

Bedre forståelse av den hydrologiske ytelsen til blågrønne tak under vinterforhold

Av Noëlie Maurin, Elhadi H. M. Abdalla,
Tone Merete Muthanna, Edvard Sivertsen

Noëlie Maurin (M.Sc.) er master of science ved SINTEF Community.
Elhadi Mohsen Hassan Abdalla (Ph.D) er forsker ved SINTEF Community.
Tone M. Muthanna (Ph.D) er professor ved NTNU.
Edvard Sivertsen (Dr. ing.) er seniorforsker ved SINTEF Community.

Summary

Understanding the hydrological performance of green and grey roofs during winter in cold climate regions. In this study, we have studied the hydrological performance of blue-green roofs under winter conditions. We have used data from the Høvringen test field outside Trondheim, which was established and operated by Klima 2050 in the period 2017-2023. We used the snow routine in the HBV model to model snow accumulation and snowmelt and combined it with reservoir routing models to model runoff from the various roof configurations. The combined conceptual hydrological model simulated the dynamics of snow accumulation and melting of blue-green roofs satisfactorily so that the model was used to identify and separate the different events that occur in winter (snowmelt, precipitation only, rain-on-snow). The results showed that rain-on-snow events have a longer duration compared to other events, including precipitation events in summer. Consequently, rain-on-snow events provide a higher amount of runoff to roofs compared to summer precipitation events, even though summer events have a higher intensity. Furthermore, the results showed that the reduction in peak runoff is lower in winter compared to summer events but compared to peak runoff

from a regular black roof, it is also significant in winter.

Sammendrag

I denne studien har vi studert den hydrologiske ytelsen til blågrønne tak under vinterforhold. Vi har benyttet data fra Høvringen testfelt utenfor Trondheim som ble etablert og driftet av Klima 2050 i perioden 2017-2023. Vi brukte snørutinen i HBV-modellen til å modellere snøakkumulering og snøsmelting og kombinerte denne med reservoarrutingsmodeller for å modellere avrenning fra de ulike takkonfigurasjonene. Den kombinerte hydrologiske modellen simulerte dynamikken til snøakkumulering og smelting av blågrønne tak tilfredsstillende slik at modellen ble brukt til å identifisere og skille forskjellige hendelsene som opptrer om vinteren (snøsmelting, kun nedbør, regn-på-snø). Resultatene viste at regn-på-snøhendelser har lengre varighet sammenlignet med andre hendelser, inkludert nedbørshendelser om sommeren. Følgelig gir regn-på-snøhendelser en høyere mengde avrenning fra snølaget til takene sammenlignet med rene nedbørshendelser om sommeren, til tross for at sommerhendelser har høyere intensitet. Videre viste resultatene at

reduksjon i spissavrenning er lavere om vinteren sammenlignet med sommerhendelser, men sammenlignet med spissavrenning fra vanlig svart tak om er den betydelig også om vinteren.

Innledning

Blågrønne tak, det vil si ekstensive grønne tak som har ekstra underlag for å øke forbruket og forlenge forsinkelsen av overvann, kan gi et viktig bidrag til overvannshåndteringen i urbane områder. Forskningscenteret Klima 2050 etablerte tre fullskala blågrønne tak på Høvringen utenfor Trondheim som utgangspunkt for forskning på den hydrologiske ytelsen av slike tak. Vi presenterte kort hovedfunnene i en artikkel i Vann (Sivertsen mfl. 2023), der resultatene utelukkende fokuserte på ytelsen i snø- og frostfrie perioder. I etterkant av at forsøksanlegget på Høvringen ble avsluttet, har vi analysert dataene fra snø- og frostperioder.

Det finnes kun et begrenset omfang av studier som har undersøkt den hydrologiske ytelsen til blågrønne tak under vinterforhold. Nylig presenterte Braskerud og Paus (2023) en oppsummering av vinterfunksjonen til ekstensive grønne tak. Basert på observasjoner gjennom 11 år er hovedkonklusjonene at ekstensive grønne tak reduserer volumavrenningen i snødekte perioder med mellom 16-31% og at de 1% høyeste avrenningsintensitetene under forhold med snødekke er høyere enn de 1% høyeste avrenningsintensitetene under sommerforhold. Med andre ord har ekstensive grønne tak en betydelig retensjon for fordøyningseffekt selv under vinterforhold.

Forbedret forståelse av vinterytelsen til blågrønne tak er viktig for å kunne utvikle nøyaktige hydrologiske modeller for vinterforhold. Tilstrekkelig nøyaktig hydrologiske modeller som predikerer avrenning under snø- og frostperioder er viktig av flere grunner. Det er kjent at det i regioner med kaldt klima er regn-på-snø hendelser som gir utfordrende forhold for overvannshåndteringen i urbane områder og det å kunne forutsi avrenningen fra blågrønne tak og i hvilken grad denne løsningen opprettholder sin overvannsfunksjon vil være viktig. Nøy-

aktige modeller av ytelsen til blågrønne tak vil også bidra til bedre planlegging og dimensjonering av overvannshåndteringen for et område. Videre vil hydrologiske modeller som gjengir avrenningen under vinterforhold være spesielt viktig for Norge, der fremtidige værscenarier forutser økt nedbør, endret nedbørmønster og hyppigere fryse-tine sykluser som følge av klimaendringen.

Denne artikkelen oppsummerer noen hovedresultater fra en nylig publisert vitenskapelig artikkel (Maurin mfl. 2024). Studien bygger på 8 års med drift av blågrønne tak på Høvringen med fokus på å forstå bedre den hydrologiske ytelsen til blågrønne tak under vinterforhold. Vår hypotese er at avrenning fra selve snølaget på taket er uavhengig av om taket er et vanlig svart tak eller blågrønt tak og kun avhengig av lufttemperaturen og snølagets tilstand (fraksjon av fast stoff / væske).

