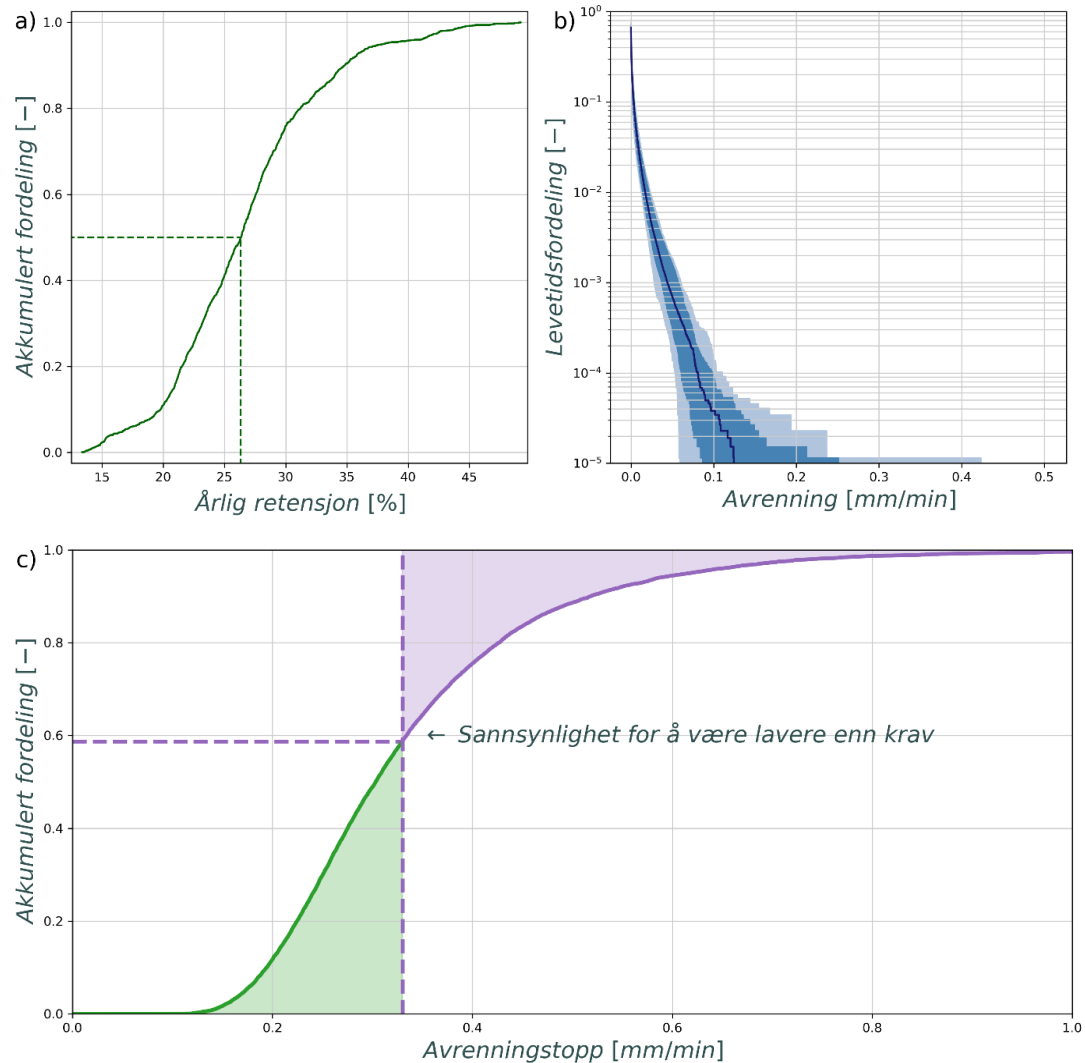
Del I: Vi har allerede bestemt hvilken løsning og hvilket lokalt krav vi må forholde oss til, men i tillegg har vi tilgjengelig 30 år med værdata med en tidsoppløsning på 1 minutt som er et fint grunnlag for den kontinuerlige simuleringen i del II.



Figur 27 Eksempel på et bygningskompleks som håndterer overvannet med grønne fordrøyende tak.

Del II: Med 30 års klimadata tilgjengelig kan vi gjøre en langtids kontinuerlig simulering som kan oppsummeres i form av fordelingskurver og varighetskurver av ulike hydrologiske størrelser. Figur 28a viser fordelingen av den årlige retensjonen til det grønne fordrøyende taket. Taket i vårt eksempel har en median årlig retensjon lik 25 %, som forteller oss at vi kan forvente at 25 % av den årlige nedbøren håndteres gjennom evapotranspirasjon og fordamping, og således aldri vil nå ledningsnett. Figuren viser også at det er en nokså stor naturlig årlige variasjon i retensjonen mellom ca. 10 % til 45 %. Dette viser ytelsen av taket etter trinn 1 i 3-trinnsstrategien. Figur 28b viser beregnet varighetskurve for avrenningen fra taket og er et estimat på hvor ofte/lang tid avrenningen fra taket overskrider en gitt verdi. Figuren viser median-verdien (svart kurve) og naturlig variasjon (blå skraverte felt). Fra figuren kan vi se at verdien 0,1 mm/min overskrides 20 minutter per år, men at den naturlige variasjonen fra år til år viser at denne overskridelsen kan variere fra 0 minutter til ca. 1 time. Vi ser også at basert på historiske data, er det svært liten sannsynlighet for at avrenningen skal overstige 0,3 mm/min. Dette viser ytelse av taket under normalsituasjon etter trinn 2 i 3-trinnsstrategien.

Del III: Basert på resultatene fra den kontinuerlige simuleringen med langtids klimadata, kan vi hente ut både forskjellige startbetingelser (for eksempel graden av fuktighet i det fordrøyende laget) og hvor sannsynlige disse er. Kombineres disse med ulike fordelinger av nedbørsintensiteten kan vi konstruere mange ulike regnhendelser med samme returperiode. I vårt eksempel er det konstruert 10 000 forskjellige lokale hendelser med returperiode 20 år. Figur 28c viser fordelingen til disse 10 000 avrenningstoppene der kurven gir sannsynligheten for at avrenningen fra det grønne fordrøyende taket ligger under angitt verdi. Vi ser at sannsynligheten for å være under det oppgitte kravet på 0,3 mm/min er 0,6, det vil si at vi er under kravet for 60 % av 20-års hendelsene. Kurven kan deles inn i et "velfungerende"-område hvor det grønne fordrøyende taket oppfylder kravene (grønt område) og et «svikt»-område der det grønne fordrøyende taket ikke oppfylder kravene (lilla område). Svikt-området gir nyttig informasjon om hvor ofte den blågrønne infrastrukturen ikke oppfylder kravene og hvor alvorlig avviket vil være. Dette viser ytelsen til taket under mer ekstreme hendelser og vil gi informasjon om trinn 2 og trinn 3 i 3-trinnsstrategien.



Figur 28 Resultater fra kontinuerlig simulering som viser fordeling årlig retensjon (a) og naturlig variasjon i avrenningen (b), i tillegg til resultater fra mange hendelsesbaserte simuleringer med ulike 20 års regnhendelser og startbetingelser som viser fordelingen av avrenningstopp (c).

12.3 Aktuelle referanser

Pons V, Muthanna T.M, Sivertsen E & Bertrand-Krajewski J-L; Revising Green roof design methods with downscaling model of rainfall time series. Water Science & Technology 2022, Vol 85(5), p. 1363–1371; doi.org/10.2166/wst.2022.023

Pons V, Benestad R, Sivertsen E, Muthanna T.M & Bertrand-Krajewski J-L: Forecasting green roof detention performance by temporal downscaling of precipitation time-series projections. Hydrology and Earth System Sciences 2022, Vol 26, 2855–2874; doi.org/10.5194/hess-26-2855-2022

13 Oversikt over resultater fra Høvringen

13.1 Sammendrag

Her er alle loggerresultater og noen beregninger fra testfeltet på Høvringen presentert. Det er fokusert på å vise de overordnede resultatene og omfanget av testing, mens detaljer er utelatt. Noen av samleplottene inneholder data fra perioder som er påvirket av enten ekstremtesting, manglende data og/eller utfordringer med loggingen. Disse er forsøkt kommentert der det er aktuelt under kulepunktene.

13.2 Kommentarer til databehandling

- Datainnsamling for hver generasjon:
 - Generasjon 1: Fra 2017-05-01 til 2018-06-30
 - Generasjon 2: Fra 2018-07-01 til 2021-09-30
 - Generasjon 3: Fra 2021-10-01 til (fortsatt aktiv mai 2023)
- Før april 2017:
 - Månedene før det første grønne taket ble installert i april 2017 er ikke med i oversikten for tak 3
- Juni 2018:
 - 2018-06-05: installering av sprinkleranlegg, to uker med testing på tak 2
 - 2018-06-21: installering og testing av sprinkleranlegg på tak 1
 - Juni 2018 er dermed ikke med i beregningene for varighetskurver
- Mai – juli 2019
 - 2019-05-09: installering og testing av sprinkleranlegg på tak 3
 - 2019-05-15: start av ekstremtester på tak 3
 - Mai – juli 2019 er ikke med i beregningene av ytelse og varighetskurver

13.3 Observasjoner

Resultater for målt retensjon er gitt i kapittel 14.1 og Figur 32 til Figur 41. Følgende kan observeres:

- Generasjon 1:
 - Overveiende snø i januar og februar, som gir forhøyet avrenning i mars og april.
 - Juni 2018 må man se bort fra pga. testing av sprinkleranlegg
 - Mai - oktober synlig retensjon for tak 3 (med sedum)
 - Liten retensjon for tak 1 (med belegningsstein) og tak 2 (referanse)
- Generasjon 2:
 - Januar til april vinterdrift med uklar sammenheng mellom nedbør og avrenning, som antagelig skyldes snø og tine/fryse-sykluser
 - For måneder som ikke er belemt med ekstremtesting o.l. er det tydelig retensjon for alle tre takene, der tak 2 (referanse) har klart minst retensjon, mens tak 1 og tak 3 har bedre men varierende retensjon enn tak 1 (se f.eks. mai 2020).

- Generasjon 3:
 - De første månedene ble løsningene vannet og oktober og november 2021 bør ikke vurderes
 - Noe data ble mistet våren 2022
 - Vintermånedene januar til april 2023 viser variasjon pga. snø og tine/fryse-sykluser
 - Resultater for tak 2 fra juli 2022 bør ikke vurderes da det er oppdaget feil på sensor.
 - Både tak 1 og tak 3 har målt retensjon på nivå med de andre generasjonene.

Resultater for redusert avrenningstopp er gitt i delkapittel 14.2 og Figur 42 til Figur 48. Følgende kan observeres:

- Generasjon 1:
 - Tak 3 ble installert i april 2017, så i januar til mars er tak 3 et vanlig svart tak og likt referansetakket i tak 2. Det er god overenstemmelse i målt reduksjon i avrenningstoppen.
 - Fra mai 2017 er det reduksjon i avrenningstoppen fra tak 1 og tak 3 på samme høye nivå.
 - I desember 2017 er det høy reduksjon i avrenningstopp fra alle tre takene, antagelig på grunn av nedbøren kom som snø og blir lagret på taket.
 - Lignende observasjoner for januar til mars 2018 med høy reduksjon i avrenningstoppen også fra tak 2 på grunn av snølagring. Fra april ser man at reduksjonen i avrenningstoppen fra tak 2 avtar kraftig og man får en hurtig respons fra det svarte taket. Tak 1 og tak 3 opprettholder en høy reduksjon i avrenningstoppen.
- Generasjon 2:
 - Tak 1 og tak 3 har stor reduksjon i avrenningstopp
 - Tak 2 har langt lavere reduksjon i avrenningstopp og viser en tydelig effekt av vinterforhold der det ikke er samsvar mellom når nedbøren faller som snø og når den tiner og skaper avrenning
 - Vi ser stor variasjon i noen måneder for tak 3 som skyldes testing med sprinkleranlegget.
- Generasjon 3:
 - Tak 1 og tak 3 viser stor reduksjon i avrenningstoppen
 - Tak 2 har utfordringer med måleutstyret og viser noe høyere verdier enn for tidligere perioder.

Resultater for forsinket centroidavrenning er gitt i delkapittel 14.3 og Figur 49 til Figur 55. Følgende kan observeres:

- Generasjon 1:
 - Tak 1 og tak 3 har betydelig forsinkelse av centroidavrenningen, der tak 1 har gjennomgående lengre forsinkelse enn tak 3
 - Tak 2 (referansetakket) har liten forsinkelse, men denne øker under vinterforhold der beregningene kompliseres av snø og fryse/tine-sykluser.
- Generasjon 2:
 - Tak 1 og tak 3 har betydelig forsinkelse i centroidavrenningen med omtrent samme gjennomsnittlige forsinkelser.
- Generasjon 3:
 - Tak 1 og tak 3 har betydelig forsinkelse i centroidavrenningen med omtrent samme gjennomsnittlige forsinkelser

Resultater fra beregnede varighetskurver er gitt i delkapittel 14.5 og Figur 57 til Figur 59. Følgende kan observeres:

- Generasjon 1:
 - Tak 1 viser redusert avrenningstopp
 - Tak 2 viser ingen redusert avrenningstopp
 - Tak 3 viser redusert avrenningstopp, men mindre reduksjon enn tak 1.
- Generasjon 2:
 - Ingen sikre konklusjoner fra denne pga. for mye støy i data, bl.a. ekstremtesting.
- Generasjon 3:
 - Tak 1 og tak 2 viser betydelig redusert avrenningstopp
 - Tak 2 må man se bort fra pga. usikre data.

Resultater fra forsinket avrenningstopp er ikke beregnet på grunn av for høy tidsoppløsning av nedbørsdataene, slik at det er vanskelig å identifisere nøyaktig når nedbørstoppen opptrer (se delkapittel 14.4 og Figur 56 for eksempel). Hvis man ønsker å se nærmere på forsinkelsen av avrenningstoppen i forhold til nedbørstoppen må dataene aggregeres opp på f.eks. timesverdier, men dette er foreløpig ikke gjort.

