

Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Fakultet for landskap og samfunn
Fakultet for realfag og teknologi

Norges vassdrags- og energidirektorat
Bergknapp AS
Leca AS



2023-10-30

NMBU-sak:
17/06042-14

Grønne forsøksstak i Norges landskapslaboratorium, NMBU: Rapport for perioden 2018 – 2022

Vegard Nilsen¹, Kim H. Paus¹, Ragna Berg², Knut Møen³, Shan Amin⁴, Geir Norden⁵

¹NMBU, REALTEK; ²NMBU, LANDSAM; ³NVE; ⁴Bergknapp AS;
⁵Leca AS



Foto: Sindre Nyborg

INNHALDSFORTEGNELSE

SAMMENDRAG	3
ABSTRACT	3
1 INNLEDNING	4
2 BESKRIVELSE AV FORSØKSANLEGGET OG DRIFTSERFARINGER	4
2.1 BESKRIVELSE AV FORSØKSANLEGGET	4
2.2 DRIFTSERFARINGER	7
3 INSTRUMENTERING, MÅLEPARAMETERE OG DRIFTSERFARINGER	8
3.1 INSTRUMENTERING OG MÅLEPARAMETERE	8
3.2 DRIFTSERFARINGER	8
4 MASTEROPPGAVER GJENNOMFØRT I PERIODEN	11
5 ANALYSE AV TAKENES HYDROLOGISKE EFFEKT	12
5.1 NEDBØR	12
5.1.1 <i>Nedbørmengder ved takene sammenliknet med nærliggende stasjoner</i>	12
5.1.2 <i>Ekstreme nedbørhendelser</i>	13
5.2 TILBAKEHOLDELSE AV NEDBØR	14
5.2.1 <i>Vannbalanse i hele måleperioden</i>	14
5.2.2 <i>Avrenning ved ekstremnedbør</i>	15
5.3 KALIBRERING OG VALIDERING AV EN HYDROLOGISK MODELL	17
6 KONKLUSJONER OG VIDERE ARBEID	17
6.1 KONKLUSJONER	17
6.2 VIDERE ARBEID	18
7 REFERANSER	19

Sammendrag

Denne rapporten gir en kortfattet oversikt over forsøksanlegget for grønne tak i Planteskolen ved Norges landskapslaboratorium, NMBU, og oppsummerer driftserfaringer og måleresultater for perioden 2018 – 2022. Anlegget ble etablert våren 2018 for å studere takenes funksjon som overvannstiltak, og måleresultater er samlet inn siden sommer/høst 2018. Anlegget består av tre 50 m² store forsøksstak hvorav ett tak er et ordinært teknet referansetak og to tak er identiske grønne tak med et 150 mm tykt magasinerende sjikt med finknust LECA (0 – 6 mm) under en 40 mm tykk sedummatte. Takene er meget godt instrumentert for måling av hydrologisk relevante variabler, og innsamlede data er tilgjengelig gjennom NVEs portal [Sildre](#). Foruten enkelte mindre driftsutfordringer, har forsøksanlegget fungert svært godt i perioden, men sedumvegetasjonen på de grønne takene er per i dag delvis fortrent av mose. Det er uklart hvilken virkning dette har hatt på takenes hydrologi. Regelmessig skjøtsel ville trolig kunne forebygget moseveksten. Nedbørmålingene ved takene viser god overensstemmelse på månedsbasis med andre målestasjoner i Ås, med noen avvik, særlig om vinteren. I en noe forenklet analyse er det funnet 13 nedbørhendelser med anslått gjentaksintervall større enn 2 år. Innsamlede data viser at omtrent 27 % av totalnedbøren ble holdt tilbake i de grønne takene i måleperioden. Dette er så vidt noe høyere enn ved forsøksstak i Oslo som ikke har det magasinerende LECA-laget. Videre har gjennomgangen vist at spissavrenningen ved større enkelthendelser reduseres med mer enn 95 % i de grønne takene sammenliknet med referansetaket. Forsøksanlegget har vært en svært verdifull kilde til masteroppgaver, og det er per sommeren 2023 gjennomført åtte masteroppgaver (10 studenter) knyttet til takene, med varierte problemstillinger. For perioden 2023 – 2027 er det aktuelt å bygge om det ene grønne taket til et anlegg med styrt sluk, mens det andre grønne taket beholdes som en referanse og for å danne lange tidsserier med samme takstruktur. Det er også et potensiale for å gjøre mer forskning med allerede innsamlede data, inkludert grundigere modelleringsarbeid.

Abstract

This report provides a brief overview of the test facility for green roofs at Planteskolen in the Norwegian Landscape Laboratory, NMBU, and summarizes the operational experience and measurement results for the period 2018 – 2022. The facility was established in spring 2018 to study the effect of the roofs as a storm water management option, and measurements have been collected since summer/autumn 2018. The facility consists of three 50 m² test roofs, of which one roof is an ordinary black reference roof and two roofs are identical green roofs with a 150 mm thick storage layer of finely crushed LECA (0 – 6 mm) under a 40 mm thick sedum mat. The roofs are instrumented for measuring hydrologically relevant variables and the collected data is available through NVE's portal [Sildre](#). Apart from some minor operational challenges the test facility has functioned very well during the period. However, as of today, the sedum vegetation on the green roofs has been partly displaced by moss. It is unclear what effect this has had on the hydrology of the roofs. Regular maintenance would probably prevent the growth of moss. The rainfall measurements at the roofs show good agreement on a monthly basis with other rain gages in Ås. There are however some deviations, especially during the winter. In a somewhat simplified analysis, 13 rainfall events have been identified with an estimated return period greater than 2 years. The data shows that approximately 27% of the total precipitation was retained in the green roofs during the measurement period. This is only slightly higher than for experimental roofs in Oslo, which do not have the LECA storage layer. Furthermore, the data has shown that the peak runoff during large rainfall events is reduced by more than 95 % in the green roofs compared to the reference roof. The test facility has been a very valuable source of master's theses topics, and as of summer 2023, eight master's theses (10 students) related to the roofs, with varied issues, have been completed. For the period 2023 – 2027, one green roof may be converted into a facility with a controlled drain, while the other green roof is retained as a reference and to form long time series with the same roof structure. There is also a potential to do more research with already collected data, including more thorough modeling work.

1 Innledning

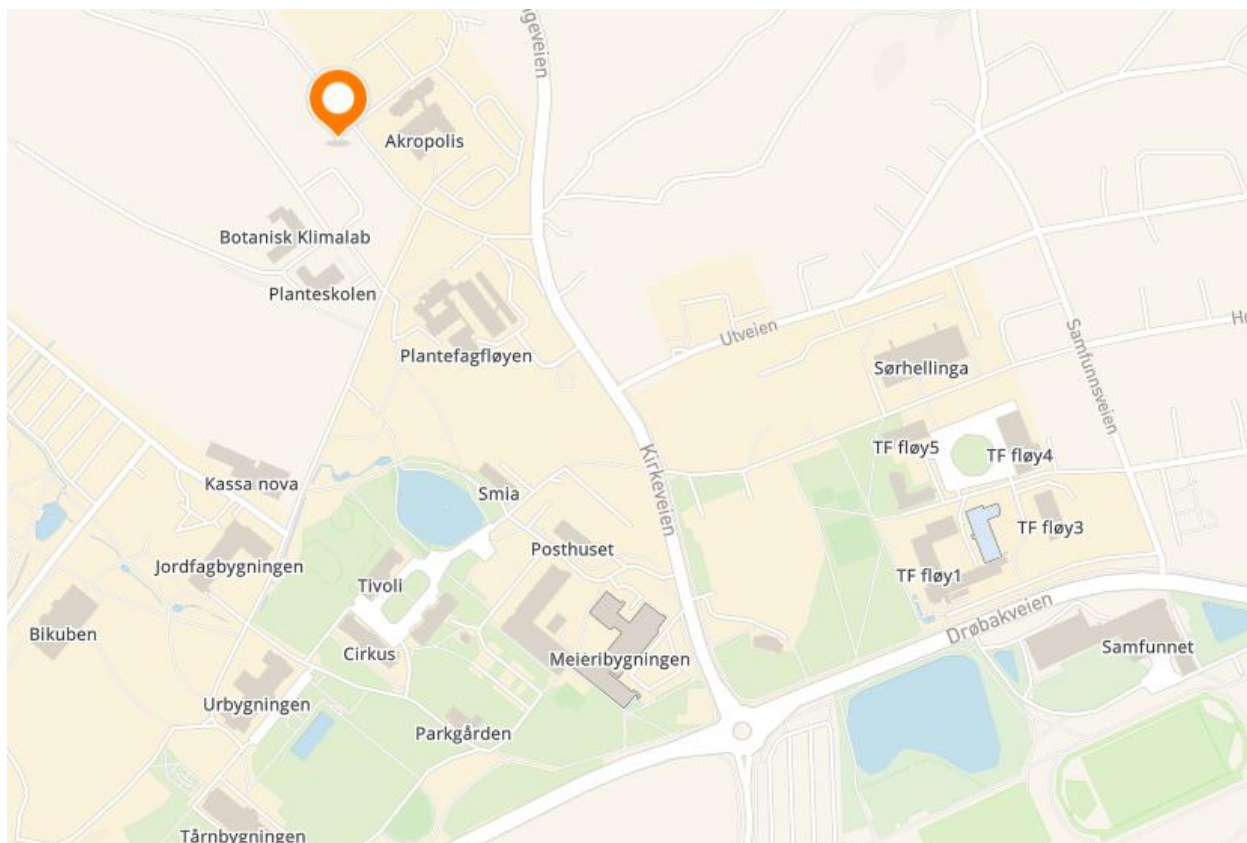
Etablering av naturbaserte overvannsløsninger som grønne tak, regnbed med mer, er nødvendig for å løse utfordringer knyttet til klimaendringer og økte overvannsmengder i urbane områder. For å sikre at løsningene blir anlagt og driftet mest mulig hensiktsmessig, er det videre vesentlig med tilstrekkelig kunnskap og forståelse av systemene. I Planteskolen ved Norges landskapslaboratorium, NMBU, ble det i 2018 etablert grønne forsøksstak gjennom et samarbeid mellom NMBU (fakultetene LANDSAM og REALTEK), NVE, Bergknapp AS og LECA AS. Samarbeidsavtalen strakk seg over en femårsperiode fra 2018 – 2022, og en ny avtale for 2023 – 2027 er inngått. I etableringsavtalen heter det at «formålet er å etablere et forsøks- og demonstrasjonsanlegg for grønne tak som tiltak for å redusere overvannsflokk som resultat av intensiv nedbør». Anlegget er per utgangen av 2022 blant de best instrumenterte forsøksanleggene for grønne tak i Norge, ved siden av Vega Scene i Oslo og Høvringen renseanlegg i Trondheim.