Studien hadde følgende spesifikke mål:

- Etablere og vurdere egnethet til en kombinert hydrologisk modell for å simulere snøakkumulering og -smelting og avrenning fra tak under vinterforhold.
- Utvikle en metode for å kategorisere ulike typer vinterhendelser (regn, regn-på-snø, snøsmelting).
- For vinterforhold, sammenligne den hydrologiske ytelsen til blågrønne tak med vanlig svart tak.

Materialer og metode

Datafangst

Studien baserer seg på data samlet inn ved Høvringen testfelt utenfor Trondheim i perioden 2017-2023. Høvringen testfelt består av tre separate testfelt der felt 2 i hele perioden har vært et vanlig kompakt tak med svart asfalt tekking som er benyttet som referanse. Løsningene i felt 1 og 3 har variert og det er testet totalt seks ulike blågrønne takløsninger, se Sivertsen mfl. (2023) for nærmere beskrivelse av de ulike takkonfigurasjonene.

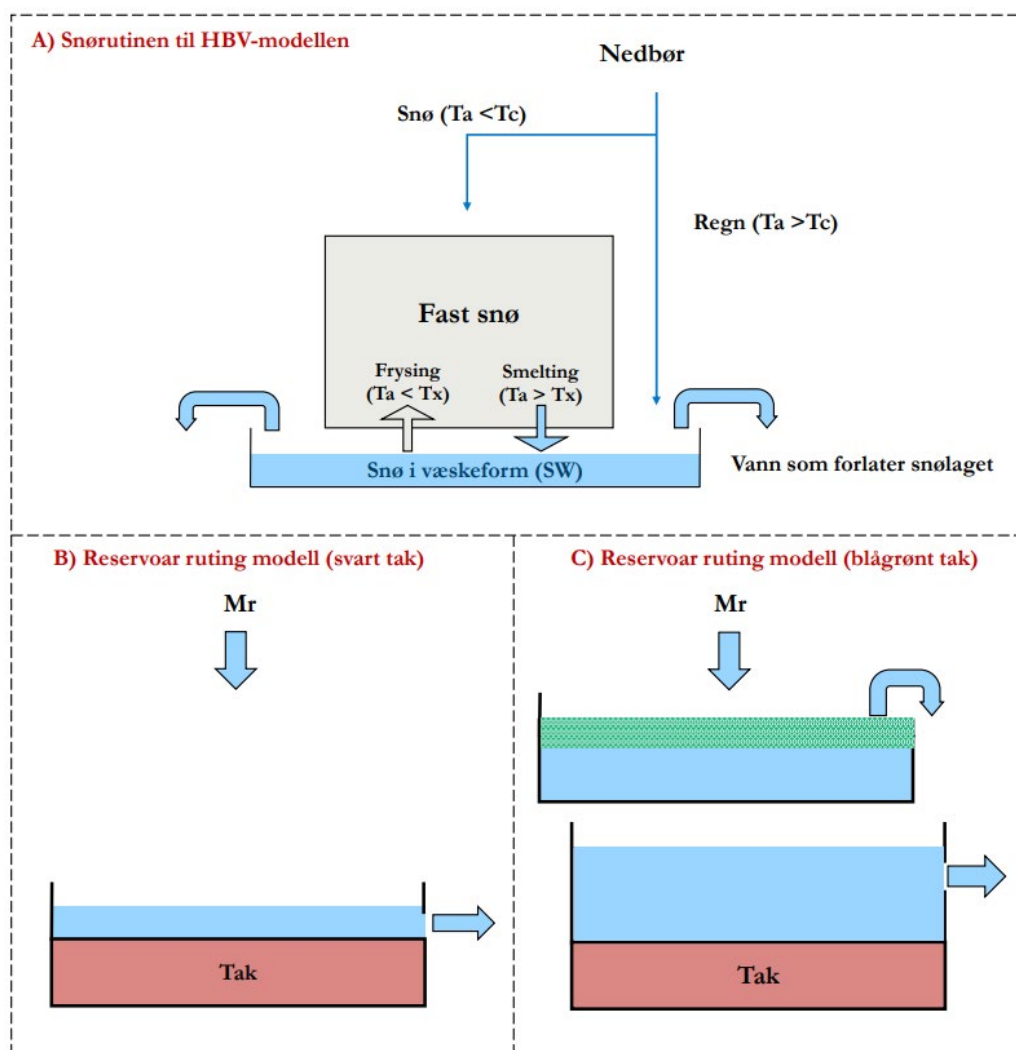
Meteorologiske data (nedbør, lufttemperatur, vindhastighet og -retning og luftfuktighet) ble samlet inn med et minutts tidsoppløsning.

Avrenning fra hvert av testfeltene og overflate-temperatur (temperatur mellom takmembran og geotekstil) ble også samlet inn med et minuttstidsoppløsning. I tillegg ble det tatt bilder av hvert av de tre takene hver time. For mer informasjon om datainnsamling, se Maurin mfl. (2024).