13.4 Konklusjon

For hver generasjon av løsninger testet på Høvringen er det hentet ut regnhendelser i snøfrie perioder og analysert for reduksjon i avrenningstoppen og sentroidforsinkelse i forhold til målt nedbør. For den første generasjonen ble det registrert 57 hendelser i løpet av åtte måneder, for den andre generasjonen ble det registrert 99 hendelser i løpet 16 måneder, mens for den tredje generasjonen er det registrert 46 hendelser i løpet av fem måneder. For hver løsning har vi beregnet statistikk for nevnte hendelser. Følgende måneder er med i beregningene:

- Generasjon 1: mai-17, juni-17, juli-17, august-17, september-17, oktober-17, november-17, mai-18
- Generasjon 2: juli-18, august-18, september-18, oktober-18, august-19, september-19, oktober-19, mai-20, juni-20, september-20, oktober-20, mai-21, juni-21, juli-21, august-21, september-21
- Generasjon 3: juni-22, juli-22, august-22, september-22, oktober-22

Resultatene er vist i Figur 29 for reduksjon avrenningstopp, Figur 30 for sentroidforsinkelse og Figur 31 for retensjon. I figurene er medianen vist med tykk strek, 25 % persentilen og 75 % persentilen er angitt med øvre og nedre del av den fargede boksen, viskerne er et uttrykk for naturlig variasjon, mens punktene over og under viskerne er verdier som ligger utenfor det som er antatt å være normal fordeling av hendelsene. Tabell 15 viser i tillegg gjennomsnittsverdiene. Det er knyttet en del usikkerhet til målingene fra tak 2, tredje generasjon, så det anbefales å se bort fra disse resultatene.

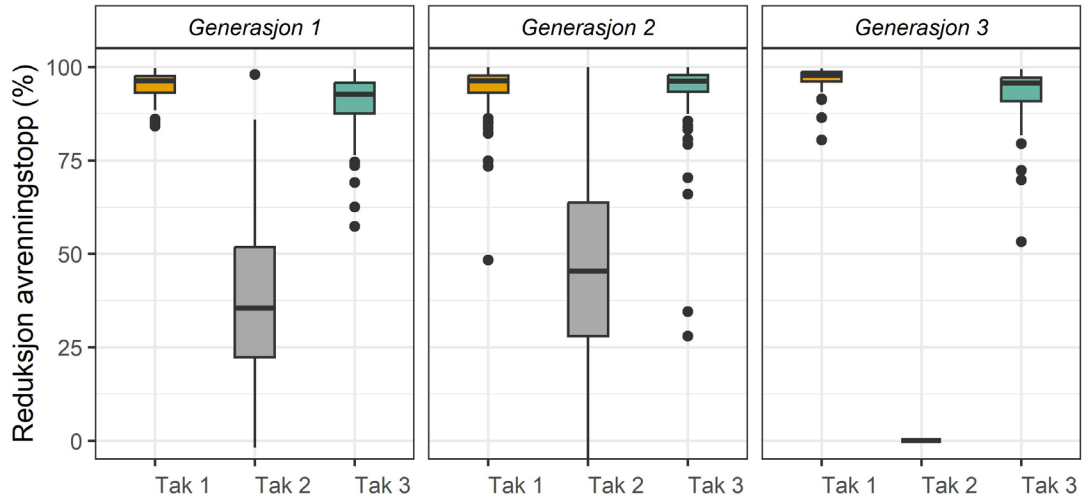
Vi ser at medianverdiene for reduksjon i avrenningstoppen fra tak 1 og tak 3 for alle generasjonene er høy (> 90%) og at det er liten variasjon i dataene (korte bokser og viskere). Samtidig ser vi at sentroidforsinkelsen er betydelig for alle løsningene, men at variasjonen i dataene er noe større for denne indikatoren. Går en litt mer i detalj, kan det bemerkes at løsningen testet på tak 1 i første generasjon har antatt høyest fordrøyningsvolum, noe som gjenspeiles i den høyeste sentroidforsinkelse, mens løsningen testet på tak 3 har antatt minst fordrøyning noe som verifiseres av målingene. De øvrige fire løsningene i generasjon 2 og 3

forventes å ligge imellom løsningene som ble testet i generasjon 1, noe vi også kan observere fra målingene av sentroidforsinkelse. Retensjonen viser en tydelig trend ved at løsninger med vegetasjon har som forventet høyere retensjon som følge av evapotranspirasjon.

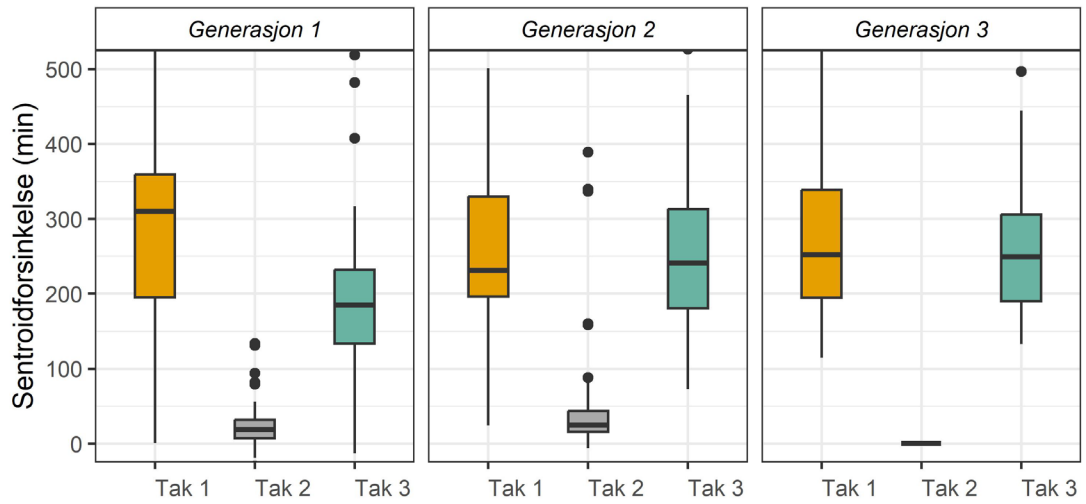
Tabell 15 Gjennomsnittlige resultater basert på målte verdier for måneder uten snø og frost (*Re* = retensjon, *Pr* = redusert avrenningstopp, *Cd* = forsinket centroidavrenning).

Generasjon	Tak 1	Tak 2	Tak 3
1 (2017-05-01 – 2018-06-30)	Fordrøyende tak med betongstein som toppdekke: Re = 15 % Pr = 95 % Cd = 297 min	Svart tak (referanse) Re = 3 % Pr = 44 % Cd=29 min	Fordrøyende tak med sedum som toppdekke: Re = 42 % Pr = 90 % Cd = 192 min
2 (2018-07-01 – 2021-09-30)	Fordrøyende tak med betongstein som toppdekke: Re = 33 % Pr = 94 % Cd = 268 min	Svart tak (referanse) Re = 25 % Pr = 48 % Cd=44 min	Fordrøyende tak med sedum som toppdekke: Re = 55 % Pr = 93 % Cd = 271 min
3 (2021-10-01 –)	Fordrøyende tak med gress som toppdekke: Re = 22 % Pr = 97 % Cd = 298 min	Svart tak (referanse) Re = NA % Pr = NA % Cd=NA min	Fordrøyende tak med sedum som toppdekke: Re = 28 % Pr = 92 % Cd = 274 min

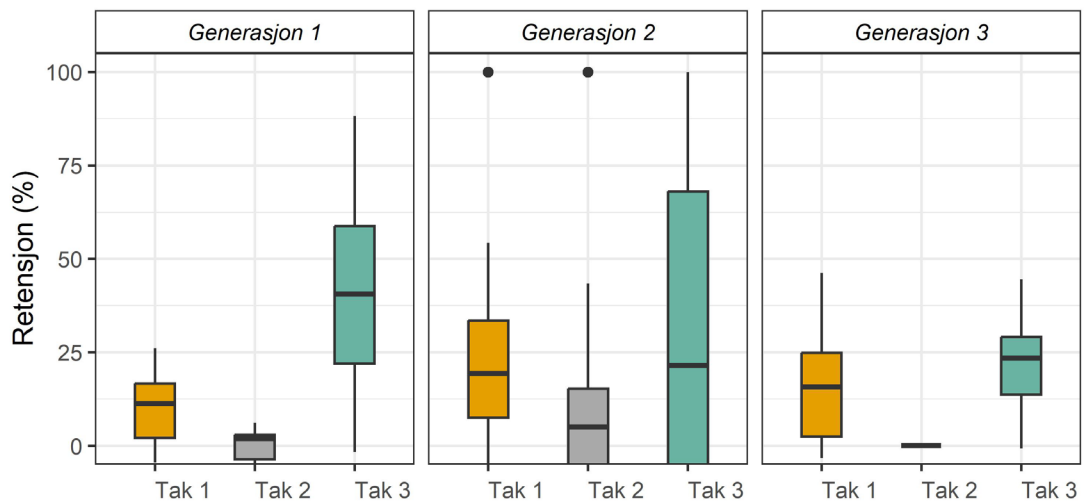
Overvannshåndtering med fordrøyende tak



Figur 29 Oppsummering målt reduksjon i avrenningstopp.



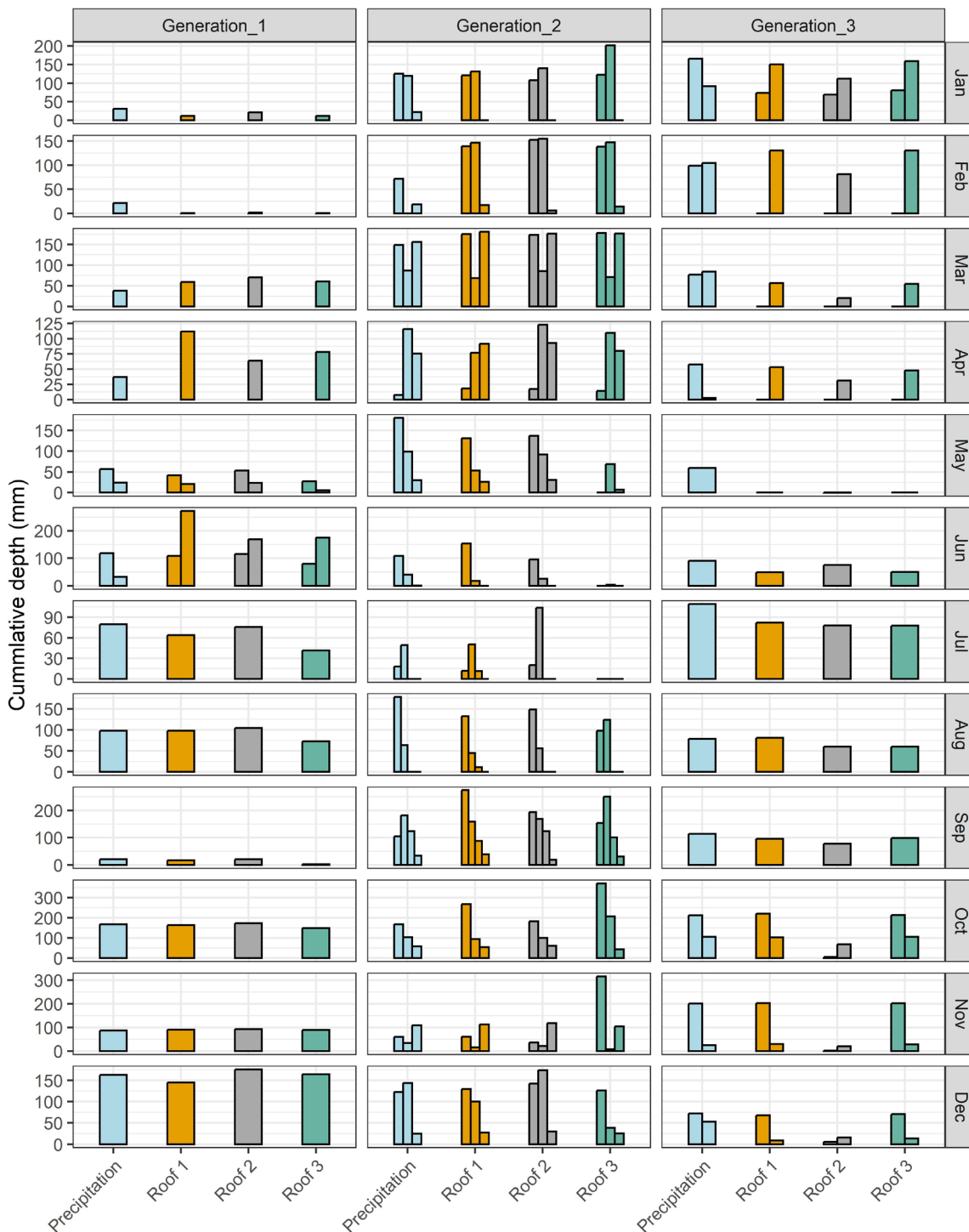
Figur 30 Oppsummering målt sentroidforsinkelse.



Figur 31 Oppsummering målt retensjon.