I henhold til avtalen fra 2018 skal det utarbeides en kortfattet årsrapport hvert år. Dette ble gjort for 2018 (Trommald m.fl., 2019), men ikke for de påfølgende år. Denne femårsrapporten erstatter derfor de årlige rapportene, og inneholder en enkel beskrivelse av forsøksanlegget samt en gjennomgang av driftserfaringer og måleresultater for hele den første avtaleperioden, 2018 – 2022. Foruten denne rapporten er det drevet sporadisk formidlingsvirksomhet, bl.a. ved forskningsdagene i 2019 og i introduksjonskurset IMRT100 for vannstudenter, i introduksjonskurset LAA115 for landskapsarkitekt- og landskapsingeniørstudenter, samt ved fagdager for grøntanleggsbransjen.

2 Beskrivelse av forsøksanlegget og driftserfaringer

2.1 Beskrivelse av forsøksanlegget

Forsøksfeltet ble etablert våren 2018 i Planteskolen, Åsbakken 10, NMBU (Figur 1). Prosjektering og etablering av anlegget ble gjennomført som en [masteroppgave](#) (Trommald og Øyre, 2018), og for detaljer henvises det til denne masteroppgaven. Her gis en kort oppsummering av de delene av forsøksfeltets oppbygging som er relevant for den hydrologiske funksjonen til takene. Instrumentering er behandlet for seg selv i avsnitt 3.



Figur 1: Forsøksfeltets plassering på Campus Ås. Hentet fra MazeMap.

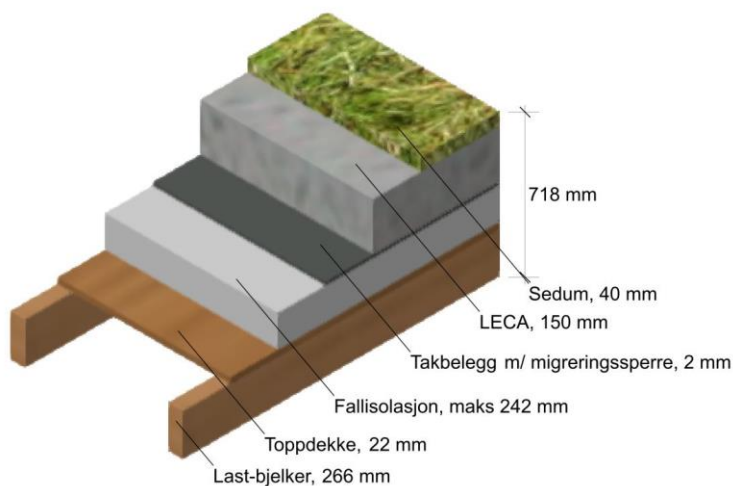
Det ble etablert to grønne tak og et sort referansetak (Figur 2) med dimensjoner på ca. 5 m x 10 m og dermed et areal på ca. 50 m². Takene har fall mot sluk i det ene hjørnet, og er ment å representere et utsnitt på én kvadrant av et 200 m² stort takfelt med fall mot sluk i sentrum. Alle takene har samme oppbygning (Figur 3) med fallisolasjon av typen Vartdal Styropor EPS som er tekket med Protan BP (takflate) og BPX (parapet). De to grønne takene er identisk bygget opp med et ca. 150 mm tykt sjikt av finknust LECA lettklinker (NC 0 – 6 mm), en fuktbevarende filtduk og til slutt en sedummatte (Bergknapp sedummiks). Filtduken og sedummatte har iflg. Trommald Øyre (2018) en samlet tykkelse på ca. 40 mm.

LECA-materialet er undersøkt i laboratorium av SINTEF (Busklein, 2018) og det er funnet en hydraulisk konduktivitet på 1.4 cm/s. Porøsitet og vannretensjonskurve er ikke undersøkt, men effektiv porøsitet er iflg. Trommald og Øyre (2018) anslått av LECA AS til 50 %, og total porøsitet (primær og sekundær) til 85 %. Løs bulkdensitet er 420 kg/m³. Fra FDV-dokumentasjonen i Trommald og Øyre (2018) er det noe tvetydig hva porøsiteten/vannlagringsvolumet til sedummatte er.

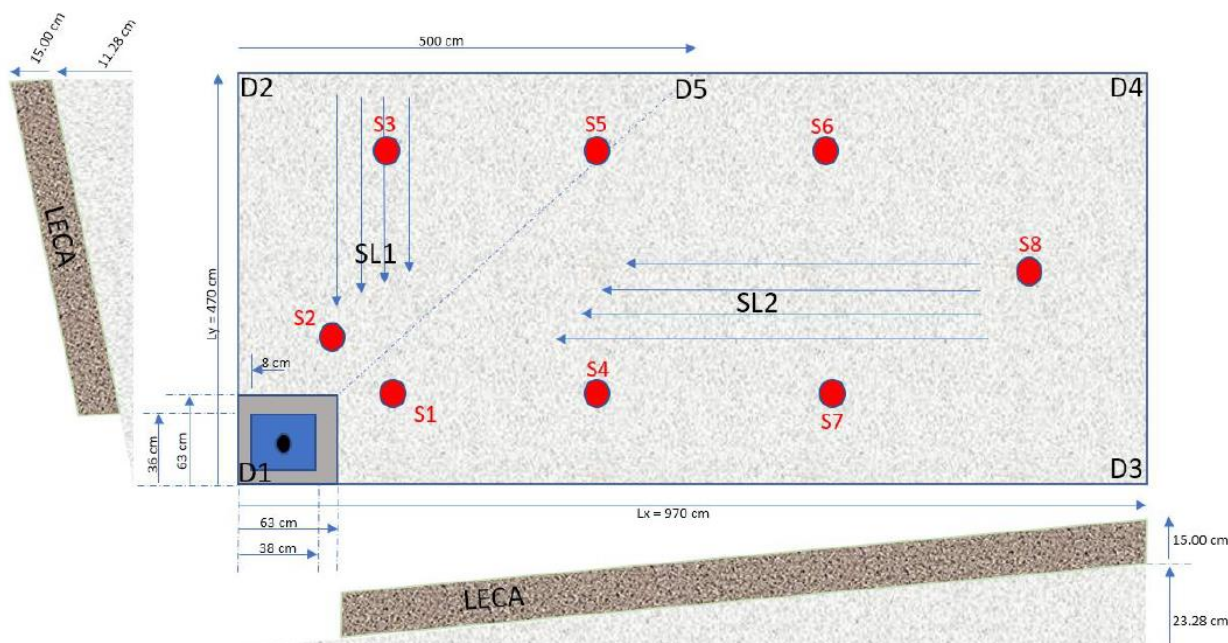
Slukene er av typen Jual taksluk med dimensjon 75 mm (Figur 3). På de grønne takene er det bygget en inspeksjonsboks/slukboks rundt slukene, som igjen er omgitt av et separasjonslag med singel. Figur 4 og Tabell 1 viser mål som er gjort på tak 3 våren 2023 i forbindelse med en masteroppgave (Al-khayyat, 2023). Figuren viser fallforholdene til takets bunn, som består av to plan med fall på 24 mm/m (prosjektert 25 mm/m) langs takets akser. Disse planene møtes i diagonalen som er markert med stiplede linje i Figur 4.



Figur 2: Forsøksfeltet rett etter etablering, med takenes nummerering. Foto: Sindre Nyborg.



Figur 3: Oppbygging av sjiktene til takene og bilde av sluket. Det sorte referansetaket er bygget opp identisk med de grønne takene tom. takbelegget. Hentet fra Trommald. og Øyre (2018).



Figur 4: Målte dimensjoner for tak 3 (i nord), hentet fra Al-khayyat (2023). Fallene SL1 og SL2 er målt til 24 mm/m. Ytterligere mål er gitt i Tabell 1. Blått felt viser slukboksen og det omliggende grå feltet er separasjonslaget med singel. Grå skravur representerer fallisolasjon/takets grunn.