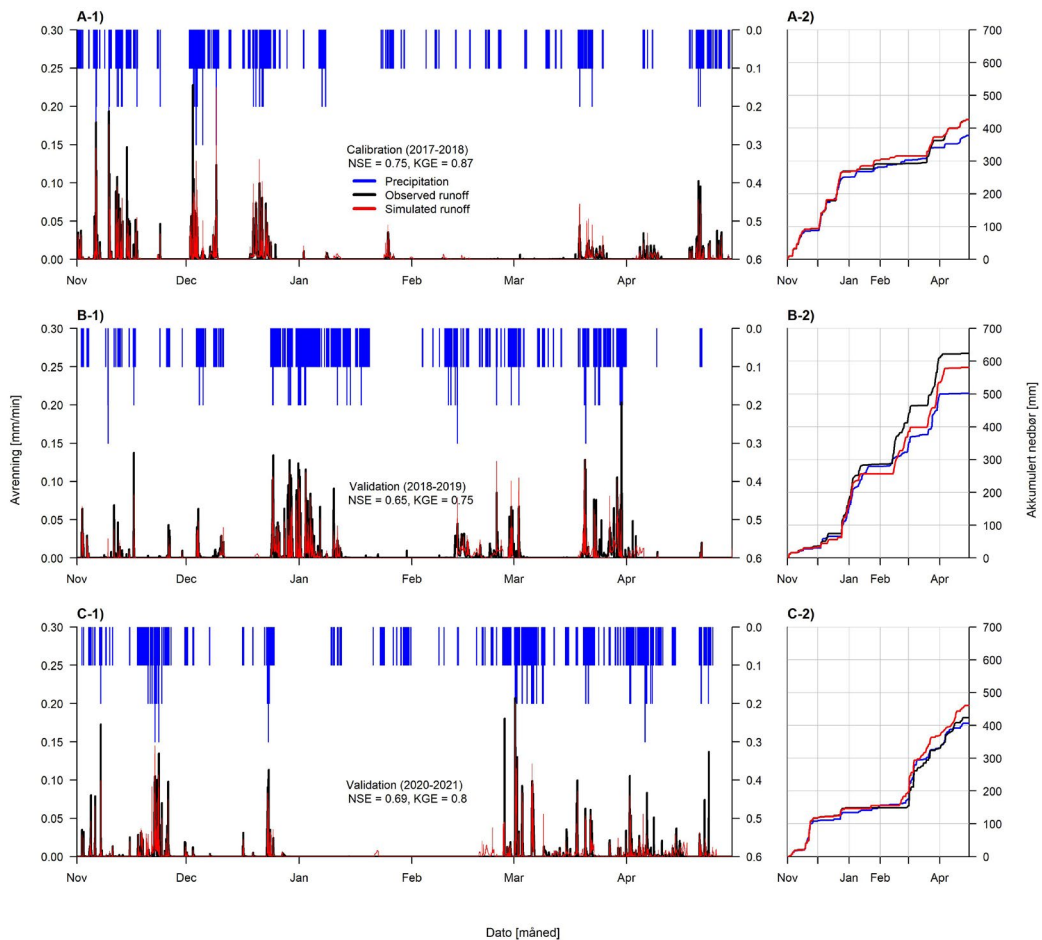
Kombinert hydrologisk modell for snøakkumulering og -smelting og avrenning fra tak

Figur 1 illustrer sammenhengen til den kombinerte hydrologiske modellen som er utviklet i studien. Modellen benytter snørutinen til Hydro-

logiska Byrans avdeling for Vattenbalans (HBV)-modellen for å modellere snøakkumulering og snøsmelting på taket. Basert på utetemperatur så vil nedbør enten komme som regn eller snø og det foregår en kontinuerlig smelte/fryseprosess i snølaget. I snølaget er forholdet mellom snø og vann en viktig faktor for å beskrive tilstanden til snølaget, som også vil påvirke snølagets kapasitet til å holde på vann før det gir avrenning. På et gitt tidspunkt er forholdene slik at snølaget gir avrenning til taket, der denne størrelsen angis som M_r (Figur 1 A).



Figur 1. Illustrasjon av den kombinerte hydrologiske modellen for snøakkumulering og -smelting (A) og avrenning fra vanlig svart tak (B) og blågrønne tak (C).



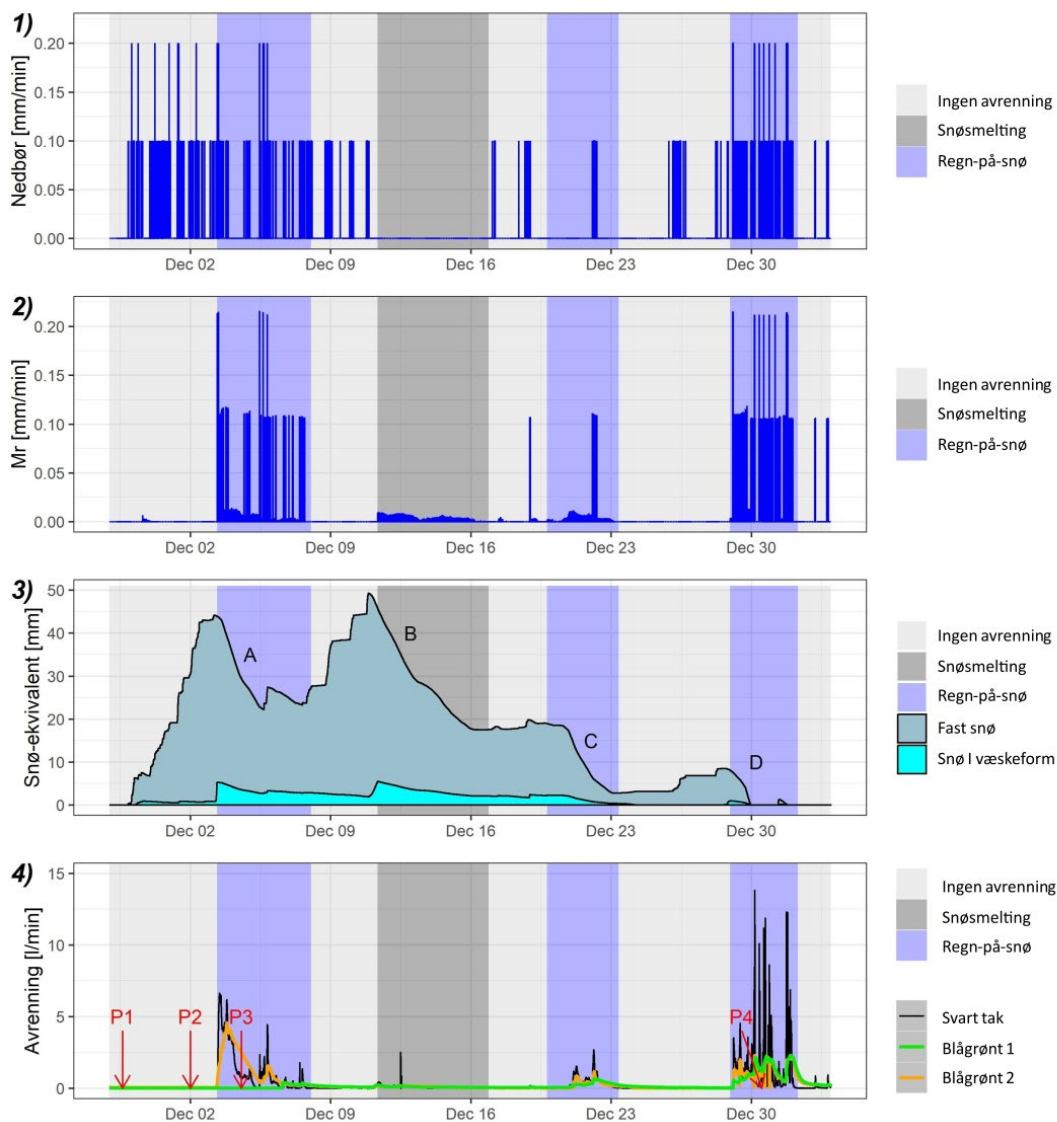
Figur 2. Eksempel på kalibrerte og validerte resultater av den kombinerte hydrologiske modellen. A-1 viser resultater for kalibreringsperioden, mens B-1 og C-1 viser resultater fra to uavhengige valideringsperioder. A-2, B-2 og C-2 viser tilhørende akkumulerte verdier for nedbør, observert og simulert avrenning.