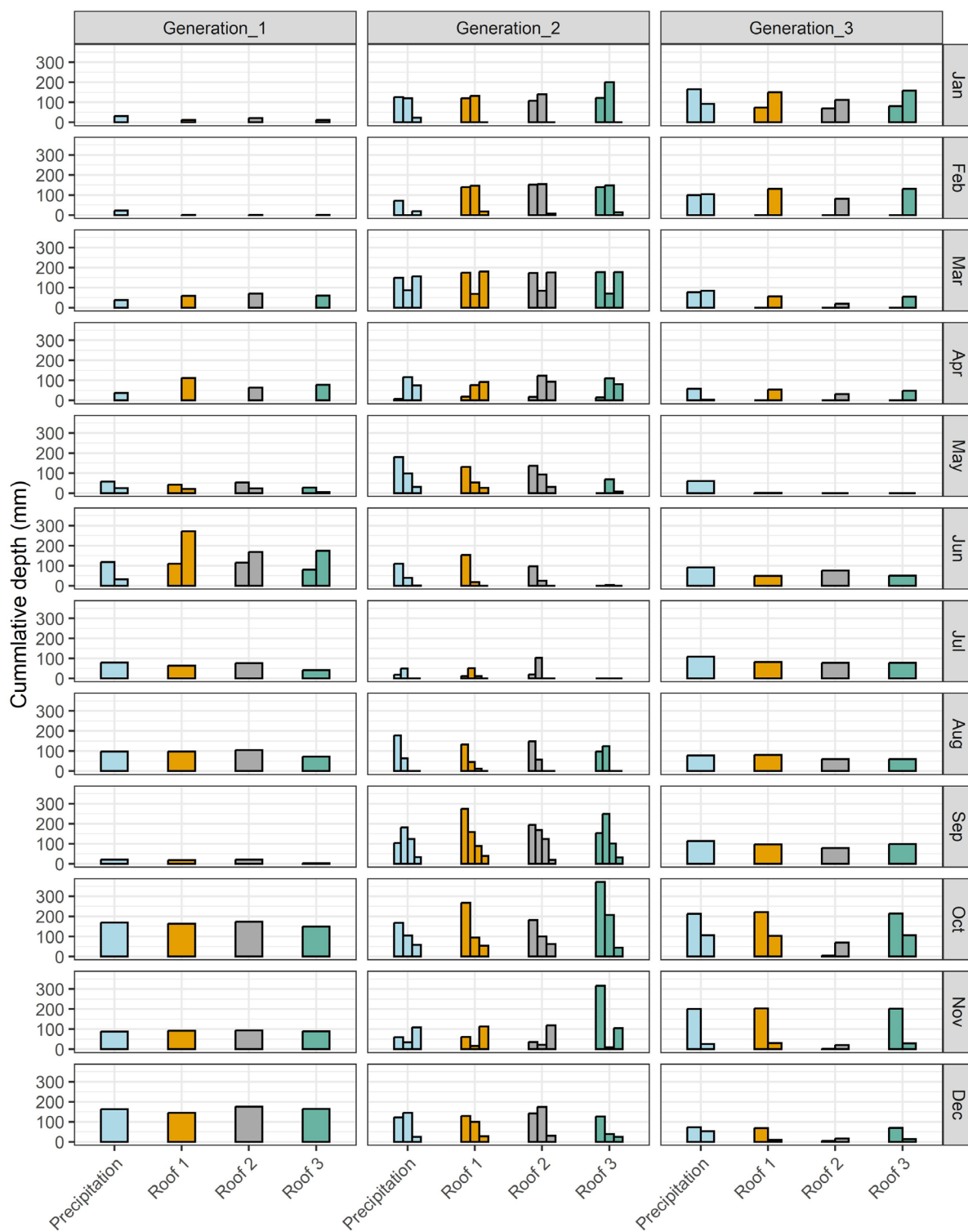
14 Oppsummerende figurer

14.1 Oppsummering målt retensjon



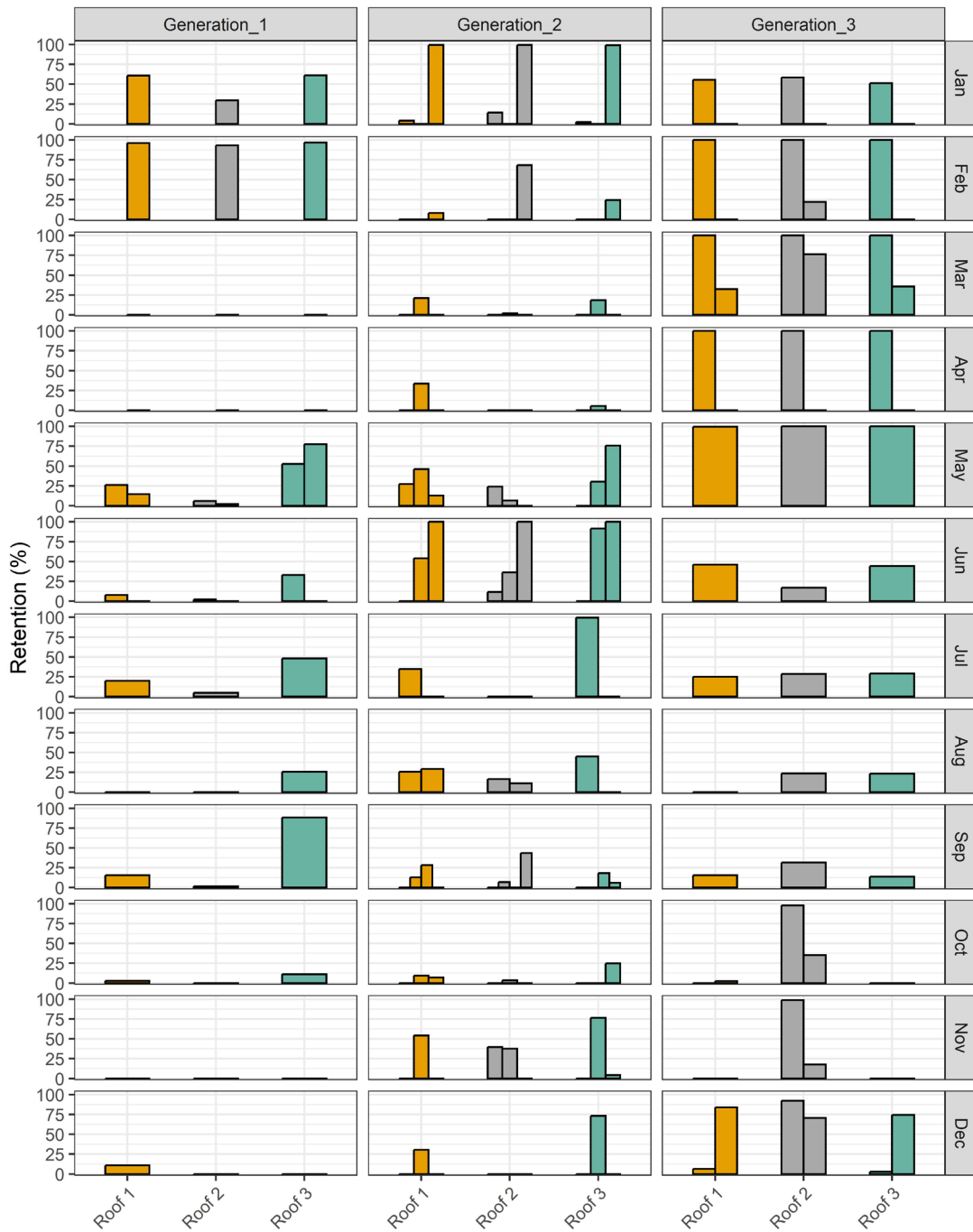
Figur 32 Akkumulert nedbør og avrenning pr måned og generasjon. Skalaen varierer. (Blå=nedbør, oransje=tak1, grå=tak2 (referansetak), turkis=tak3)

Overvannshåndtering med fordøyende tak



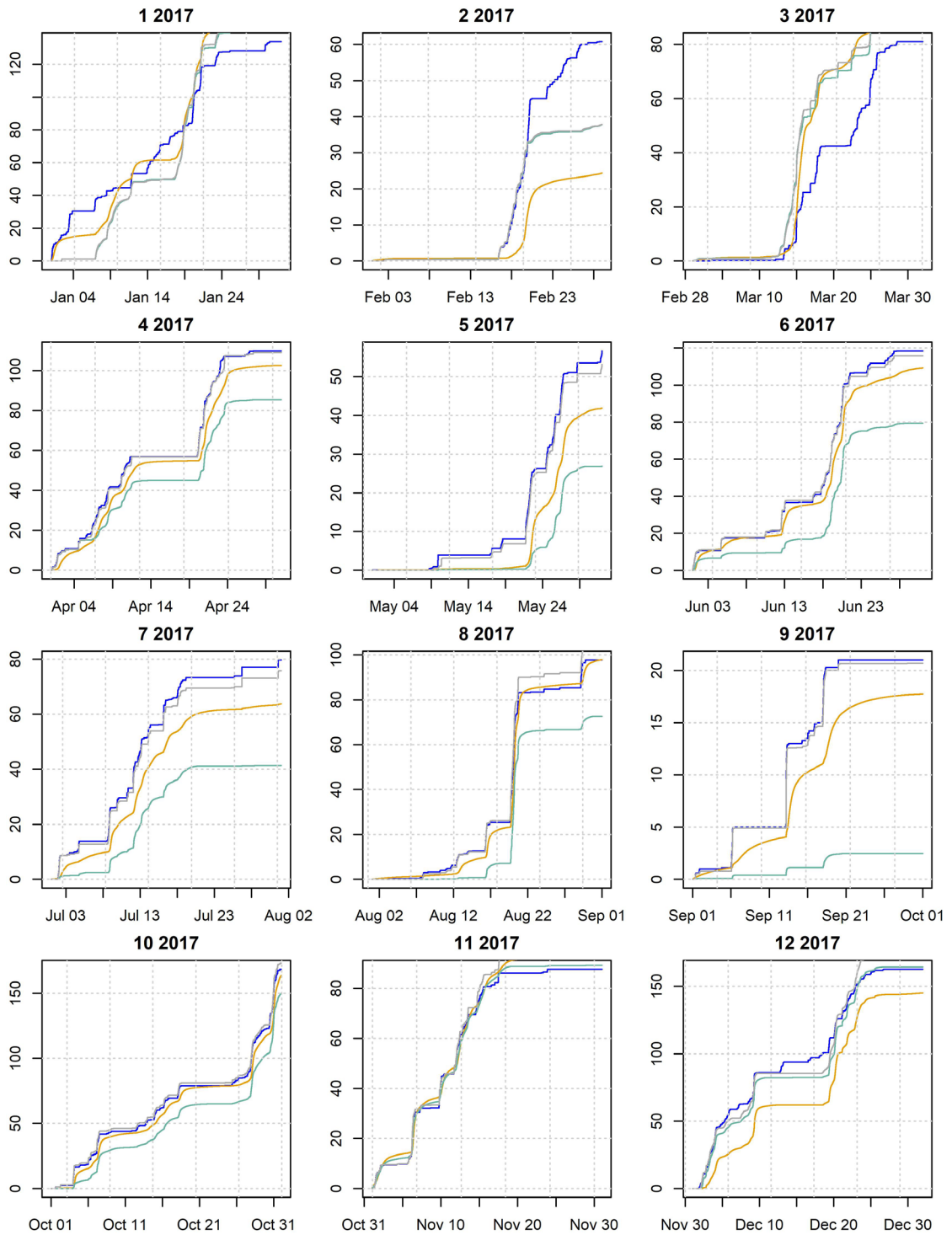
Figur 33 Akkumulert nedbør og avrenning pr måned og generasjon. Felles skala. (Blå=nedbør, oransje=tak1, grå=tak2 (referansetak), turkis=tak3)

Overvannshåndtering med fordøyende tak



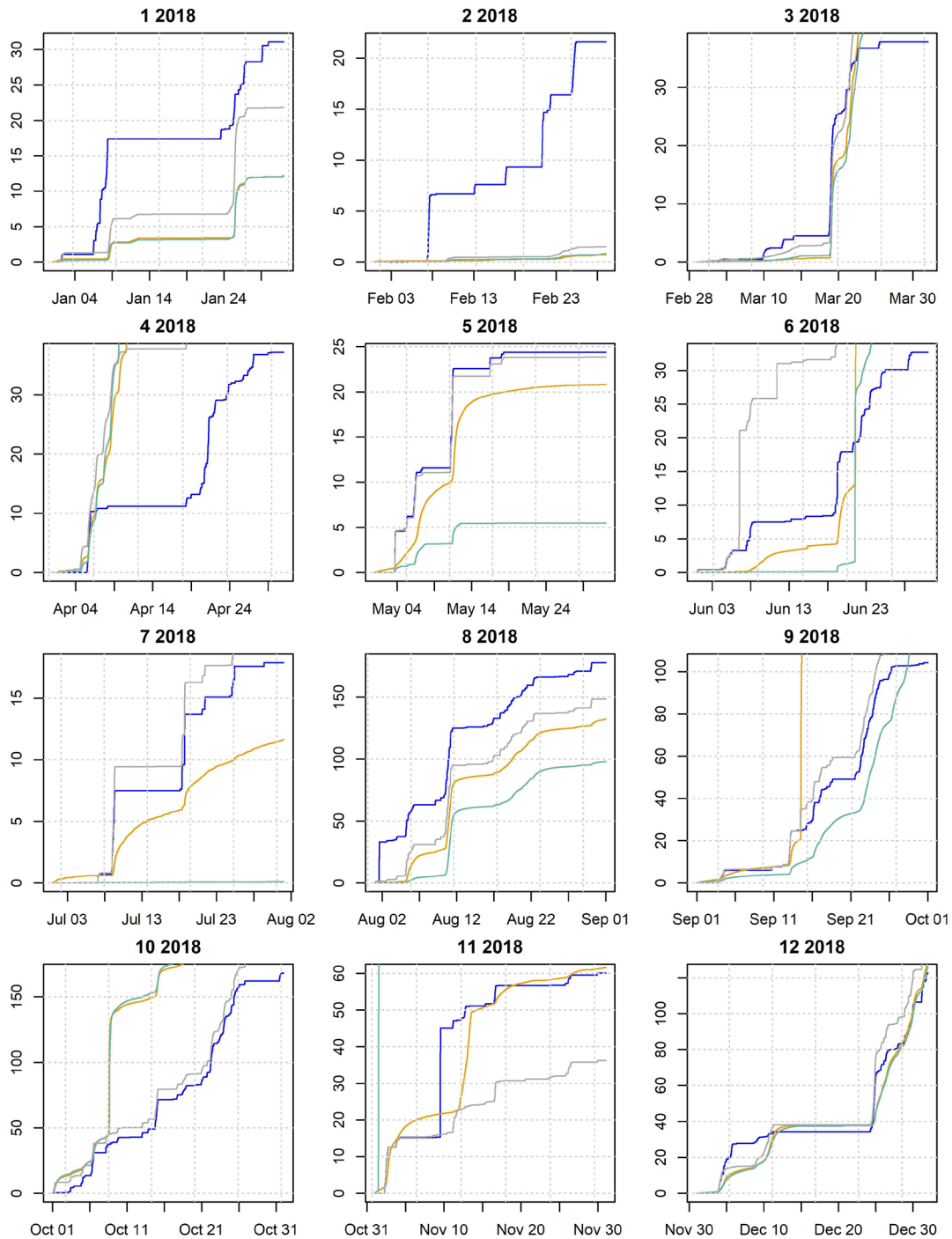
Figur 34 Retensjon pr måned, se kommentar om feilaktige målinger i noen måneder.