Tabell 1: Mål på tak 3 knyttet til elementer vist i Figur 4. Hentet fra Al-Khayyat (2023). Merk at målt posisjon for sensorene i noen tilfeller avviker noe fra det som er oppgitt i Bassøe (2020) og Ydse (2021).

Sensor	Lx [m]	Ly [m]	Object	Length [cm]	Surface	Slope [mm/m]
S1	1.72	0.82	D1 (elevation)	0.00	SL1	24.00
S2	0.99	1.33	D2 (elevation)	11.28	SL2	24.00
S3	1.72	3.46	D3 (elevation)	23.28		
S4	3.36	1.33	D4 (elevation)	23.28		
S5	3.72	3.72	D5 (elevation)	11.28		
S6	6.00	3.52	LECA (depth)	15.00		
S7	5.85	1.22				
S8	8.43	2.46				

2.2 Driftserfaringer

Det er ikke gjort bevisste endringer i forsøksfeltets oppbygning i løpet av perioden (kun i instrumenteringen, se avsnitt 3). Følgende vesentlige driftserfaringer er gjort:

- Sedumvegetasjonen er per utgangen av 2022 delvis fortrent av mose (Figur 5). Årsaken til dette er høyst sannsynlig knyttet til skjøtselsrutinene, bl.a. for sjelden gjødsling. Redusert tilgang på næringsstoffer har medført en reduksjon i dekningsgraden av sedum. Dette har skapt vilkår for at mose skal kunne etablere seg. Flere andre pionerplanter ser ut til å ha funnet veien inn, og videre tilskygging fra mer høyvokst vegetasjon har nok ytterligere påvirket sedumveksten. Det forventes likevel ikke at denne utviklingen i vegetasjonsdekket har påvirket takenes hydrologiske funksjon i vesentlig grad.
- I 2020 ble det observert at sammenføyningene hadde begynt å gå opp i hjørnene mellom takets trevegger. Dette er siden blitt utbedret av Bergknapp vha. nye/flere skruer.
- Det er observert noe fukt i treverket på undersiden av takene nær slukene, men det er uklart om dette er knyttet til lekkasjer i tekkingen.
- Grunnet takenes plassering lavt i terrenget (sammenliknet med de fleste ordinære tak) og store, eldre løvtrær i nærheten, samler det seg mye løv på takene om høsten. Dette må fjernes manuelt fra det sorte taket for å unngå tiltetting av sluk, mens det ikke nødvendigvis utgjør et stort problem for de grønne takene ettersom løvet gradvis brytes ned gjennom vinter og vår. Det må vurderes fortløpende hvorvidt dette utgjør et problem for plantene og må fjernes.
- Tankene som mottar avrenningen fra takene, må pakkes inn med isolasjon før vinteren for å unngå at vannet fryser og skader instrumenter og pumper. Avrenningsmåleren ved tak 3 er surret inn i bobleplast sammen med en varmekabel for å unngå frostskafer.



Figur 5: Bildet er tatt 22.09.2023, men er nokså representativt for tilstanden på takene ved utgangen av 2022. I perioder er det enda mer ugress enn vist på dette bildet. Foto: Ragna Berg.

3 Instrumentering, måleparametere og driftserfaringer

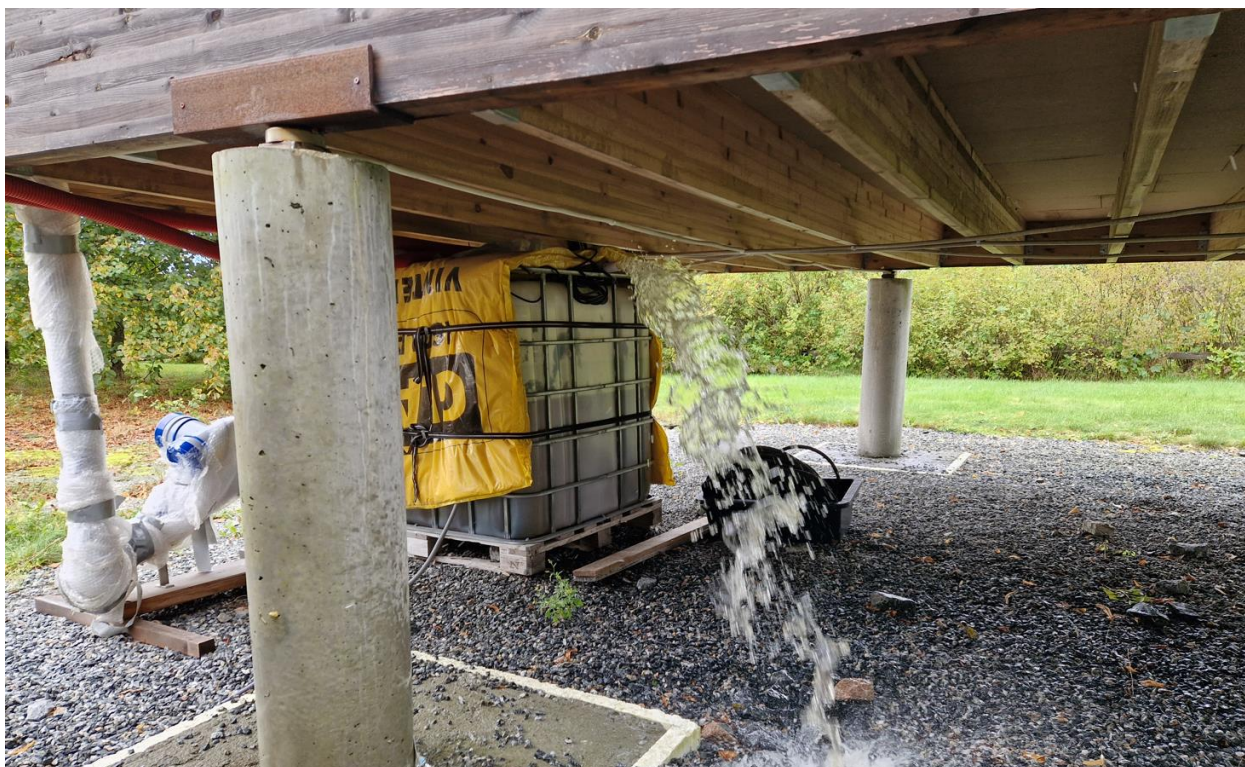
3.1 Instrumentering og måleparametere

Takene ble ved etableringen i 2018 utstyrt med instrumenter for å måle nedbør, vind, lufttemperatur, luftfuktighet, takenes overflatetemperatur, temperatur under/over LECA-laget, strålingsbalanse, takenes vekt og avrenning. Høsten 2020 ble dessuten tak 3 utstyrt med en ekstra vannføringsmåler og sensorer for å måle vannivået i taket. Tabell 2 gir en oversikt over måleinstrumentene som er i drift ved anlegget ved utgangen av 2022. Dataene logges og overføres til NVEs hydrologiske database og er tilgjengelig for nedlasting fra portalen [Sildre](#). Tabell 3 gir en detaljert oversikt over dataseriene i Sildre. I skrivende stund er ikke jordtemperaturmålingene gjort tilgjengelig i Sildre.

3.2 Driftserfaringer

I hovedsak har instrumenteringen fungert godt, men følgende kan bemerkes (Figur 6):

- Det har vært perioder med feil på enkelte veieceller – i hovedsak pga. dårlig kontakt i skrultilkobling på digitale interface. På veiecellene er det også en (hittil uforklart) temperaturpåvirkning. Det er uklart om dette er en reell «temperaturfeil» eller en effekt av at hele konstruksjonen krymper og utvides som følge av temperaturendringer. I 2022 ble det montert dedikerte temperaturfølere på alle seks veieceller på tak 1 for å se på muligheten for å korrigere eventuell temperaturpåvirkning.
- Konseptet med IBC-tanker og automatisk tømning har fungert stabilt med lite vedlikehold (gjelder parameteren «Avrenning fra tak» i Tabell 2). Det er fortsatt rom for forbedring av tømmelegikken. Det forsvinner noe data under en tømmesekvens og tømmesekvensen forekommer nå alltid mens det er avrenning. Ved å preventivt tømme tankene før de er fulle, men utenom perioder med avrenning, vil dette datatapet reduseres. Det er gjort simuleringer av hvor mye avrenning som ikke blir målt. Det virker å være marginalt og utgjør en feilmargen på < 2% av årsnedbør, men vil alltid gi en negativ bias.



Figur 6: IBC-tanken ved tak 3 under en tømmesekvens 22.09.2023. Bildet viser også den nye vannføringsmåleren (blått instrument), og en av veiecellene (oppå nærmeste søyle). Foto: Ragna Berg.

Tabell 2: Måleinstrumenter som er installert på takene per utgangen av 2022.