Når snølaget gir avrenning til et tak modelleres avrenningen fra taket (Q), med reservoarutingsmodeller med varierende grad av kompleksitet avhengig av takkonfigurasjonen. Modellen for et svart tak (Figur 1 B) har kun en enkel midlertidig vannlagringskapasitet som forsinker avrenningen, mens for de ulike blågrønne takene er det benyttet to tanker i serie som representerer henholdsvis substrat og dreneringslag (Figur 1 C). For detaljer henvises den interesserte leser til Maurin mfl. (2024), her er alle ligninger, parametere og kalibrerings- og valideringsperioder presentert.

Metode for å karakterisere vinterhendelser

For å skille ulike vinterhendelser utviklet vi en metodikk ved bruk av temperatur og tid for å dele en nedbørstidsserie om vinteren i separate hendelser. Det er naturlig å dele vinterhendelsene inn i tre typer hendelser som følger:

- Regnhendelse: summen av Mr er lik summen av nedbør.
- Snøsmeltehendelse: summen av Mr er større enn 0, mens summen av nedbør er 0.
- Regn-på-snø hendelse: summen av $Mr >$ summen av nedbør > 0 , det vil si det regner og snøen smelter samtidig.

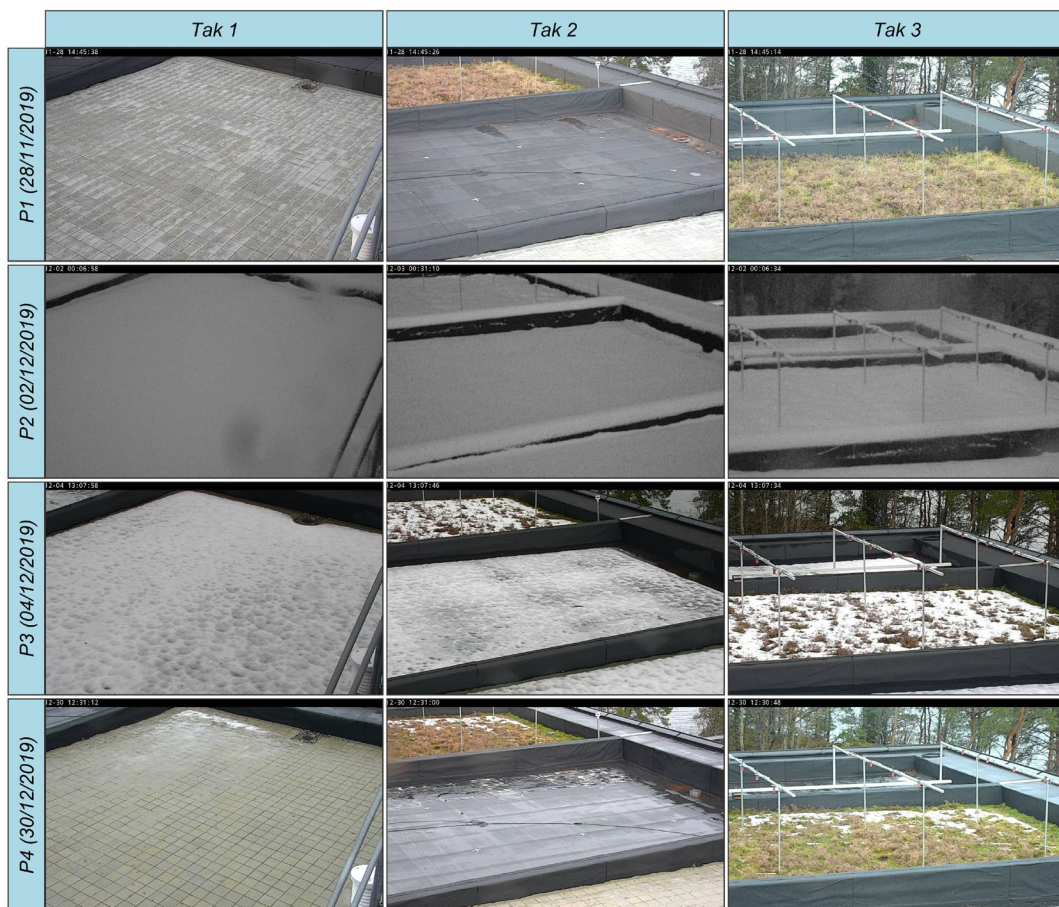


Figur 3. Målinger og modellerte resultater for en snødekt periode mellom november – desember 2019. 1) Nedbør, 2) smeltet vann som forlater snølaget til taket (Mr), 3) snøekvivalent, 4) avrenning fra taket. Nedbørs- og avrenningsdata er målte verdier, mens snørutinen i HBV-modellen estimerer vanninnhold i snøen og avrenning fra snølaget (Mr). Se teksten for forklaring på A-D og P1-P4.