Overvannshåndtering med fordrøyende tak



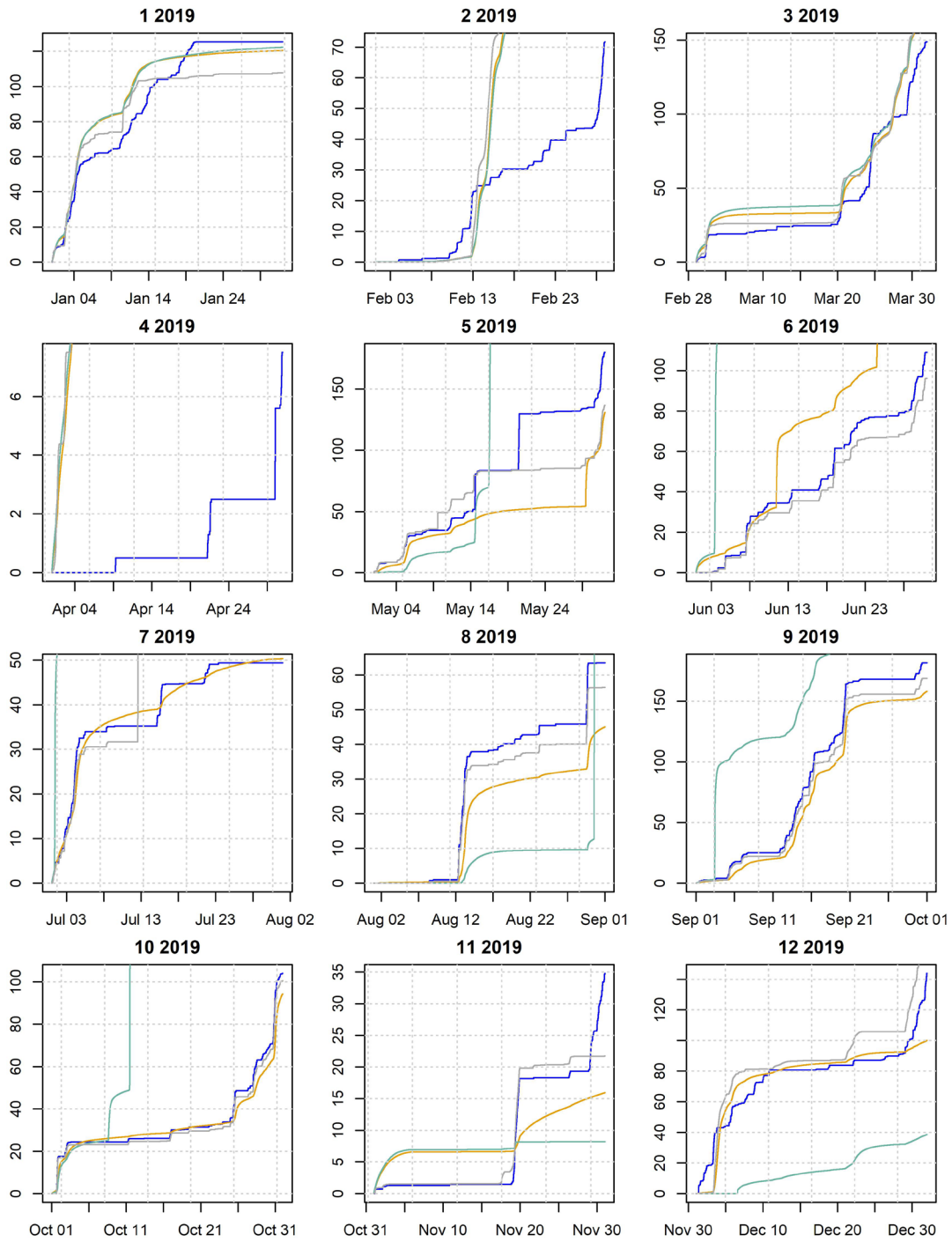
Figur 35 Akkumulert nedbør og avrenning pr måned i 2017. (Blå=nedbør, oransje=tak1, grå=tak2 (referansetak), turkis=tak3)

Overvannshåndtering med fordøyende tak



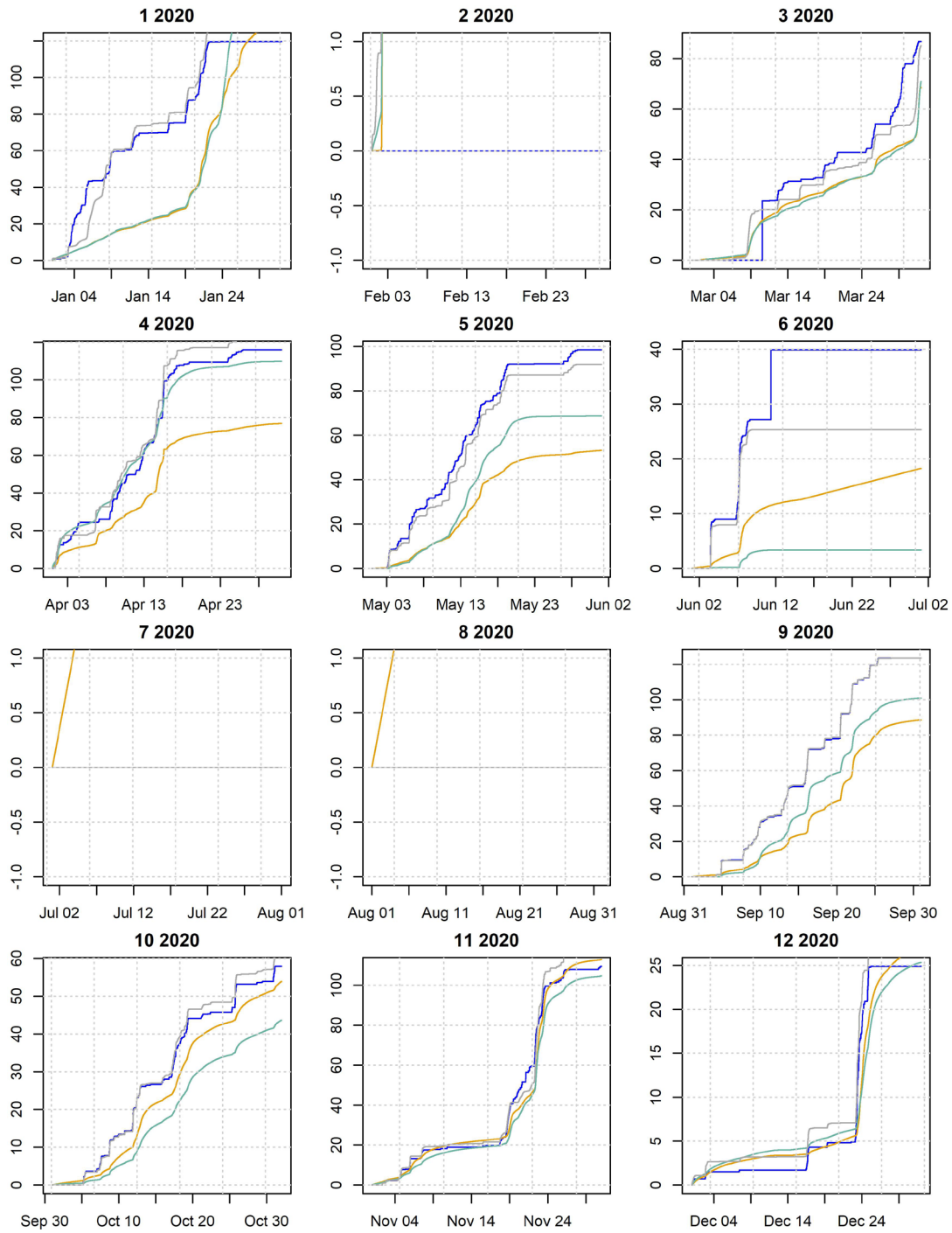
Figur 36 Akkumulert nedbør og avrenning pr måned i 2018. (Blå=nedbør, oransje=tak1, grå=tak2 (referansetak), turkis=tak3)

Overvannshåndtering med fordrøyende tak



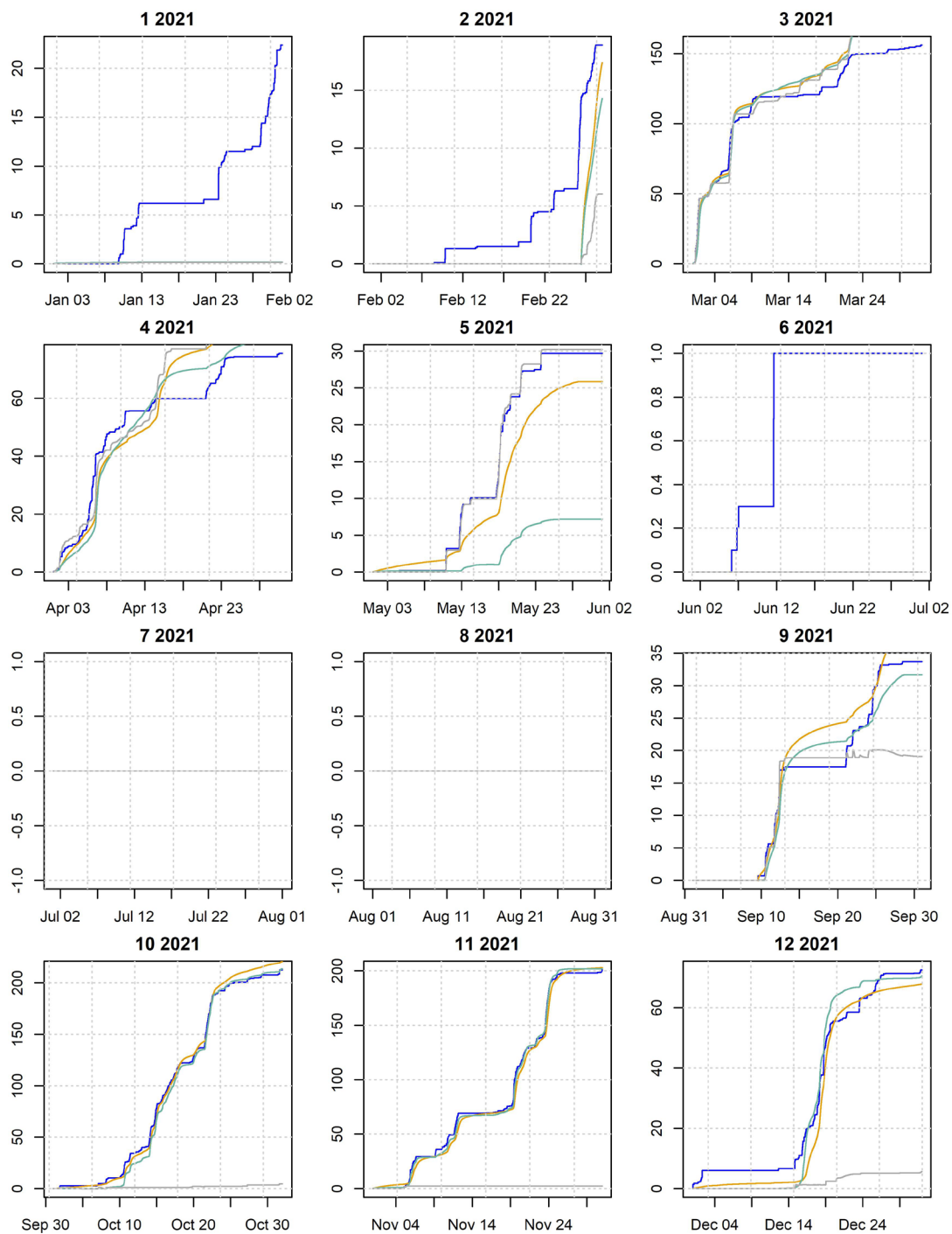
Figur 37 Akkumulert nedbør og avrenning pr måned i 2019. (Blå=nedbør, oransje=tak1, grå=tak2 (referansetak), turkis=tak3)