Parameter	Plassering (antall)	Instrumentbeskrivelse
Nedbør	Værstasjon, nord-øst (1)	OTT Pluvio ² (vektbasert). Frostvæske benyttes for vintermålinger.
Lufttemperatur og relativ luftfuktighet	Værstasjon, nord-øst (1)	Campbell CS215
Vind	Tak 1 (1)	R.M. Young 05103 (propellbasert, måler horisontal vindretning og -hastighet)
Strålingsbalanse	Tak 1 (1)	Apogee SN-500 (inngående og utgående kortbølget og langbølget stråling, oppvarmet)
Overflatetemperatur	Tak 2 (1) og tak 3 (1)	Apogee SI-421 (radiometer, infrarød)
Jordtemperatur	Tak 1, bunn LECA (4) Tak 1, topp LECA (4) Tak 3, bunn LECA (4) Tak 3, topp LECA (4) Alle sensorer plassert 1.5 m inn fra hjørnepunkt	Microstep-MIS TPP Temperature Profile Probe
Vekt av tak	Tak 1 (6) Tak 2 (6) Tak 3 (6)	PT Global LPX-5000kg (én veiecelle per betongsøyle, seks målinger per tak summeres og rapporteres som samlet vekt per tak i Sildre)
Avrenning fra tak	Tak 1 (1) Tak 2 (1) Tak 3 (1)	Vann fra sluk ledes inn i isolert IBC-tank, der vannnivå måles vha. trykksensor Seametrics PT12. Fra vannnivå beregnes volum som rapporteres i Sildre, som videre kan regnes om til vannføring. Tanken tømmes automatisk når den begynner å bli full vha. pumpe Grundfos Unilift KP350, som gir en tømmetid på ca. 4.3 min fra full til tom tank. NVE ser på muligheten for å rapportere vannføring direkte i Sildre fremfor å rapportere volum i tankene.
Avrenning fra tak, ny	Tak 3 (1)	Krohne Optisonic 3400C (ultralydbasert)
Vanndybde, tak	Tak 3, som vist i Figur 4 og Tabell 1 (8)	Kapasitive «stavsensorer» (Gill LevelSlick 7014) plassert i 75 mm rør. Sensor står med spiss («0mm») ned til filtduk i bunn av tak.
Jordfuktighet	Tak 3 (4)	Fire sensorer (Meter Teros 5) plassert i to punkter. På hvert punkt er det plassert én sensor som måler de øverste 10 cm av LECA-laget og én sensor som måler de 10 nederst cm av LECA-laget. Den øvre sensoren er plassert rett under filtduken som skiller sedum fra LECA.

Tabell 3: Måleserier som er tilgjengelig i Sildre

Parameternavn i Sildre	ID i Sildre	Målepunkt	Enhet	Loggefrekvens	Tidstolkning	Periode	Kommentar
Vannføring	5.10.0.1001.3	Tak 3	m ³ /s, l/s	1 min	Middelverdi	23.09.2020 – d.d.	Sterkt påvirket av fyllingsforsøk høsten 2020.
Vannstand	5.10.0.1000.31	Tak 3, sensor 1	m	1 min	Momentanverdi	20.08.2020 – d.d.	Vannstand målt relativt til lokal bunn. Se Figur 4 og Tabell 1 for sensorenes plassering i taket. Sterkt påvirket av fyllingsforsøk høsten 2020.
	5.10.0.1000.32	Tak 3, sensor 2					
	5.10.0.1000.33	Tak 3, sensor 3					
	5.10.0.1000.34	Tak 3, sensor 4					
	5.10.0.1000.35	Tak 3, sensor 5					
	5.10.0.1000.36	Tak 3, sensor 6					
	5.10.0.1000.37	Tak 3, sensor 7					
	5.10.0.1000.38	Tak 3, sensor 8					
Lufttemperatur	5.10.0.17.1	Værstasjon	°C	10 min	Momentanverdi	10.07.2018 – d.d.	
Vindretning og -hastighet	5.10.0.15.1	Tak 1	m/s, °	10 min	Middelverdi	10.07.2018 – d.d.	
Relativ fuktighet	5.10.0.2.1	Værstasjon	%	10 min	Momentanverdi	10.07.2018 – d.d.	
Nedbør	5.10.0.0.1	Værstasjon	mm	15 min	Akkumulert	11.07.2018 – 31.08.2018	Endret loggefrekvens
	5.10.0.0.1			1 min		01.09.2018 – d.d.	
Overflatetemperatur	5.10.0.2040.1	Tak 3	°C	10 min	Momentanverdi	10.07.2018 – d.d.	
	5.10.0.2040.2	Tak 2					
Vindhastighet	5.10.0.15.1	Tak 1	m/s	10 min	Middelverdi	10.07.2018 – d.d.	Kopi av måleserie over
Vekt	5.10.0.4050.21	Tak 1	kg	10 min	Momentanverdi	10.07.2018 – d.d.	Hver serie er summen av målingene fra seks veieceller per tak
	5.10.0.4050.22	Tak 2					
	5.10.0.4050.23	Tak 3					
Kortbølget stråling	5.10.0.8.1	Tak 1, inngående	W/m ²	10 min	Momentanverdi	12.07.2018 – d.d.	
	5.10.0.8.2	Tak 1, utgående					
Langbølget stråling	5.10.0.9.1	Tak 1, inngående	W/m ²	10 min	Momentanverdi	12.07.2018 – d.d.	
	5.10.0.9.2	Tak 1, utgående					
Vanndybde, nedbørmåler	5.10.0.9153.1	Værstasjon	mm	1 min	Momentanverdi	10.07.2018 – d.d.	Bøtte er full ved 600 mm
Akkumulert nedbør	5.10.0.9153.2		mm		Akkumulert		Akkumuleres til 500 mm. Resettes automatisk til 0.
Statuskode, nedbørmåler	5.10.0.9153.3		-		Bit-kode		Se manual for Pluvio ² . Skal være «0».
Volum	5.10.0.9156.1	Tak 1	liter	1 min	Momentanverdi	12.07.2018 – d.d.	Må regnes om til vannføring. Tak 3 er sterkt påvirket av fyllingsforsøk høsten 2020.
	5.10.0.9156.2	Tak 2					
	5.10.0.9156.3	Tak 3					

4 Masteroppgaver gjennomført i perioden

Det er per sommeren 2023 totalt ti studenter (ni ved REALTEK, én ved MINA) som har skrevet masteroppgaver om de grønne takene ved NMBU. Ettersom flere studenter har samarbeidet om oppgavene sine, utgjør dette totalt åtte masteroppgaver. I det videre er det gitt en kort beskrivelse av bidragene:

- [Julie Trommald og Astrid Øyre](#) (2018): *Etablering av Bia, en forskningsinfrastruktur med grønne tak*
- [Eivind Fordal](#) (2018): *Avrenning fra to grønne tak ved forskningsinfrastrukturen «Bia» i Ås kommune*
- [Jogeir Ueland](#) (2018): *Effekten av Bia, en forskningsinfrastruktur med grønne tak, innledende studier*
- [Ane Viker-Walsøe og Jon Sivert Valle](#) (2020): *Grønne tak med magasinerende sjikt: hydrologisk effekt og avrenningsmodellering med DDD-modellen*
- [Peter Andreas Bassøe](#) (2020): *Grønne tak med magasinerende sjikt: avrenning ved kontrollerte fyllingsforsøk og kalibrering av DDD-modellen*
- [Marta Corazon Bakke](#) (2020): *Løsninger for nedbørssimulerende vanningsanlegg på grønne tak*
- [Ingrid Kristine Ydse](#) (2021): *Simulering av avrenning fra grønne tak med magasinerende sjikt*
- [Noor Muneer N. Al-khayyat](#) (2023): *Hydrology of Green Roofs: Inverse Modelling in MODFLOW 6 for Estimating the Saturated Hydraulic Conductivity of a LECA Storage Layer*

Julie Trommald og Astrid Øyre ved industriell økonomi, NMBU, skrev i 2018 sin masteroppgave om etableringsprosessen for forsøktakene. Studentene gjennomgikk blant annet ulike faser ved etableringen samt beregninger knyttet til konstruksjonsteknikk og teoretiske beregninger for overvannshåndtering. Videre skrev Jogeir Ueland og Eivind Fordal ved vann- og miljøteknikk i 2018 sine masteroppgaver om avrenning fra takene. Studentene analyserte måledata for perioden juli til november 2018. Fordal rapporterte blant annet at de grønne takene reduserte avrenningsvolumet med over 50 %, samt reduserte maksimalavrenningen med over 90 %. Fordal benyttet videre observasjonene til å kalibrere en nedbør-avløpsmodell i SWMM (to nedbørhendelser). Kalibrering ble utført manuelt og vurdert via NSE. Fordals SWMM-modell ble benyttet til å vurdere fremtidige ekstremhendelser.

I 2020 skrev Marta Corazon Bakke ved vann- og miljøteknikk sin masteroppgave om potensielle løsninger for vanningsanlegg for de grønne takene. Bakke vurderte ulike tilnærminger (sprederslange, svetteslange, hagespreder og ulike industridyser) og vurderte vannføring, trykk og spredning over taket. Gjennom en konseptvalgutredning ble det konkludert med at en kombinasjon av åtte hagespredere er den mest gunstige løsningen.