For å skille to vinterhendelser fra hverandre krevde vi at vann som forlater snølaget (Mr) er 0 over en periode på 6 timer som tilsvarende 6 timer nedbørsopphold for å skille to regnhendelser under sommerforhold. Vinter- og sommerhendelser med mengde mindre enn 2 mm er utelatt fra analysen.

Indikatorer for hydrologisk ytelse

Redusert spissavrenning (det vil si den maksimale avrenningen fra taket for en gitt hendelse) og retensjon er benyttet som indikatorer for den hydrologiske ytelsen for å sammenligne ytelsen mellom vintermånedene og sommermånedene. Vintermånedene er i denne studien definert som måneder som har registrert snøsmelte- og regn-



Figur 4. Bilder av de tre testfeltene under ved ulike tidspunkt under en vinterhendelse. Se teksten for nærmere forklaring.

på-snø hendelser, mens sommermåned er tilsvarende definert som måneder uten slike hendelser.

Resultater og diskusjon

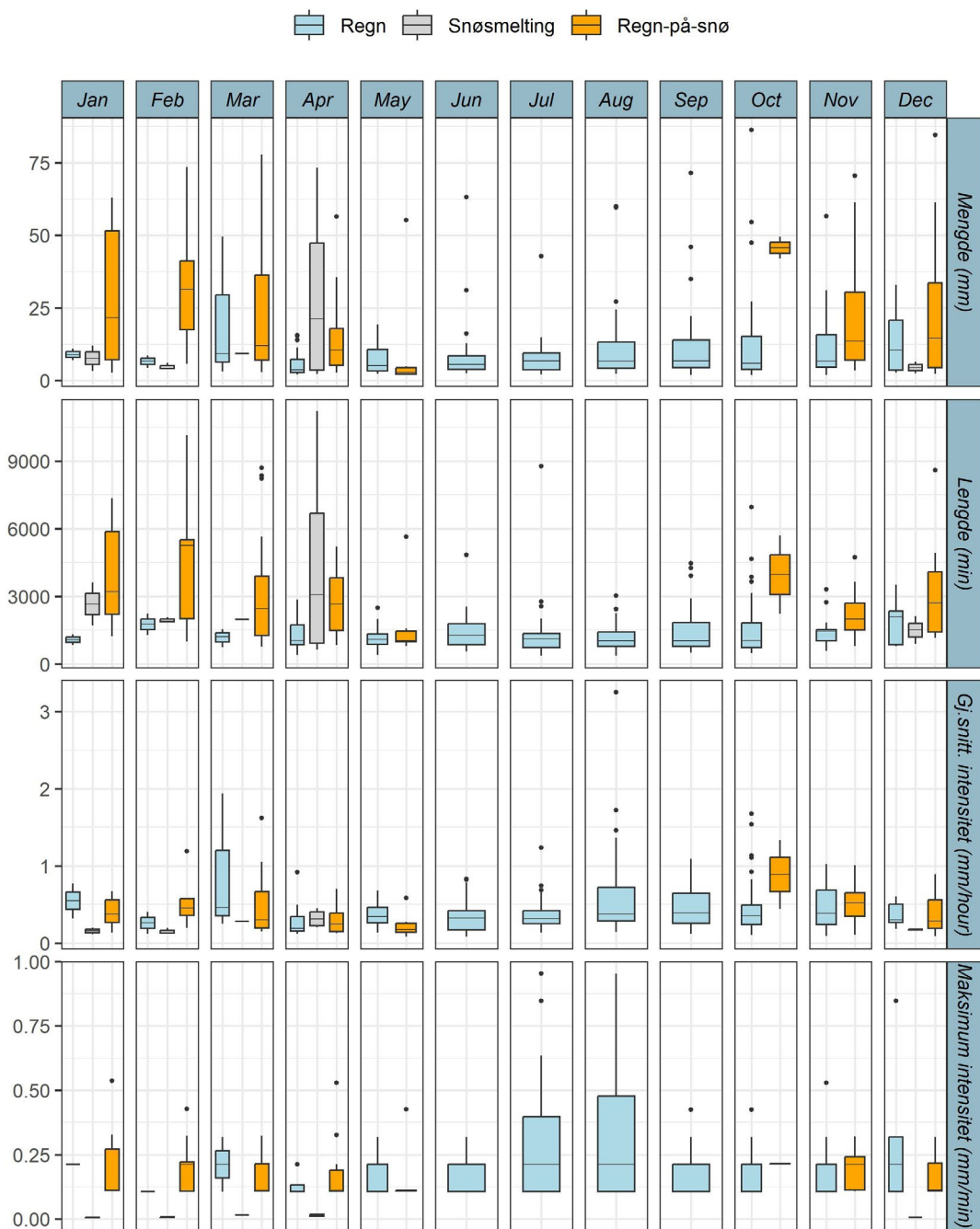
Kalibrering og validering av den kombinert hydrologiske modellen