Overvannshåndtering med fordøyende tak



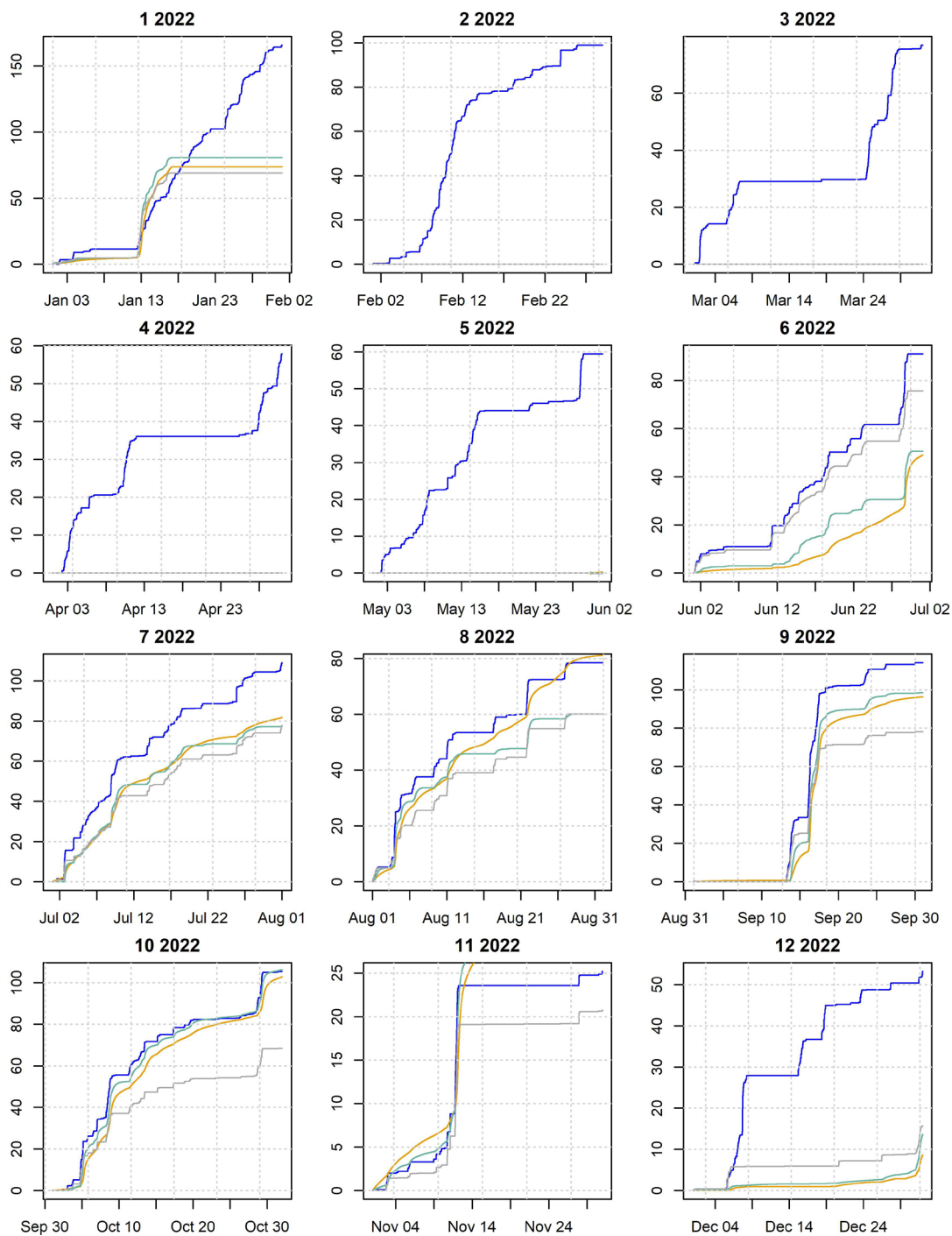
Figur 38 Akkumulert nedbør og avrenning pr måned i 2020. (Blå=nedbør, oransje=tak1, grå=tak2 (referansetak), turkis=tak3)

Overvannshåndtering med fordøyende tak



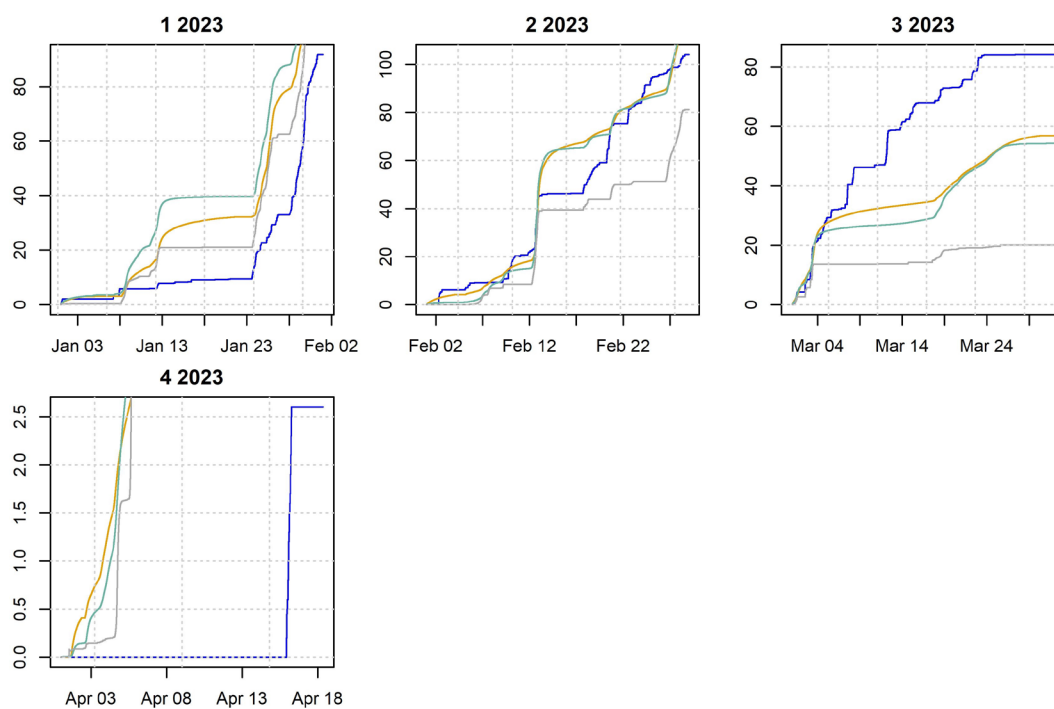
Figur 39 Akkumulert nedbør og avrenning pr måned i 2021. (Blå=nedbør, oransje=tak1, grå=tak2 (referansetak), turkis=tak3)

Overvannshåndtering med fordøyende tak



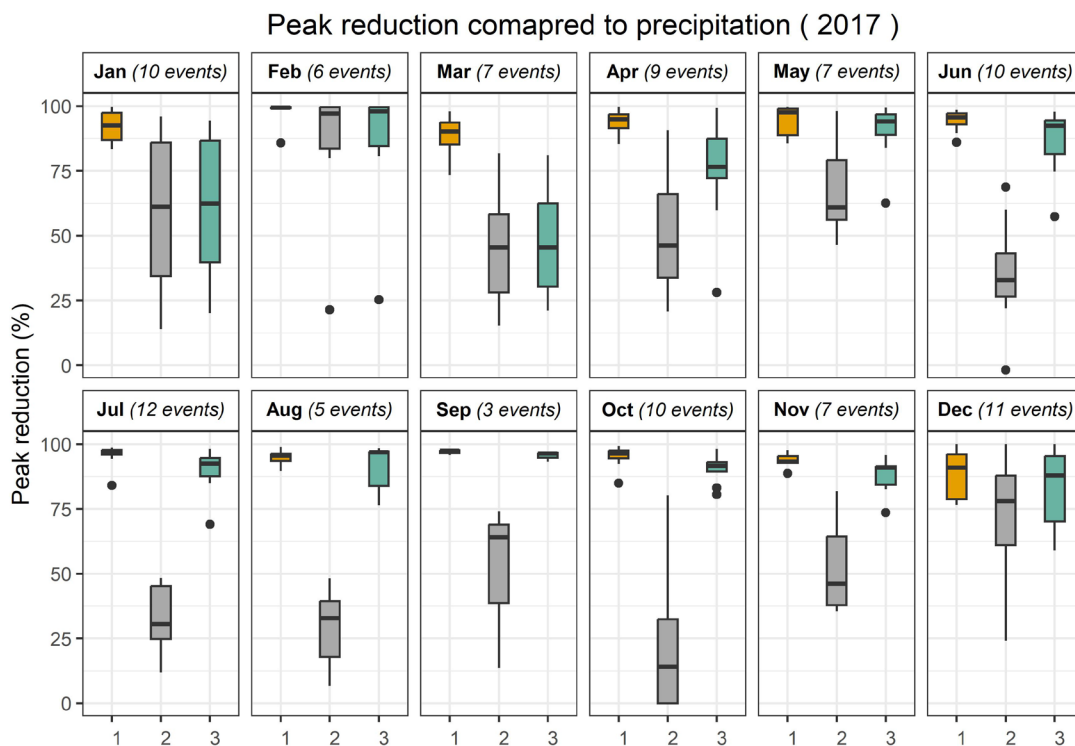
Figur 40 Akkumulert nedbør og avrenning pr måned i 2022. (Blå=nedbør, oransje=tak1, grå=tak2 (referansetak), turkis=tak3)

Overvannshåndtering med fordrøyende tak

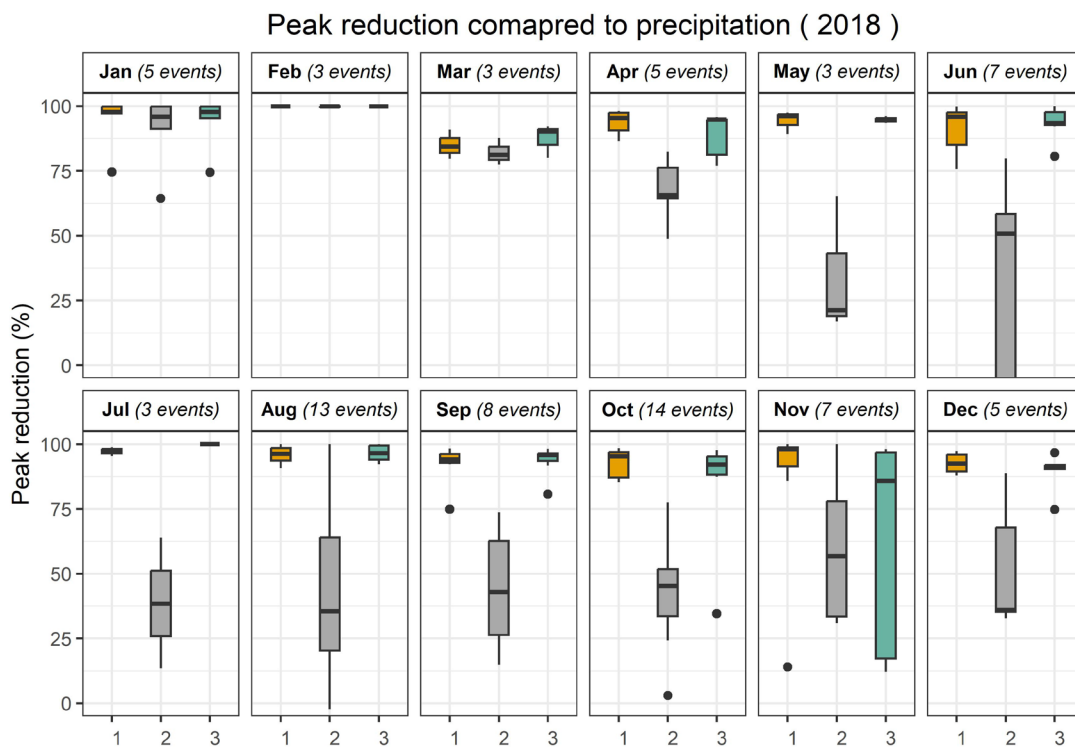


Figur 41 Akkumulert nedbør og avrenning pr måned i 2023. (Blå=nedbør, oransje=tak1, grå=tak2 (referansetak), turkis=tak3)

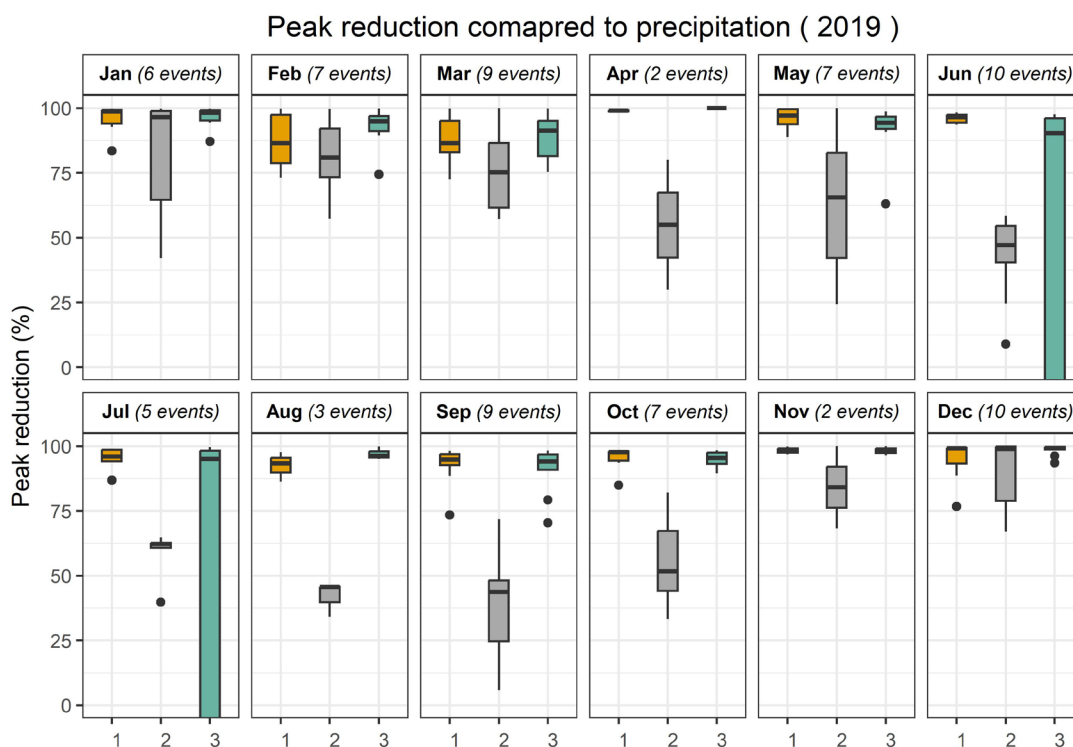
14.2 Oppsummering målt reduksjon av avrenningstopp