I 2020 ble det skrevet to masteroppgaver om de grønne takene der DDD-modellen ble benyttet til kalibrering og validering. Ane Viker-Walsøe og Jon Sivert Valle ved vann- og miljøteknikk skrev våren 2020 en felles masteroppgave om takenes hydrologiske effekter. I deres oppgave ble det funnet at taket tilbakeholder om lag 29.5 % av årsnedbøren og at avrenningstopper reduseres med en medianverdi på 95 %. Videre skrev Peter Andreas Bassøe ved vann- og miljøteknikk høsten 2020 en masteroppgave der det ble gjennomført kontrollerte fyll- og tømme-forsøk (Figur 7) som grunnlag for å kalibrere en DDD-modell for takene. Ingrid Kristine Ydse ved MINA brukte i 2021 de samme fyllingsforsøkene til å kalibrere fysisk baserte strømningsmodeller for det magasinerende sjiktet i de grønne takene. I 2023 ble data fra fyllingsforsøkene benyttet av Noor Al-khayyat i en grundig analyse i MODFLOW 6 for å estimere takenes hydrauliske konduktivitet. Det ble funnet at den hydrauliske konduktiviteten som passer best med måledata, er $K = 1.5 \text{ cm/s}$, som stemmer meget godt med verdien på 1.4 cm/s , som ble målt av SINTEF i laboratoriet.



Figur 7: Fritt vannspeil ved fylling. Foto: Peter Andreas Bassøe (2020). Figur hentet fra Bassøe (2020).

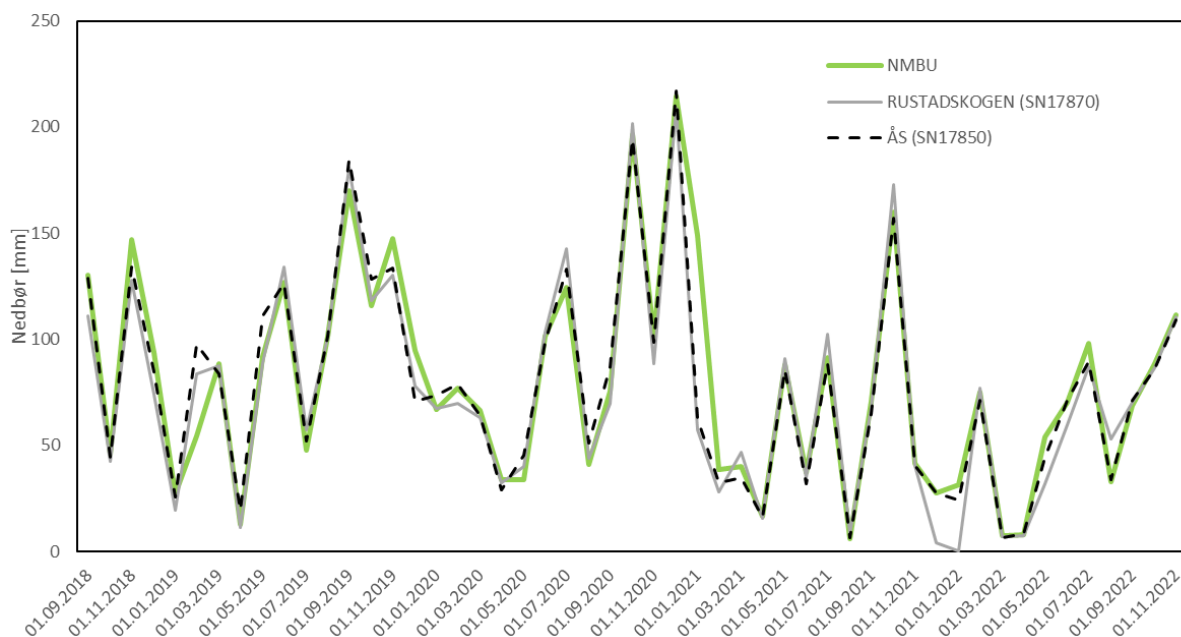
5 Analyse av takenes hydrologiske effekt

I denne delen er det gitt en analyse av utvalgte måleparametere (hovedsakelig nedbør og avrenning) i perioden.

5.1 Nedbør

5.1.1 Nedbørmengder ved takene sammenliknet med nærliggende stasjoner

En gjennomgang av registrerte nedbørverdier ved takene avdekket enkelte avvik i observasjonene. Avvikene omfattet enkelte dager eller flere sammenhengende dager med urealistisk høye nedbørmengder. Avvikene ble funnet ved å sammenlikne døgnnedbør ved takene med verdier fra nærliggende stasjoner (Rustadskogen SN17870 og Ås, Søråsjordet SN17850). De fleste av avvikene forekom om vinteren (desember – februar) noe som kan tyde på at mengden nedbør som faller som snø ikke blir registrert korrekt ved nedbørstasjonen ved takene. Figur 8 viser en sammenlikning av månedsnedbør ved takene, SN17870 og SN17850 fra september 2018 til november 2022. I Figur 8 er avvikene fjernet, og en ser en god overensstemmelse mellom nedbør målt ved takene og de øvrige stasjonene. I hele perioden var totalnedbøren 2 til 5 % høyere ved takene (4041 mm) enn ved Rustadskogen (3837 mm) og Ås, Søråsjordet (3960 mm).



Figur 8: Sammenlikning av månedlig nedbør ved forsøktakene (NMBU) og nærliggende stasjoner (Rustadskogen og Ås, Søråsjordet) i perioden 1.9.2018 til 1.11.2022.

5.1.2 Ekstreme nedbørhendelser

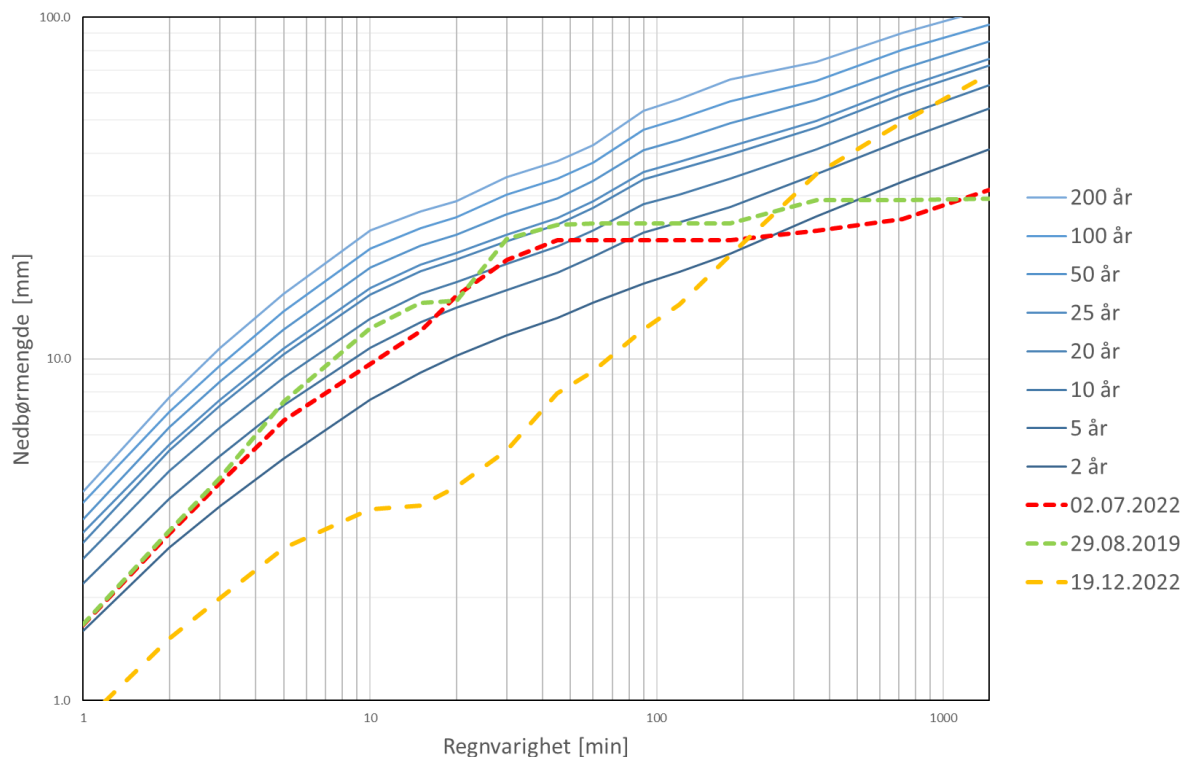
Det er utført en overfladisk gjennomgang av nedbørdata for å identifisere ekstreme nedbørhendelser. Med ekstreme hendelser menes her regnhendelser der intensiteten for én eller flere regnvarigheter har gjentaksintervall over to år når verdiene sees opp mot IVF-statistikk utarbeidet for Rustadskogen (1974 – 2021). Metoden baserte seg på å analysere nedbørhendelser kun på dager med 20 mm eller mer nedbør. Tilnærmingen er dermed ikke egnet til å fange opp ekstreme hendelser der relativt korte regnvarigheter har størst gjentaksintervall. Eksempelvis så har et 10-årsregn med 30 min regnvarighet iht. IVF-statistikken på Rustadskogen en nedbørmengde på 19,0 mm. Om en slik hendelse traff takene isolert så vil ikke metoden for identifikasjon finne denne. Det er derfor høy sannsynlighet for at det har forekommet ekstreme nedbørhendelser med kort varighet og gjentaksintervall fra 2 til 10 år, som ikke har blitt identifisert.