Figur 2 viser et eksempel på kalibrering og validering av den kombinerte hydrologiske modellen inkludert snøakkumulering og -smelting for en av takkonfigurasjonene. I figuren viser A-1 observert og kalibrert avrenning for kalibreringsperioden, mens B-1 og C-1 viser observert og modellert avrenning for to uavhengige valideringsperioder. A-2, B-2 og C-2 viser tilhørende akkumulerte verdier for nedbør, observert og simulert avrenning. Modellen for det svarte

taket oppnådde en Kling-Gupta effektivitet (KGE) på 0.87 på kalibreringen og en KGE større enn 0.75 på validering noe som tilsier en god modell. For de blågrønne takene varierte den kalibrerte KGE-verdien for modellene mellom 0.77 og 0.89, mens validerte verdien varierte mellom 0.64 og 0.92. Konklusjonen er at nøyaktigheten til den kombinerte modellen er tilfredsstillende med tanke på å modellere avrenning fra blågrønne tak under vinterforhold.

Vinterhendelser

Den kalibrerte snørutinen i HBV-modellen ble brukt til å karakterisere en snødekt periode som fant sted mellom november og desember 2019. Figur 3 viser resultater for denne perioden der graf 1 viser målt nedbør, graf 2 viser modellert



Figur 5. Egenskapene til regnhendelser, snøsmeltehendelser og regn-på-snøhendelser som funksjon av måned. Data fra Høringen, Trondheim i tidsrommet 2017-2023.

mengde vann som forlater snølaget til taket (Mr), graf 3 viser snøekvivalent og graf 4 viser målt avrenning fra takutløpet. Ved å benytte definisjonen av ulike hendelser er det identifisert

tre regn-på-snø-hendelser (A, C, D) og én smeltehendelse (B) som er markert med vertikale fargebånd i figuren. Figur 4 viser bilder av de tre takene på de fire tidspunktene som er

markert i Figur 3 (P1-P4). Tilsvarende analyser ble utført på alle dataene fra Høvringen som er samlet inn i tidsrommet 2017-2023 for å identifisere ulike hendelser.

Den hydrologiske ytelsen til blågrønne tak under vinterforhold

Basert på definisjonen av hendelser gitt i kapittel «Materialer og Metoder» og de validerte kombinerte hydrologiske modellene er dataene fra Høvringen testfelt analysert og ulike typer hendelser er identifisert. Figur 5 viser statistikk over mengde, varighet, gjennomsnittlig intensitet og maksimum intensitet for ulike typer hendelser som er identifisert, der hendelsene er sortert etter måned. I juni til september er det bare registrert regnhendelser og disse månedene er derfor kategorisert som sommer måneder. Mai, oktober og november har i tillegg til regnhendelser også regn-på-snø hendelser, mens de øvrige månedene har alle tre typer hendelser. Disse månedene er derfor i denne studien definert som vinter måneder. En viktig observasjon fra Figur 5 er at regn-på-snø hendelser har lenger varighet sammenlignet med andre typer hendelser, noe som gir større avrenning fra snølaget til taket. Dette også sammenlignet med sommerhendelser, selv om sommerhendelser har høyere gjennomsnittlig og maksimum intensiteter.

Figur 6 viser statistikk over retensjon per hendelse og reduksjon i spissavrenning for ulike blågrønne takkonfigurasjoner som funksjon av type hendelse og vinter-/sommert måneder. Fra denne figuren ser vi at det er stor variasjon i retensjon per hendelse for regnhendelser og regn-på-snøhendelser, men at regnhendelser har noe større retensjon på sommer måneder sammenlignet med vinter måneder. Snøsmeltehendelser har mindre variasjon og større retensjon noe som kan forklares med at dette er hendelser med lite mengde og kort varighet (med unntak av april). Regn-på-snøhendelser har minst retensjon av alle typer hendelser.

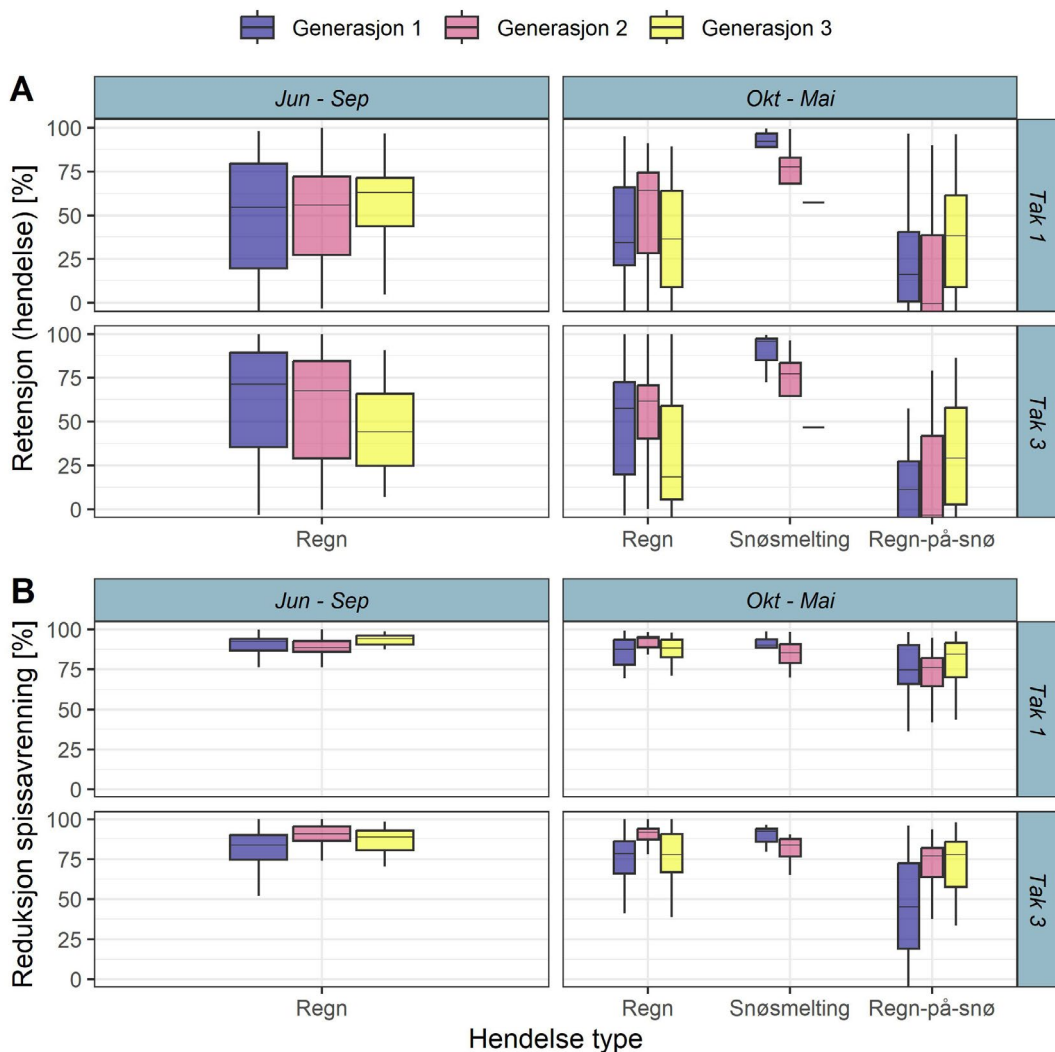
Videre viser Figur 6 at reduksjonen i spissavrenning er høy for alle takkonfigurasjonene i sommer månedene med verdier godt over 80%,