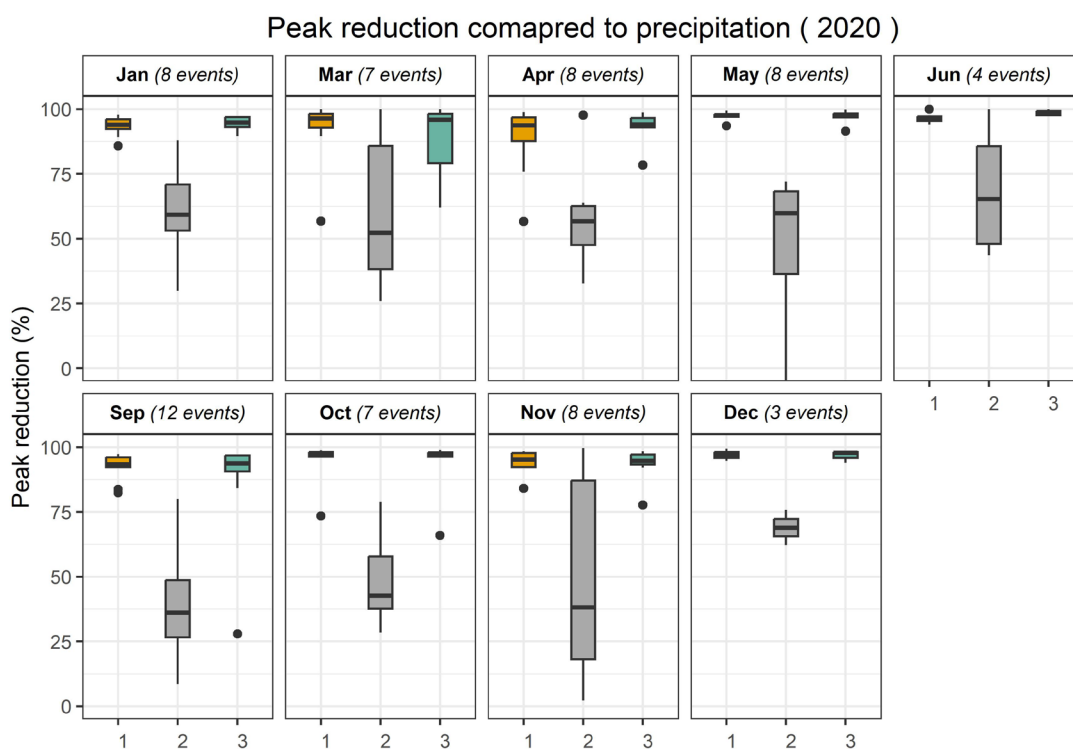
Figur 42 Variasjon i reduksjon av avrenningstopp målt mot nedbør pr måned 2017. Antall hendelser gitt i tittel for hvert subplott. (Blå=nedbør, oransje=tak1, grå=tak2 (referansetak), turkis=tak3)



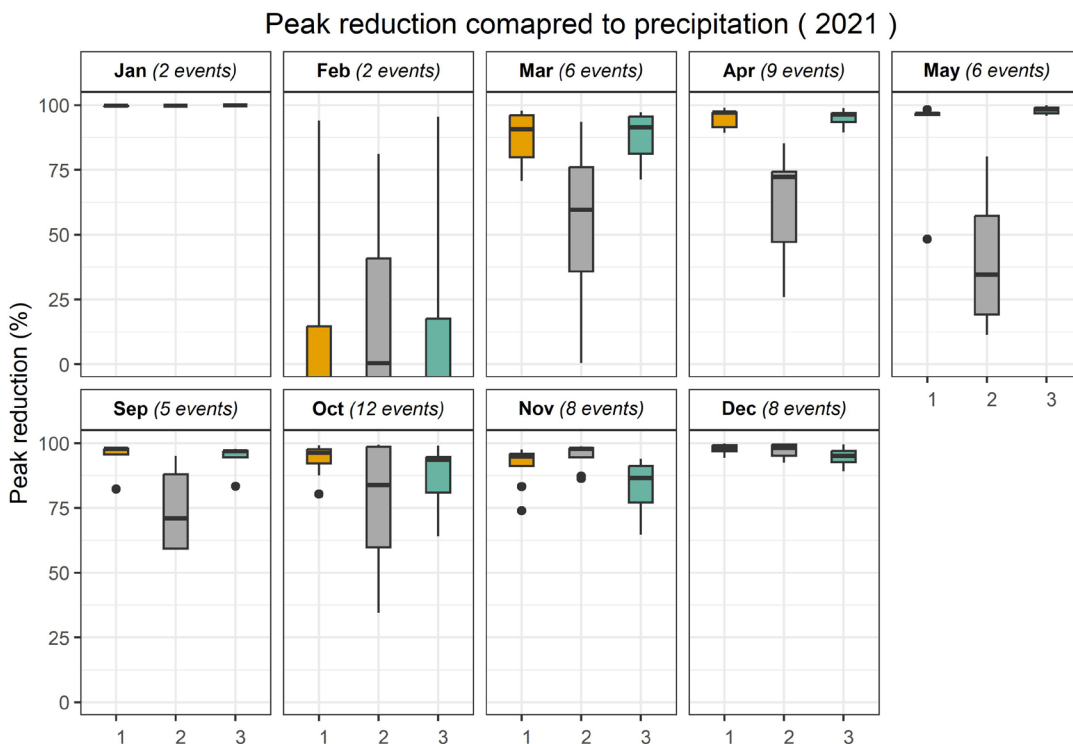
Figur 43 Variasjon i reduksjon av avrenningstopp målt mot nedbør pr måned 2018. Antall hendelser gitt i tittel for hvert subplott. (Blå=nedbør, oransje=tak1, grå=tak2 (referansetak), turkis=tak3)



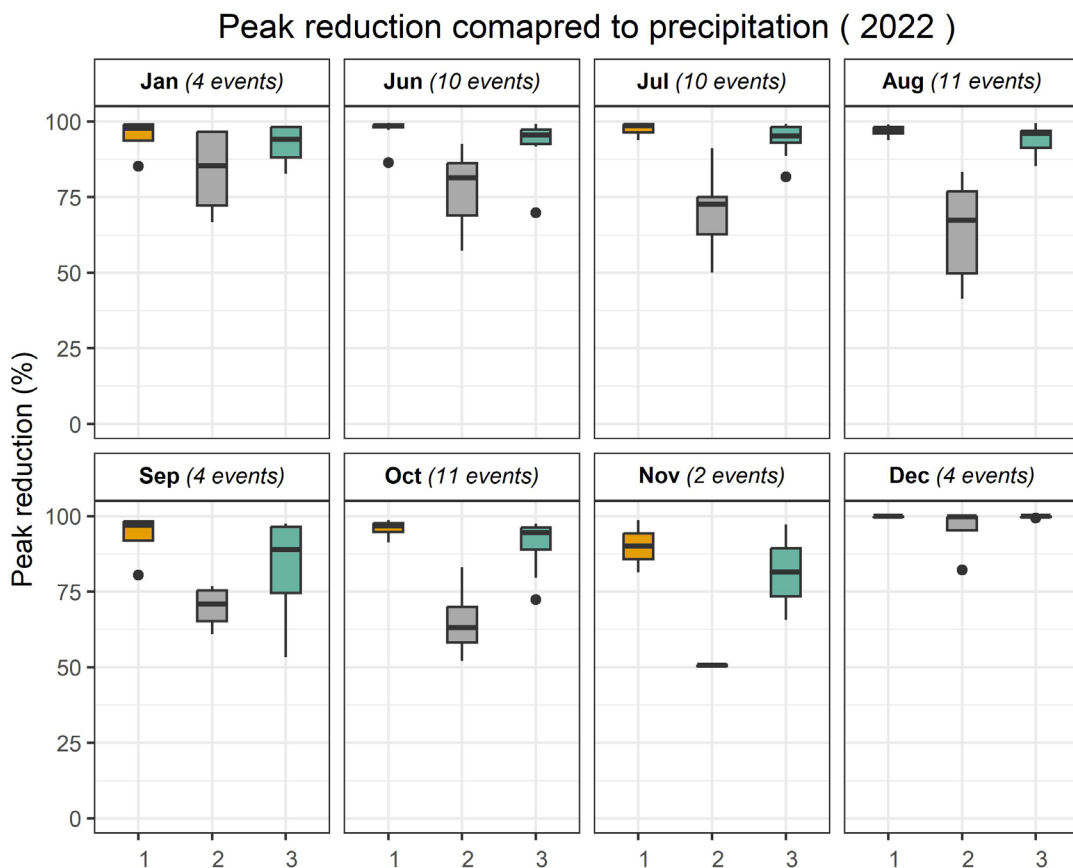
Figur 44 Variasjon i reduksjon av avrenningstopp målt mot nedbør pr måned 2019. Antall hendelser gitt i tittel for hvert subplott. (Blå=nedbør, oransje=tak1, grå=tak2 (referansetak), turkis=tak3)



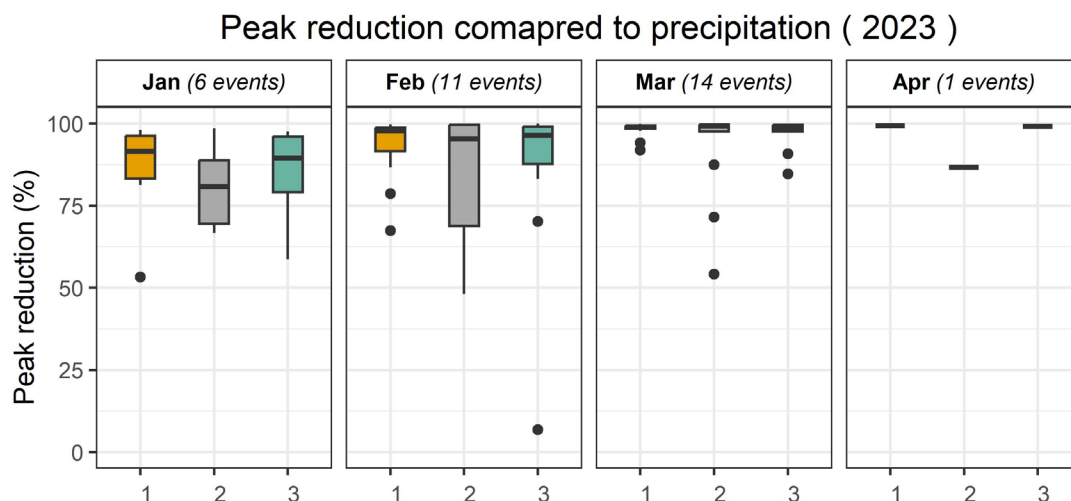
Figur 45 Variasjon i reduksjon av avrenningstopp målt mot nedbør pr måned 2020. Antall hendelser gitt i tittel for hvert subplott. (Blå=nedbør, oransje=tak1, grå=tak2 (referansetak), turkis=tak3)



Figur 46 Variasjon i reduksjon av avrenningstopp målt mot nedbør pr måned 2021. Antall hendelser gitt i tittel for hvert subplott. (Blå=nedbør, oransje=tak1, grå=tak2 (referansetak), turkis=tak3)

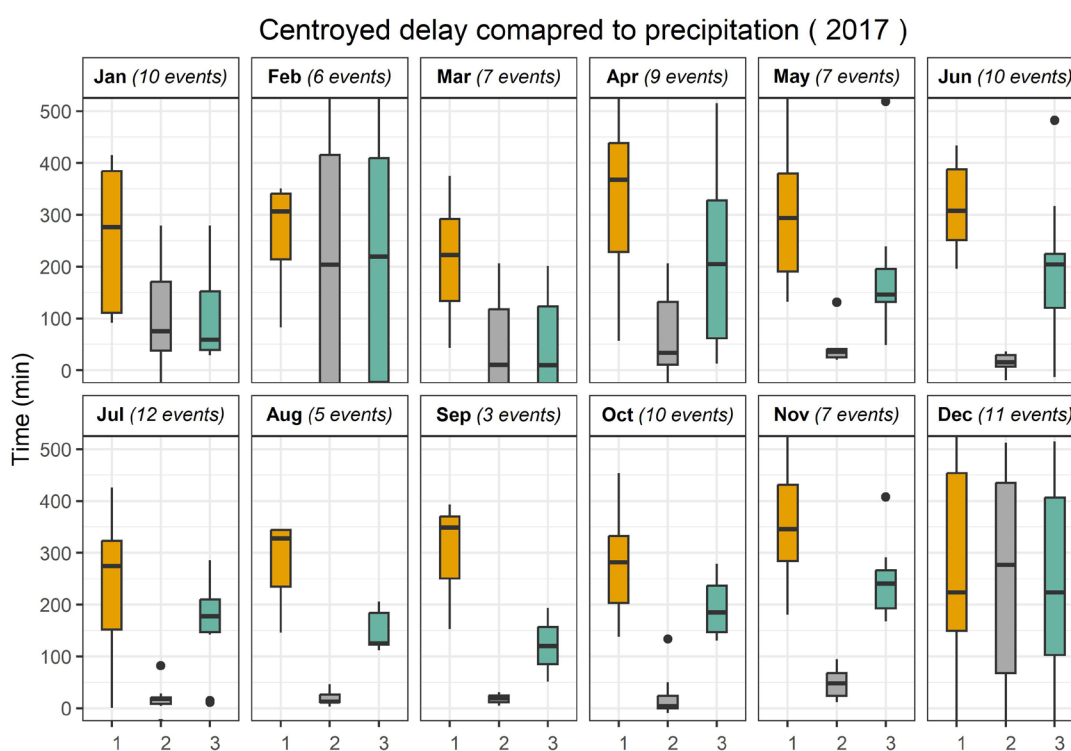


Figur 47 Variasjon i reduksjon av avrenningstopp målt mot nedbør pr måned 2022. Antall hendelser gitt i tittel for hvert subplott. (Blå=nedbør, oransje=tak1, grå=tak2 (referansetak), turkis=tak3)