Som vist i Tabell 4 ble det identifisert 13 ekstreme hendelser (det vil si der gjentaksintervallet er på over 2 år). Som forventet domineres hendelsene av lange varigheter, og det er kun funnet to hendelser der korte regnvarigheter (< 180 min) har størst gjentaksintervall. Begge hendelsene med kort regnvarighet forekom ila. sommeren, og oppsummert forekom ca. 60 % av ekstremhendelsene i perioden juni til september. Selv om metoden som er brukt ikke forventes å fange opp alle de kortvarige ekstremhendelsene, er det likevel funnet et overraskende høyt antall ekstremhendelser for en måleperiode på 4 – 5 år. Dette kan nok delvis forklares med at vi her har ekstremhendelser med svært ulik varighet som ikke uten videre bør sees under ett.

Tabell 4: Oppstilling av identifiserte nedbørhendelser ved de grønne takene der én eller flere varigheter har nedbørintensitet med gjentaksintervall over 2 år iht. IVF-statistikk fra Rustadskogen. Metoden som er benyttet til identifikasjon er ikke egnet til å finne styrtregn med lave gjentaksintervall og listen er derfor ikke komplett.

Periode	Største gjentaksintervall	Regnvarighet med høyest gjentaksintervall	Sum nedbør (takene) [mm]	Sum nedbør Rustadskogen (SN17870) [mm]	Sum nedbør Ås (SN17850) [mm]
8 – 12. sep. 2018	2 - 5 år	180 min	91	76	91
10 – 13. nov. 2018	2 - 5 år	1440 min	82	81	81
19 – 20. jun. 2019	Ca. 2 år	180 min	22	26	24
28. – 30. aug. 2019	20 - 25 år	30 min	30	26	26
3 – 7. sep. 2019	2 - 5 år	360 min	80	77	78
20 - 22. jun. 2020	2 - 5 år	720 min	44	45	48
23 – 27. sep. 2020	Ca. 2 år	360 min	52	46	61
26 – 31. des. 2020	2 - 5 år	1440 min	90	80	85
30. sep. – 4. okt. 2021	5 - 10 år	1440 min	121	130	116
1 – 4. jul. 2022	10 - 20 år	45 min	57	53	53
12 – 14. sep. 2022	2 - 5 år	360 min	38	40	42
16 – 20. des. 2022	10 - 20 år	1440 min	88	7	23

Figur 9 viser videre fordelingen av nedbørmengde per regnvarighet for de tre mest ekstreme hendelsene i måleperioden. Hendelsene i august 2019 og juli 2022 er relativt like og er sannsynligvis konvektive kortvarige sommerbyger. Hendelsen i desember 2022 var et langvarig snøfall med lav nedbørintensitet.



Figur 9: Fordeling av nedbørmengde på varigheter for de identifiserte ekstremhendelsene med gjentakintervall over 10 år.

5.2 Tilbakeholdelse av nedbør

I denne delen er det vurdert hvordan de grønne takene evner å tilbakeholde nedbør. Vannføring ut av takene måles direkte med ultralydsensor for tak 3 og indirekte på alle takene via volummålinger i IBC-tanker. Ettersom vannføringsmåleren i tak 3 først ble satt i drift høsten 2020, er det i denne delen tatt utgangspunkt i verdiene fra volummålingene.

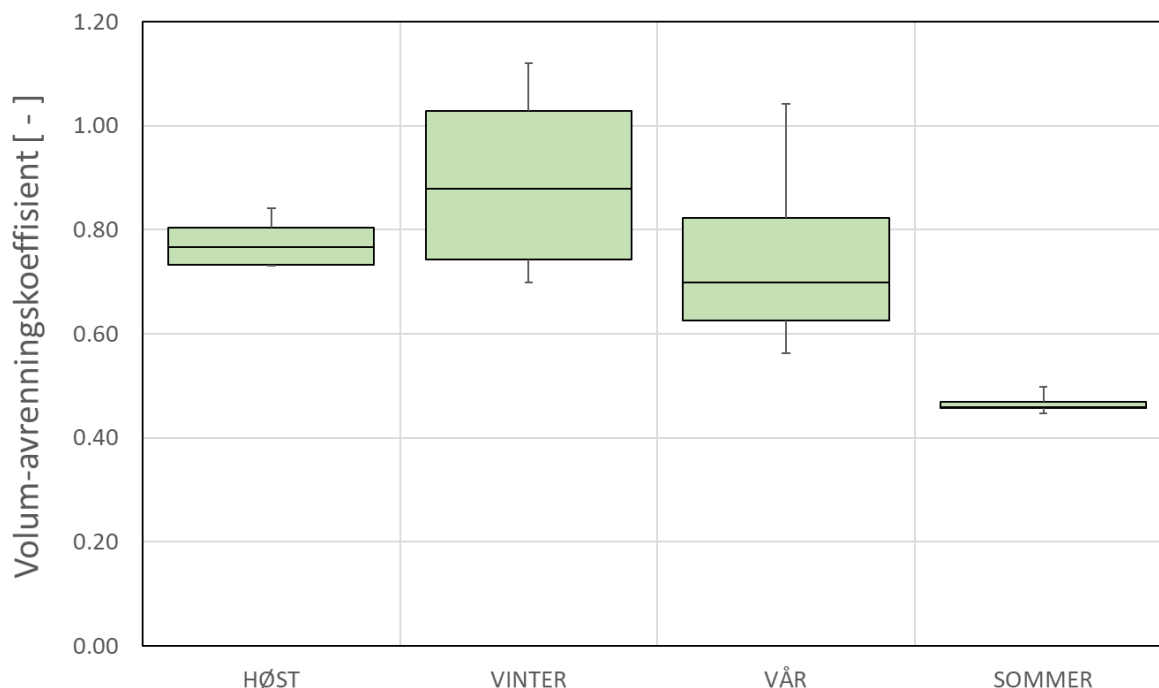
5.2.1 Vannbalanse i hele måleperioden

Det er kun utført beregning av vannbalanse over tid for tak 3. Dette fordi sildre.no har en begrensning i nedlastning av data for parallelle målinger. Som et mål på vannbalanse over tid er volumavrenningskoeffisienter (φ_v) vurdert. Denne koeffisienten er definert som avrenningsvolumet fra taket dividert på nedbørvolumet som treffer taket i samme periode.

Ila. perioden september 2018 til november 2022 ble det estimert en φ_v -verdi på 0,73 (kontrollerte oppfyllingsforsøk ekskludert). Forutsatt at observasjonene er korrekte betyr det at 27 % av nedbøren som treffer taket har fordampet ilt, perioden. For å sammenlikne denne verdien må en vurdere andre grønne tak med tilsvarende målinger. I Oslo finnes det lange måleserier for små grønne forsøksstak (8 m²) i Langmyrgrenda (Braskerud og Paus, 2022). Ila. perioden er det estimert en φ_v -verdi på 0,77 i Oslo, noe som tyder på noe økt andel fordampning ved takene på NMBU. Midlere årsnedbør for begge lokaliteter var i måleperioden lik (955 mm/år for Oslo og 952 mm/år for takene ved NMBU), noe som videre antyder en større verdi for fordampning på NMBU. En forklaring på dette er åpenbart det tykkere mediet som er benyttet på NMBU (40 mm sedum over 150 mm finknust LECA) sammenliknet med de grønne takene i Oslo som er lagt oppå et tynt lag (20-30 mm) med vekstsubstrat.

Som forventet pga. store klimatologiske forskjeller gjennom året er det også stor variasjon i volumavrenningskoeffisienten per årstid (Figur 10). Årstidene er her definert som høst (september til november), vinter (desember til februar), vår (mars til mai) og sommer (juni til august). Som figuren viser har man aller høyest tilbakeholdelse av nedbør om sommeren med en avrenningskoeffisient like under 0,50. Dette er forventet da nedbør i denne perioden har stor tendens til å fordampe. Videre finner man de høyeste verdiene om vinteren og delvis om våren, da fordampning er på et minimum. Figuren viser også at volumavrenningskoeff-

fisienten for vinter og vår tidvis er over 1 noe som antyder at nedbør som snø fra forrige årstid smelter, eller at snø ikke fanges opp skikkelig av nedbørmåleren. Hvis man sammenlikner volumavrenningskoeffisienten ved NMBU-takene med de grønne takene i Langmyrgrenda i Oslo, så har de grønne takene ved NMBU større tilbakeholdelse for nedbør i alle årstider (i Oslo er koeffisientene 0.89 for høst, 0.93 for vinter, 0.93 for vår og 0.56 for sommer).



Figur 10: Min, maks samt 25, 50 og 75%-persentiler for estimerte volum-avrenningskoeffisient per årstid for tak 3. Dataene omfatter perioden september 2018 til november 2022. Inndeling i årstid er gjort som følger: Høst (september til november), vinter (desember til februar), vår (mars til mai) og sommer (juni til august).