noe som er sammenlignbart med øvrig litteratur. Det er noe variasjon i dataene, men dette kan forklares med forskjeller i de ulike takkonfigurasjonene. Videre kan vi observere at reduksjonen i spissavrenning for regnhendelser og snøsmeltehendelser i vinter månedene er sammenlignbar med reduksjonen i spissavrenning observert i sommer månedene, mens regn-på-snøhendelser har vesentlig lavere reduksjon i spissavrenningen. Dette er spesielt synlig for generasjon 1 – tak 3, som består av sedum og en tynn detensjonsmatte. Dette kan muligens forklares med delvis frysing av takflater og redusert lagringskapasitet til takene under regn-på-snøhendelser, noe som kan observeres i Figur 4 tidspunkt P4.

Figur 7 viser statistikk for spissavrenning fra de ulike takkonfigurasjoner som funksjon av ulike type hendelse og sommer-/vinter måneder. Merk skalaen på y-aksen. En viktig observasjon her er at alle de blågrønne takkonfigurasjonene (tak 1 og tak 3) viser en betydelig lavere spissavrenning enn vanlig svart tak (tak 2). Dette er viktig dokumentasjon i forhold til at blågrønne tak også har en funksjon om vinteren. En annen observasjon er at spissavrenningen er høyest for regn-på-snøhendelser, noe som støtter oppfatningen om at regn-på-snøhendelser har en tendens til å forårsake større skade enn andre typer hendelser. En forklaring på dette er at snø har en betydelig lagringskapasitet for vann, men på et gitt tidspunkt vil oppsamlet vann frigjøres av regn.

Implikasjon for overvannshåndtering i kaldt klima

Funnene fra denne studien indikerer at blågrønne tak viser dårligst hydrologiske ytelse under regn-på-snøhendelser sammenlignet med regnhendelser og snøsmeltehendelser. Regn-på-snøhendelser er preget av lengre varighet og høyere vannmengder, noe som fører til høy spissavrenning fra takene. Sammenlignet med sommerhendelser, gir regn-på-snøhendelser høyere spissavrenning, til tross for at sommerhendelser har høyere intensitet. Dagens designpraksis for blågrønne tak benytter sommer-



Figur 6. Retensjon per hendelse (A) og reduksjon i spissavrenning for ulike blågrønne takkonfigurasjoner som funksjon av type hendelse og vinter-/sommertidspunkt.