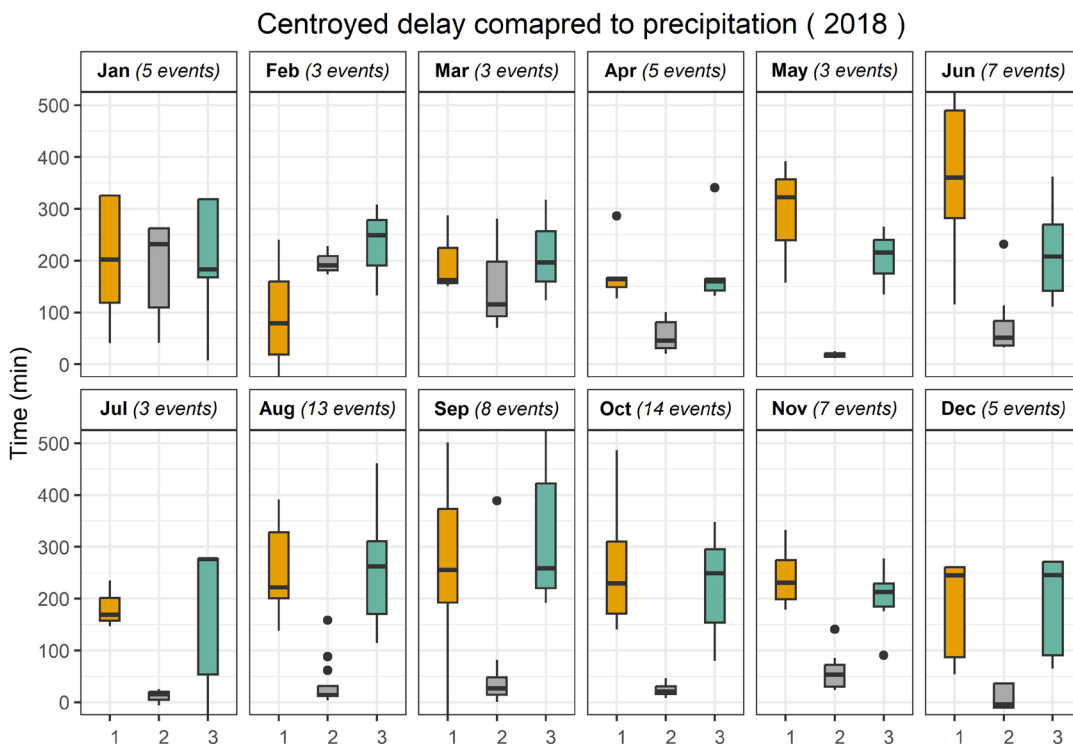


Figur 48 Variasjon i reduksjon av avrenningstopp målt mot nedbør pr måned 2023. Antall hendelser gitt i tittel for hvert subplott. (Blå=nedbør, oransje=tak1, grå=tak2 (referansetak), turkis=tak3)

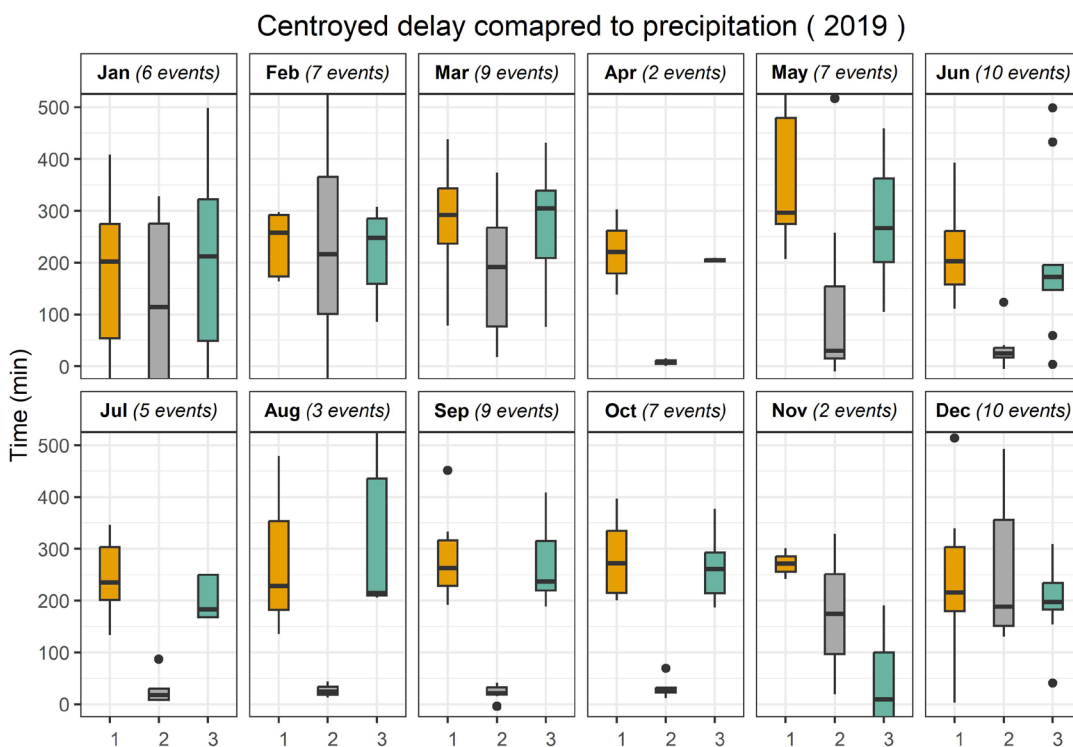
14.3 Oppsummering av målt fordrøyd centroidavrenning



Figur 49 Variasjon i fordrøyd centroidavrenning målt mot nedbør pr måned 2017. Antall hendelser gitt i tittel for hvert subplott. (Blå=nedbør, oransje=tak1, grå=tak2 (referansetak), turkis=tak3)

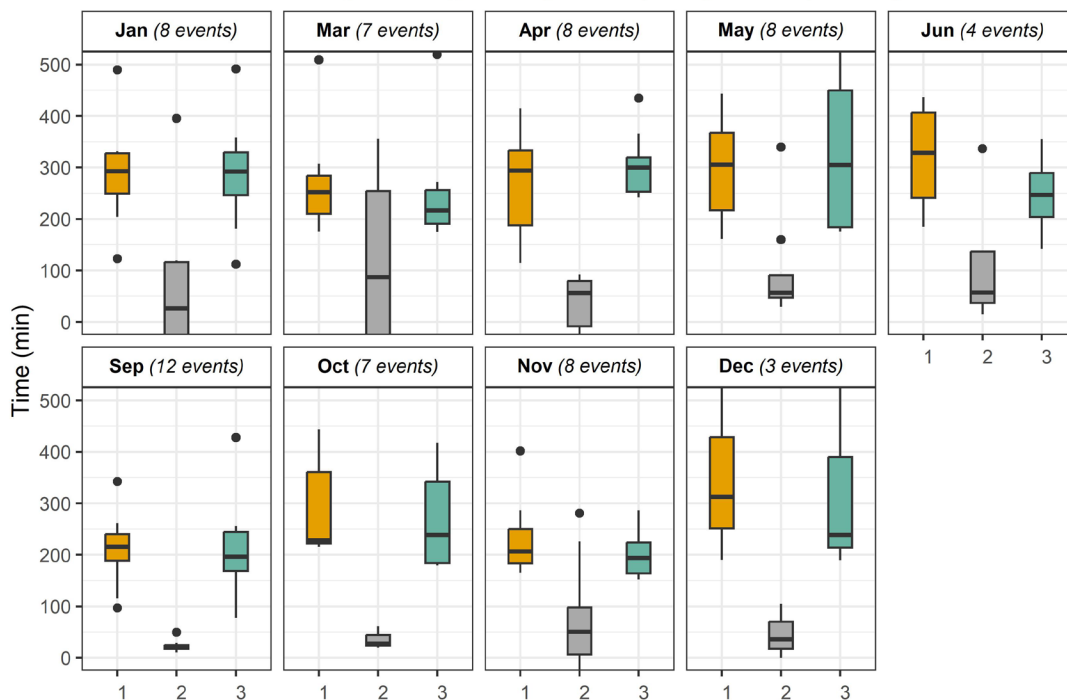


Figur 50 Variasjon i fordrøyd centroidavrenning målt mot nedbør pr måned 2018. Antall hendelser gitt i tittel for hvert subplott. (Blå=nedbør, oransje=tak1, grå=tak2 (referansetak), turkis=tak3)



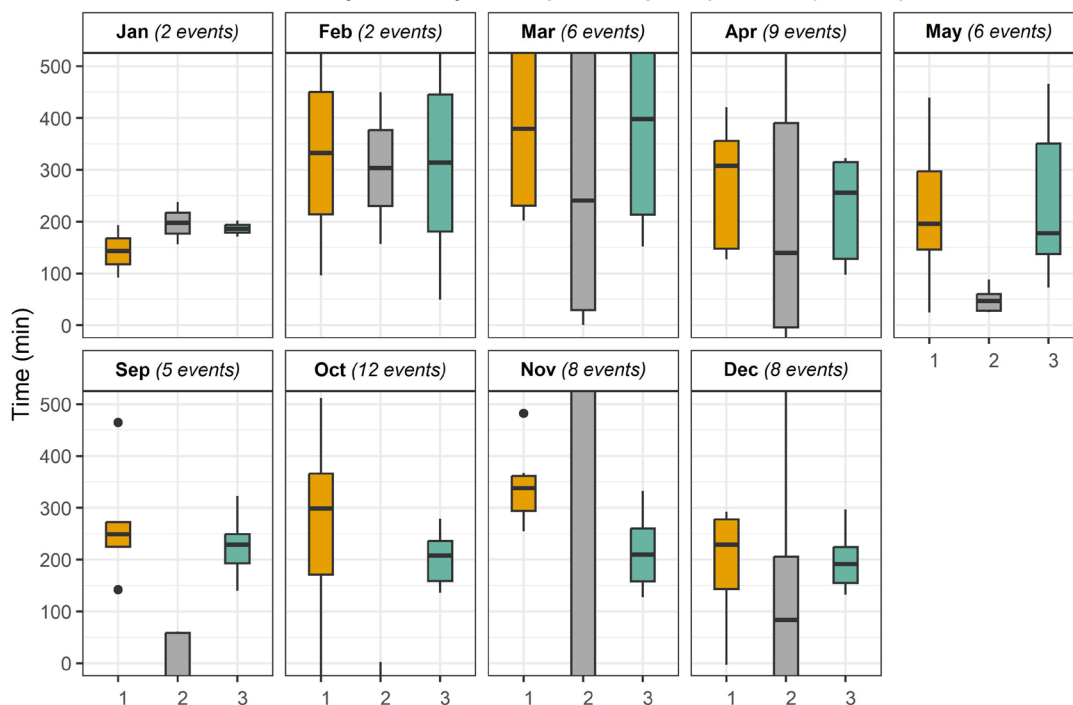
Figur 51 Variasjon i fordrøyd centroidavrenning målt mot nedbør pr måned 2019. Antall hendelser gitt i tittel for hvert subplott. (Blå=nedbør, oransje=tak1, grå=tak2 (referansetak), turkis=tak3)

Centroyed delay compared to precipitation (2020)



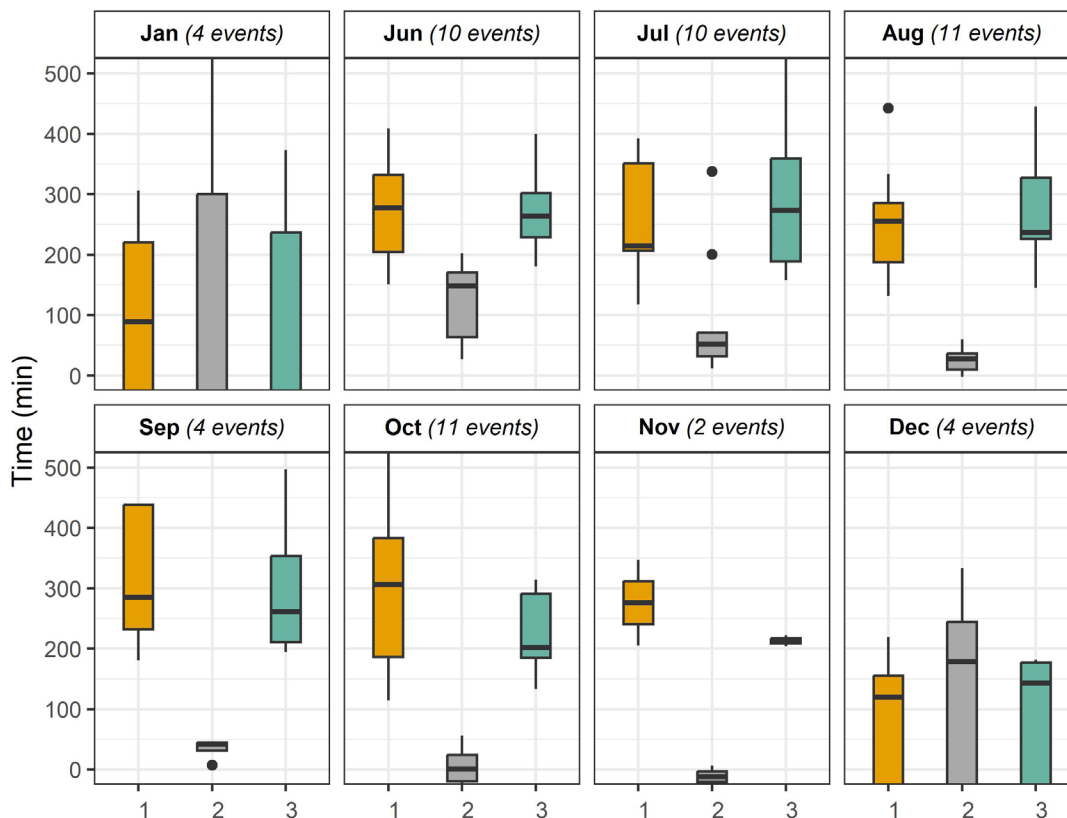
Figur 52 Variasjon i fordrøyd centroidavrenning målt mot nedbør pr måned 2020. Antall hendelser gitt i tittel for hvert subplott. (Blå=nedbør, oransje=tak1, grå=tak2 (referansetak), turkis=tak3)