5.2.2 Avrenning ved ekstremnedbør

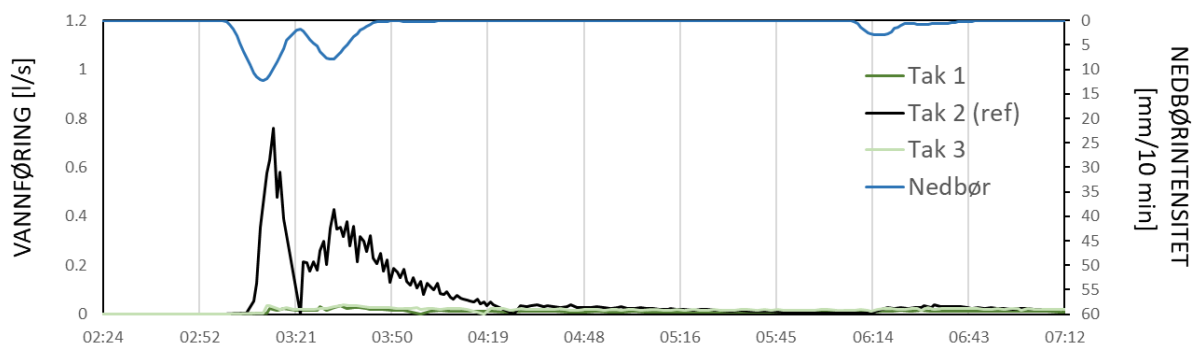
I denne delen gjennomgås avrenningsforløpet fra de tre takene for de tre største ekstremhendelsene nevnt i avsnitt 5.1.2. En oppsummering av karakteristika ved hendelsene er gitt i Tabell 5 og en noe mer detaljert gjennomgang av hver hendelse er gitt i det videre. Det bemerkes at de analyserte hendelsene ikke nødvendigvis er hendelsene med størst avrenning ilt. måleperioden. Avrenning fra grønne tak er følsom for initialbetingelsene og mindre regnskylt kan ha forårsaket større avrenning om mediet var vannmettet før hendelsen.

Tabell 5: Oppsummering av maksimalavrenning og spesifikk avrenning for de tre takene ved de tre største identifiserte nedbørhendelse i måleperioden.

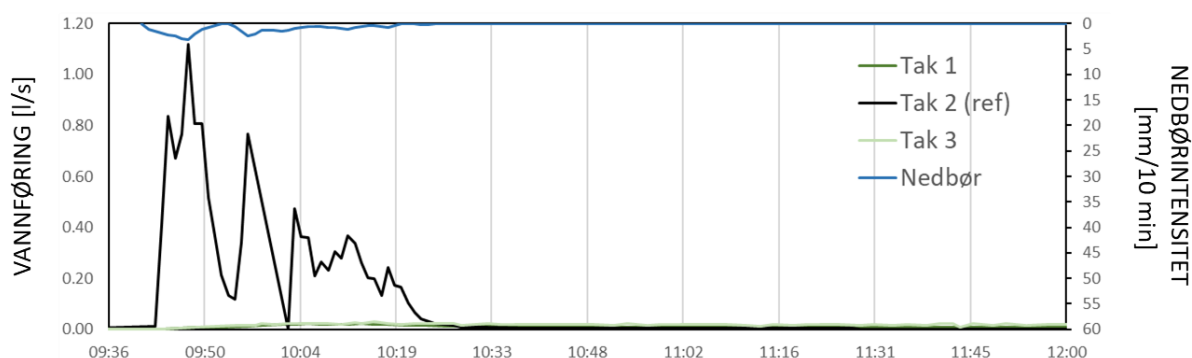
Dato	Initialbetingelser og beskrivelse	P [mm]	Tak 1		Tak 2 (ref)		Tak 3	
			Q_{maks} [l/s]	q [mm]	Q_{maks} [l/s]	q [mm]	Q_{maks} [l/s]	q [mm]
29.08.2019	Konvektiv sommerbyge (styrtregn) med estimert gjentakintervall på 20 år for 30 min varighet.	29.1	0.03	10.3	0.76	24.1	0.04	14.7
01.07.2022 – 04.07.2022	Initialbetingelser: 2 dager med tørrvær.	57.0	0.02	29.3	1.12	45.4	0.04	34.6
18.12.2022 – 24.12.2022	Store nedbørmengder som snø etterfulgt av en begrenset varm periode med snøsmelting og regn-på-snø.	123.8	0.01	2.4	0.02	21.4	0.01	2.9

Figur 11 og Figur 12 viser de to første ekstremhendelsene som har relativt like karakteristika (henholdsvis estimert gjentakintervall på 20 og 12 år for regnvarigheter på 30 og 45 minutter). Den maksimale avrenningen fra de grønne takene for hendelsene var i størrelsesorden 0.02 til 0.04 l/s og betydelig lavere enn maksimal avrenning fra referansetaket (0.76 og 1.12 l/s). I alle tilfeller viser dermed de grønne takene en svært god evne til å redusere spissavrenningen ved ekstremavrenning sammenliknet med referansetaket (95 til 98 % reduksjon). Flomdempnings-effektene er i samme størrelsesorden som verdier tidligere rapportert for grønne tak i Oslo (Braskerud, 2014). Ved å bruke verdiene i Tabell 5 kan det også beregnes at de grønne takene hadde en betydelig redusert

volumavrenningskoeffisient ila. hendelsene (0.35 til 0.61) sammenliknet med referansetaket (0.80 til 0.83). Årsakene til at volumavrenningskoeffisientene ikke er 1 for referansetaket kan være feil i målinger, fordampling ila. regnhendelsen samt at noe av nedbøren forsvinner ved å væte opp taket.

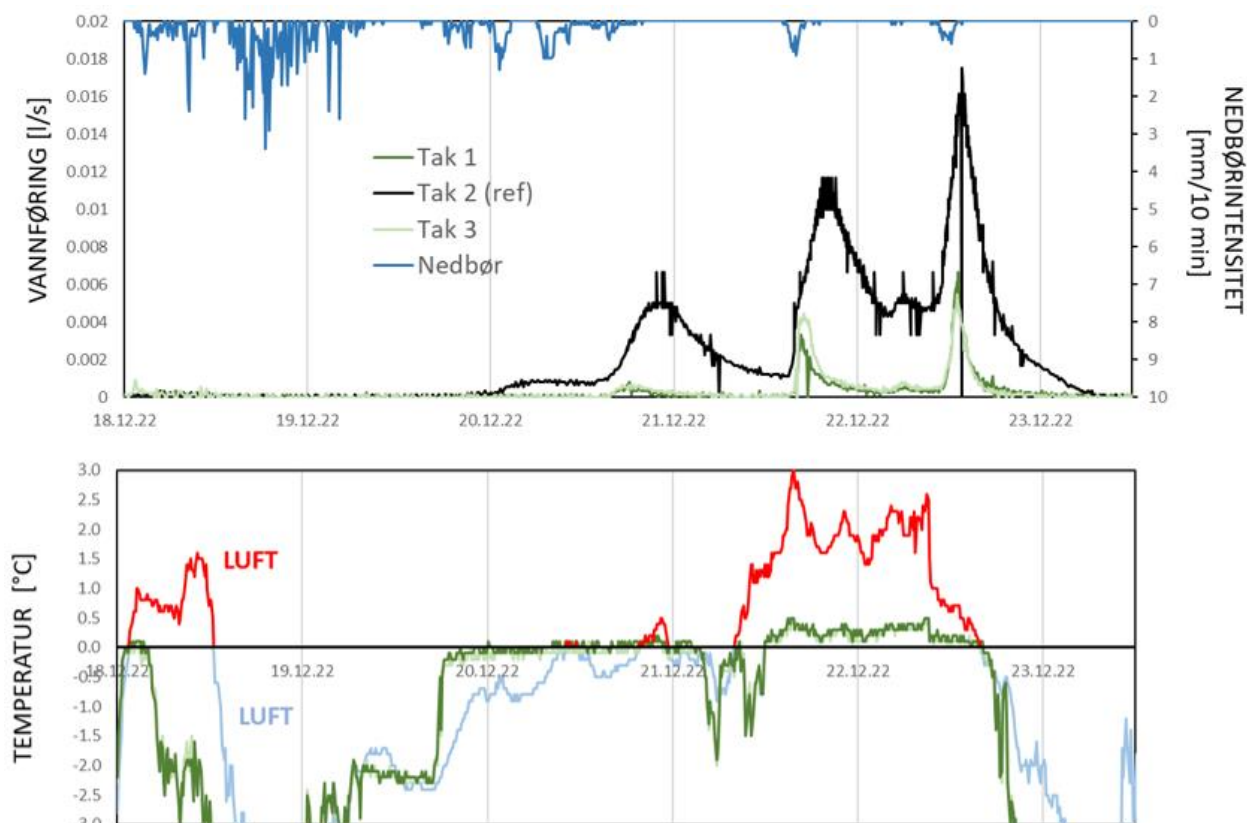


Figur 11: Nedbør og avrenning fra takene under ekstremhendelsen 29.august 2019.



Figur 12: Nedbør og avrenning fra takene under ekstremhendelsen 1.juli 2022.

Figur 13 viser ekstremhendelsen som inntraff i desember 2022. Sammenliknet med de to andre hendelsene har denne hendelsen en treg avrenningsrespons også på referansetaket. Det er derfor antatt at nedbøren hovedsakelig falt som snø og/eller som regn på snø gjennom hele hendelsen.