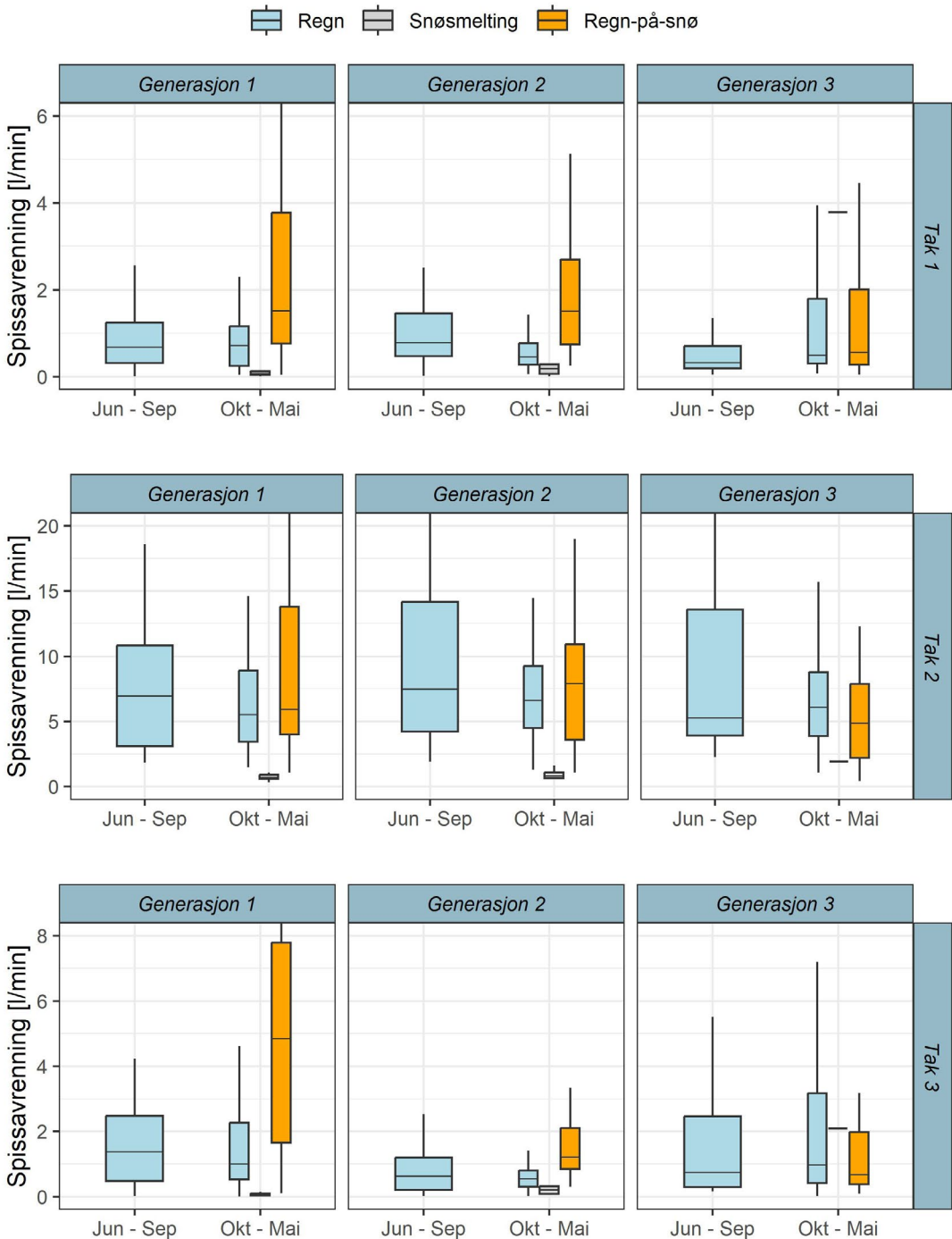
forhold for dimensjonering, noe som kan være utilstrekkelig. Vi anbefaler at også vinterforhold vurderes når slike tak skal designes.

Tykkelsen på det fordrøyende laget til blågrønne tak ble funnet å påvirke den hydrologiske ytelsen. Tykkere fordrøyningslag ble funnet å fungere bedre under vinterforhold, spesielt for regn-på-snøhendelser, enn tynnere fordrøyningslag. Men blågrønne tak uansett tykkelse på det fordrøyende laget håndterer overvannet bedre enn vanlig svart tak.

Konklusjon

Data fra Høvringen testfelt for blågrønne tak er analysert med fokus på vinterdrift av slike tak. Totalt seks ulike blågrønne takkonfigurasjoner i tillegg til vanlig svart tak er testet på Høvringen i tidsrommet 2017-2023.

En kombinert hydrologisk modell som bruker snørutinen i HBV-modellen og ulike reservoarrutingsmodeller ble etablert og funnet velegnethet til å modellere snøakkumulering og -smelting og avrenning fra tak under vinterforhold.



Figur 7. Spissavrenning for ulike takkonfigurasjoner som funksjon ulike typer hendelser og sommer-/vintermåneder.

Det ble også utviklet en metode for å kategorisere ulike typer vinterhendelser i regnhendelser, snøsmeltingshendelser og regn-på-snøhendelser.

Metodikken ble benyttet på dataene fra Høvringen og tidsserien ble delt inn i hendelser. I tidsrommet juni til september ble det kun observert

regnhendelser, slik at disse månedene ble kategorisert som sommer måneder. I de øvrige månedene ble det observert enten regn-på-snøhendelser og/eller snøsmeltehendelser, slik at disse månedene ble kategorisert som vinter måneder.

Retensjons- og fordrøynings egenskapene til de blågrønne takkonfigurasjonene som er undersøkt ble funnet å være lavere om vinteren sammenlignet med sommeren. Imidlertid viste en sammenligning av den hydrologiske ytelsen til blågrønne tak med vanlig svart tak at blågrønne tak har en betydelig evne til å håndtere overvann også om vinteren. Det er også verdt å merke seg at regn-på-snøhendelser har betydelig lengre varighet sammenlignet med andre typer hendelser noe som resulterer i høyere spissavrenning fra taket om vinteren sammenlignet med spissavrenning om sommeren til tross for at sistnevnte har høyere nedbørintensitet.

Referanser

Braskerud, B.C. & K.H. Paus (2023) Avrenning fra ekstensive grønne tak i snødekte perioder. Vann 01/2023 s 71-76

Maurin, N., Abdalla, E.H.M., Muthanna, T.M., Sivertsen, E. (2024) Understanding the hydrological performance of green and grey roofs during winter in cold climate regions. Sci. Total Environ. 945, 174132. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174132>

Sivertsen E, Maurin N, Time B & Muthanna TM (2023) Klima 2050 og testing av blågrønne tak på Høvringen. Vann 03/2023 s 199 - 207

Vann- og miljøteknikk

Vann er verdens viktigste næringsmiddel. Vann handler om trygg og energiøkonomisk vannforsyning og rent vann i krana; om kostnadseffektive og driftsvennlige anlegg. Vann er også noe mer, det er en ressurs for estetiske opplevelser, for lek og rekreasjon. Dessuten skal det temmes.

Våre tjenester:

Vannbehandling / Vannmiljø / Grunnvarme /
VA-modellering / Overvannshåndtering / NoDig /
Forurenset grunn / Skred / VA-transportssystemer /
Hydrologi og vassdragsteknikk / Avløpsrensing /
Avfall og renovasjon / VA-planer og forvaltning /
Grunnvann og hydrogeologi / Ingeniørgeologi

asplanviak.no

Former samfunnet - ser mennesket