Centroyed delay compared to precipitation (2021)



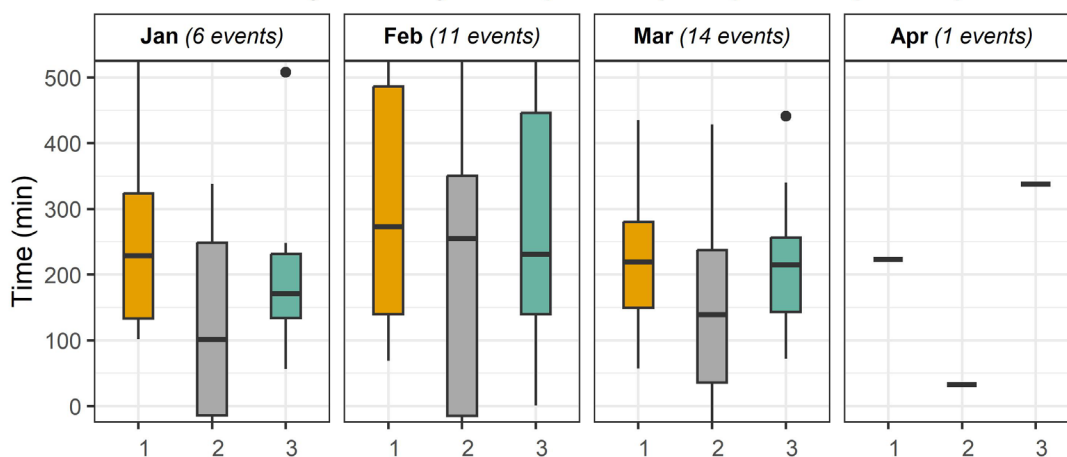
Figur 53 Variasjon i fordrøyd centroidavrenning målt mot nedbør pr måned 2021. Antall hendelser gitt i tittel for hvert subplott. (Blå=nedbør, oransje=tak1, grå=tak2 (referansetak), turkis=tak3)

Centroyed delay compared to precipitation (2022)



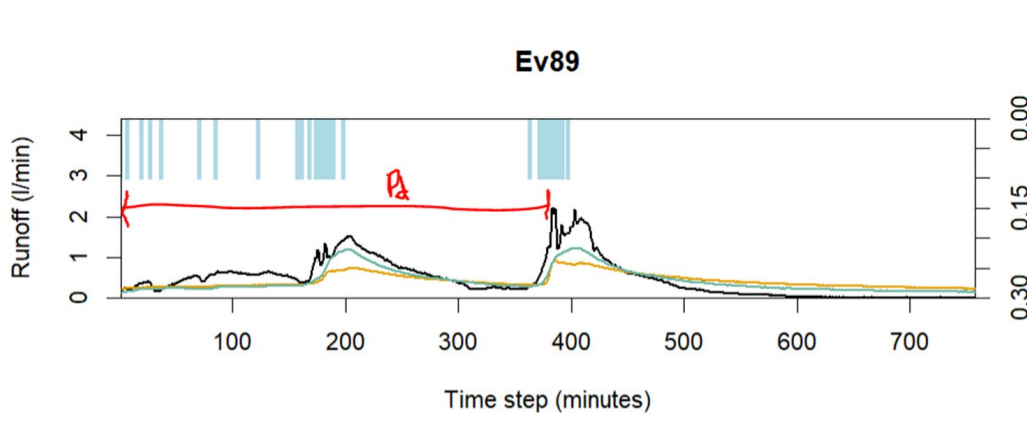
Figur 54 Variasjon i fordrøyd centroidavrenning målt mot nedbør pr måned 2022. Antall hendelser gitt i tittel for hvert subplott. (Blå=nedbør, oransje=tak1, grå=tak2 (referansetak), turkis=tak3)

Centroyed delay compared to precipitation (2023)



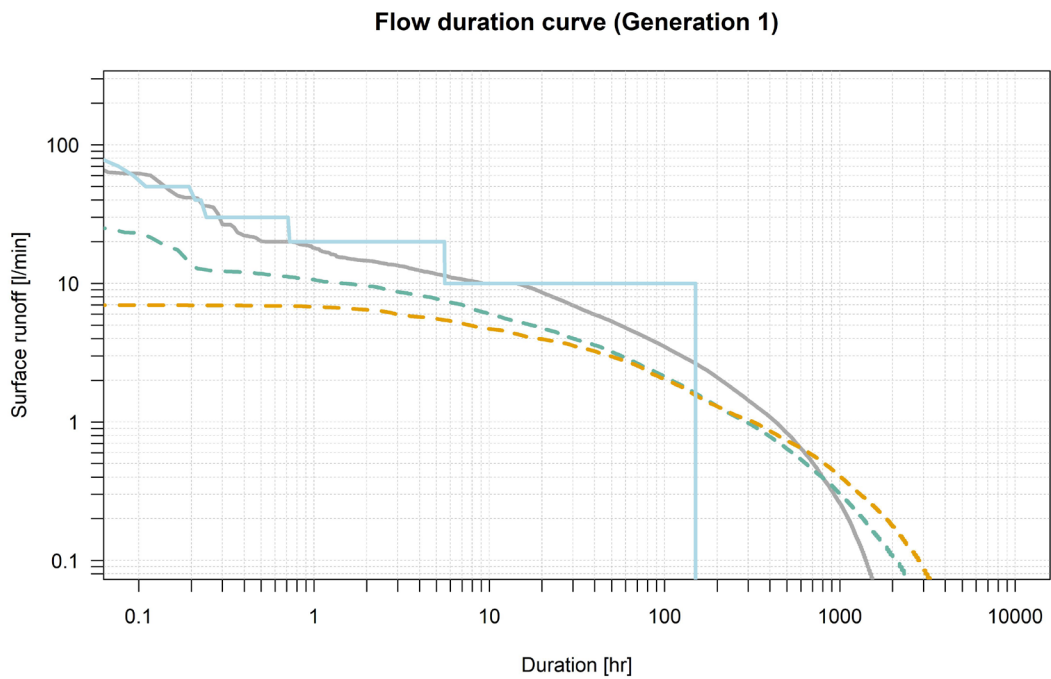
Figur 55 Variasjon i fordrøyd centroidavrenning målt mot nedbør pr måned 2023. Antall hendelser gitt i tittel for hvert subplott. (Blå=nedbør, oransje=tak1, grå=tak2 (referansetak), turkis=tak3)

14.4 Oppsummering målt fordrøyd avrenningstopp



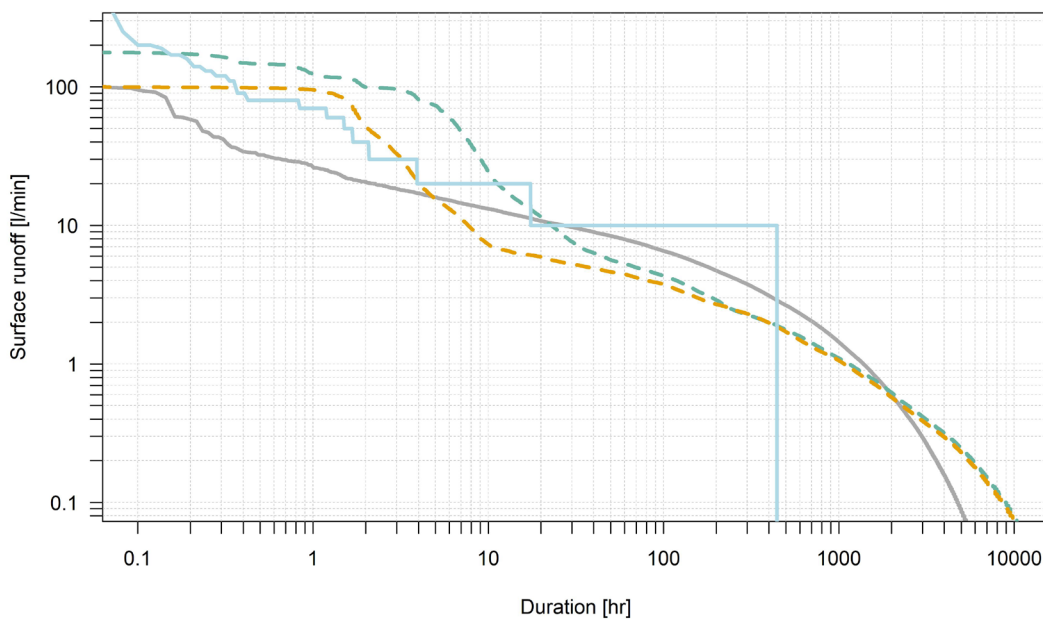
Figur 56 Eksempel beregning fordrøyd avrenningstopp

14.5 Oppsummering beregnede varighetskurver



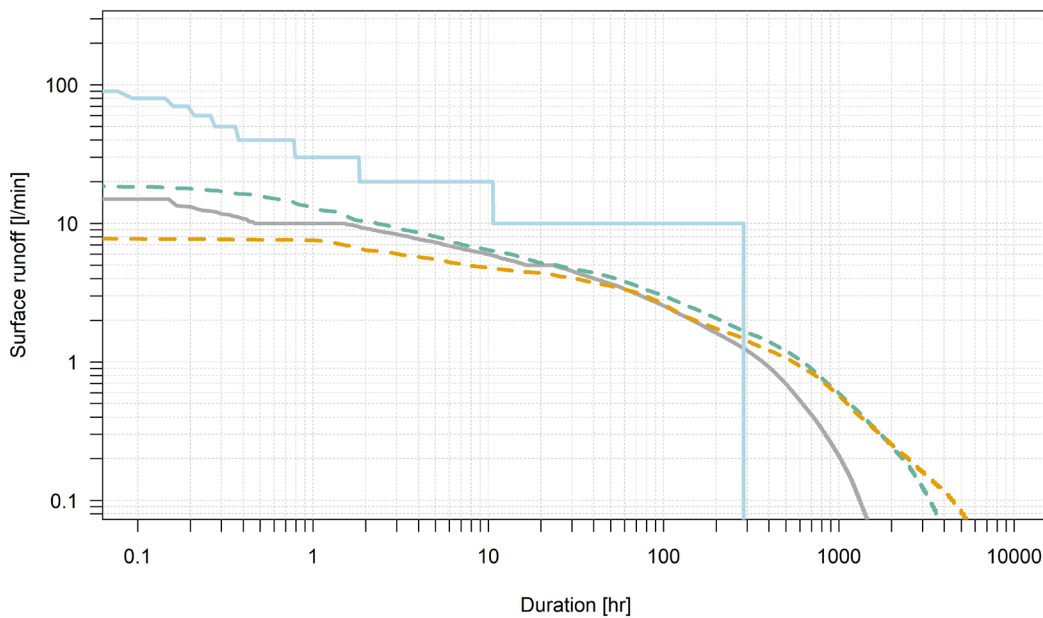
Figur 57 Varighetskurver for generasjon 1. (Blå=nedbør, oransje=tak1, grå=tak2 (referansetak), turkis=tak3)

Flow duration curve (Generation 2)

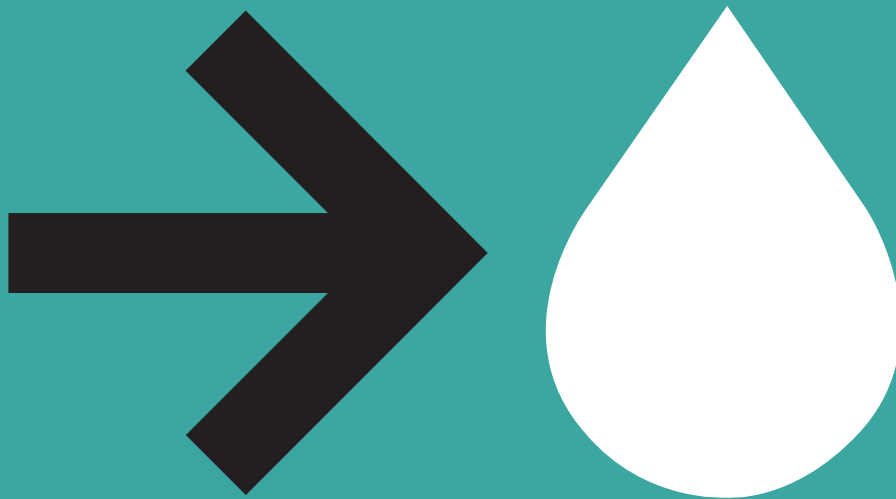


Figur 58 Varighetskurver for generasjon 2. (Blå=nedbør, oransje=tak1, grå=tak2 (referansetak), turkis=tak3)

Flow duration curve (Generation 3)



Figur 59 Varighetskurver for generasjon 3. (Blå=nedbør, oransje=tak1, grå=tak2 (referansetak), turkis=tak3)



CONSORTIUM

Private sector

SKANSKA

MESTERHUS

Multiconsult

Finans Norge

SKJÆVELAND
GRUPPEN

NORGESHUS

Leca

isola

Public sector



Statens vegvesen



Noregs
vassdrags- og
energidirektorat

AVINOR



Jernbane-
direktoratet



STATSBYGG



TRONDHEIM KOMMUNE

Research & education

SINTEF

BI

NTNU

Meteorologisk
institutt

NGI