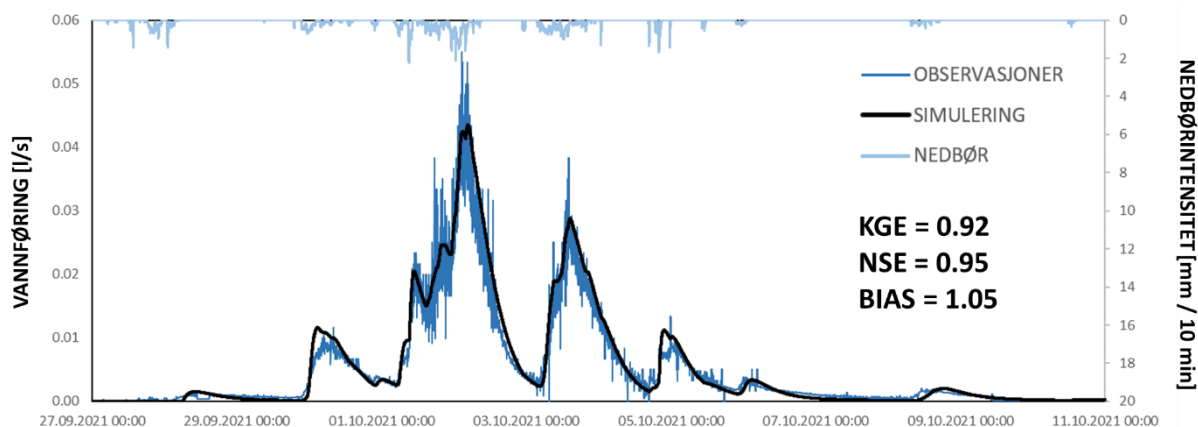


Figur 13: Nedbør og avrenning (topp) og temperatur (bunn) fra takene under ekstremhendelsen 18-24.desember 2022.

5.3 Kalibrering og validering av en hydrologisk modell

En tilnærming for å øke innsikten i ytelsen til de grønne takene på NMBU er å utvikle hydrologisk modeller. Slike modeller kan utarbeides i SWMM, DDDUrban eller annen programvare og må kalibreres og valideres for observasjonene knyttet til avrenning. Validerte modeller kan videre anvendes for flere formål, deriblant å vurdere fordrøyningseffekter for et langt større spekter av nedbørhendelser, utvikling i ytelse som følge av klimaendringer (temperaturer og nedbørintensiteter) samt å vurdere endringer i design for å øke ytelse.

For å undersøke potensialet for kalibrering av en hydrologisk modell, og spesielt vurdere om observasjonene knyttet til avrenning målt via volumkar har tilstrekkelig kvalitet, ble det utviklet og kalibrert en enkel modell for tak 3 i R-versjonen til SWMM (SWMMR). I SWMMR ble taket beskrevet som en såkalt *green roof* LID-modul og simulert med observerte nedbørverdier for perioden 17. september til 17. oktober 2021. Videre ble fordampning beskrevet ved å bruke Hargreaves metode og lokale målinger for lufttemperaturer. I SWMMR ble følgende parametere variert i kalibreringen: Overflatens mettede hydraulisk konduktivitet, avløpskoeffisienter for utløpet samt porøsitet i løsmassene. Kalibreringen ble utført via multiobjektiv optimalisering vha. NSGA-ii i R for Kling-Gupta-Efficiency (KGE) og Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE). Resultatet fra kalibreringen av modellen for taket er gitt i Figur 14 og antyder at avrenning målt ved volum har god nok kvalitet for kalibrering og validering av modeller. Simulert avrenning følger i stor grad observasjonene for avrenning (det vil si høye KGE og NSE-verdier), og SWMMR virker å ha evne til å både beskrive hydrogrammenes oppbygning mot toppene samt resesjonene. Det totale simulerte avrenningsvolumet stemmer også godt overens med observasjonene (bias = 1.05), som indikerer at vannbalansen er ivaretatt i modellen.



Figur 14: Kalibrering av SWMM-modell ved bruk av multiobjektiv-optimalisering via NSGA-ii for KGE og NSE. Kalibreringsperiode: 17. sep. – 17. okt. 2021. Endringsvariabler i kalibreringen omfattet mettet hydraulisk konduktivitet, avløpskoeffisienter for utløpet og porøsitet i løsmasser. Bias er definert som volum avrenning observert dividert på simulert.

6 Konklusjoner og videre arbeid

6.1 Konklusjoner

Foruten enkelte mindre driftsutfordringer, har forsøksanlegget fungert svært godt i perioden, men sedumvegetasjonen på de grønne takene er per i dag delvis fortrent av mose og annet ugress. Det er uklart hvilken virkning dette har hatt på takenes hydrologi, men det har sannsynligvis hatt mindre betydning. Mer regelmessig skjøtsel ville trolig kunne forebygget moseveksten.

Forsøksanlegget er godt instrumentert og har vært en svært verdifull kilde til masteroppgaver. Det er per sommeren 2023 gjennomført åtte masteroppgaver (10 studenter) knyttet til takene, med varierte problemstillinger. En gjennomgang av måledata fra takene viser at omtrent 27 % av nedbøren ble holdt tilbake i måleperioden. Dette er så vidt noe høyere enn ved forsøksstak i Oslo som ikke har det magasinerende LECA-laget. Videre har gjennomgangen vist at spissavrenningen ved større enkelthendelser reduseres med mer enn 95 % i de grønne takene sammenliknet med referansetaket.

6.2 Videre arbeid

Partene i samarbeidet vil høsten 2023 avgjøre hvilke endringer som eventuelt skal gjøres i anlegget i den nye avtaleperioden 2023 – 2027. Det synes avklart at ett av de grønne takene (trolig tak 3) vil forbli uberørt slik at man får en lengst mulig tidsserie med dagens takoppbygning. For det andre grønne taket, er det aktuelt å installere en form for styrt sluk og skifte ut LECA-massene med mer hydraulisk ledende masser slik at avrenningen kontrolleres av sluket mer enn av massene i seg selv. Det er uansett aktuelt å reetablere sedum eller annen egnet vegetasjon på de grønne takene. I så fall bør det etableres rutiner for mer regelmessig skjøtsel. Det er trolig rom for å gjøre forskning også på selve vegetasjonen i taket, og en ny PhD-student ved LANDSAM er interessert i dette. Det har vært diskutert å legge til kamera som tar bilder ved faste intervaller for å dokumentere vekstsesong og vegetasjonsendring over tid. Bruk av solceller på takene kan også være en aktuell forskningsmulighet.

Foruten forskningsmulighetene som ligger i en eventuell ombygging av anlegget, er det trolig potensiale for å gjøre mer forskning med de dataene som allerede samles inn, og også få dette publisert i internasjonale vitenskapelige tidsskrifter. Aktuelle temaer er:

- Enda grundigere statistiske analyser av de innsamlede dataene (uten hydrologisk modellering) og gjøre sammenlikninger med andre forsøkstak
- Grundigere modelleringsstudier med konseptuelle modeller, som SWMM, DDD m.fl.
- Grundigere modelleringsstudier med fysisk baserte modeller, som f.eks. MODFLOW
- I tilknytning til ovennevnte studier: Utnytte noen av de målingene som så langt ikke er benyttet i særlig stor grad (vektmålinger for vannbalanse; stråling, vind og temperatur for fordampning)
- I tilknytning til ovennevnte studier: Kartlegge vannretensjonskurven til LECA-materialet i laboratorium og bruke denne i modellering/tolkning av målingene
- Gitt at man sitter med godt kalibrerte og validerte modeller: Gjøre vurderinger av optimalt takdesign for å oppnå ønsket hydrologisk effekt

Det er trolig også rom for å bruke data fra takene mer aktivt i hydrologisk undervisning.

7 Referanser

- Al-Khayyat, N. M. N. (2023). [Hydrology of Green Roofs: Inverse Modelling in MODFLOW 6 for Estimating the Saturated Hydraulic Conductivity of a LECA Storage Layer](#). Masteroppgave ved REALTEK, NMBU.
- Bakke, M. C. (2020). [Løsninger for nedbørssimulerende vanningsanlegg på grønne tak](#). Masteroppgave ved REALTEK, NMBU.
- Bassøe, P. A. (2020). [Grønne tak med magasinerende sjikt: avrenning ved kontrollerte fyllingsforsøk og kalibrering av DDD-modellen](#). Masteroppgave ved REALTEK, NMBU.
- Braskerud, B. (2014) [Styrtregn og avrenning fra grønne tak med sedumvegetasjon](#). Vann 49 (4): 451–464
- Braskerud, B. og Paus, Kim H. (2022). [Retention of snowmelt and rain from extensive green roofs during snow-covered periods](#). *Blue-Green Systems* 4 (2): 184–196.
- Busklein, J. O. (2018). Water detention and hydraulic conductivity, LECA NC 0-6. SINTEF Report 2018:00307.
- Fordal, E. (2018). [Avrenning fra to grønne tak ved forskningsinfrastrukturen «Bia» i Ås kommune](#). Masteroppgave ved REALTEK, NMBU.
- Trommald, J. og Øyre, A. S. (2018). [Etablering av Bia, en forskningsinfrastruktur med grønne tak](#). Masteroppgave ved REALTEK, NMBU.
- Trommald, J., Nilsen, V. og Berg, R. (2019). Årsrapport 2018: Grønne tak, forskningsinfrastruktur i Landskapslaboratoriet. NMBU sak 17/06042-13.
- Ueland, J. S. (2018). [Effekten av Bia, en forskningsinfrastruktur med grønne tak, innledende studier](#). Masteroppgave ved REALTEK, NMBU.
- Viker-Walsøe, A. og Valle, J. S. (2020). [Grønne tak med magasinerende sjikt: hydrologisk effekt og avrenningsmodellering med DDD-modellen](#). Masteroppgave ved REALTEK, NMBU.
- Ydse, I. K. (2021). [Simulering av avrenning fra grønne tak med magasinerende sjikt](#). Masteroppgave ved MINA, NMBU.