

Klima 2050 og testing av blågrønne tak på Høvringen

Av Edvard Sivertsen, Noëlie Maurin, Berit Time og Tone Merete Muthanna

Edvard Sivertsen (Dr.ing.) er seniorforsker ved SINTEF Community.

Noëlie Maurin er masterstudent ved Institut National des Sciences Appliquées Lyon (INSA Lyon) og praktikant ved SINTEF Community.

Berit Time (Dr.ing.) er sjefforsker ved SINTEF Community.

Tone Merete Muthanna (Ph.D) er professor ved Institutt for bygg- og miljøteknikk, NTNU.

Summary

Klima 2050 and testing of green roofs at Høvringen.

Green roofs have been a central research topic in Klima 2050, where the field station at Høvringen in Trondheim has played a particularly important and unifying role. Through five doctoral theses and a series of master thesis the performance of the green roofs has been evaluated, and their performance documented. The main focus has been on extend the knowledge and understanding of the roof performance with respect to stormwater runoff and water management. The design and material choices have also been a focus from the point of view of minimizing the risk of damage to the underlying structures of the building.

Sammendrag

Blågrønne tak har vært et sentralt forsknings-tema i Klima 2050 der feltstasjonen på Høvringen utenfor Trondheim har spilt en særlig viktig og samlende rolle. Gjennom fem doktorgradsarbeider og forskjellige masteroppgaver er seks ulike blågrønne tak testet og ytelsen dokumentert. Hovedfokus har vært på å forstå egenskapene til å håndtere mengden overvann på taket, men vi har også sett på hvordan man kan minimere skadene på underliggende bygning.

Innledning

Byvekst, fortetting og klimaendringer gir økt press på eksisterende avløpssystemer. De naturlige avrenningsmønstrene endres noe som gir konsekvenser for blant annet grunnvannsnivå og vannføring i by-vassdrag. En måte å redusere disse uheldige konsekvensene på er å basere overvannshåndtering på naturens prinsipper for håndtering av vann. Blågrønne tak er et eksempel på slike overvannstiltak, som har den fordel at de plasseres på taket og dermed ikke tar opp andre areal i tettbebygde områder. Blågrønne tak håndterer overvann på to måter: 1) Med fordøyning av overvann, også kalt detensjon, som er den naturlige forsinkelsen som skjer når vann renner igjennom ulike lag og media og dreneres sakte ut fra taket i løpet av timer og dager etter en regnhendelse. 2) Med retensjon som er mengden vann som aldri drenerer ut, men som taket forbruker gjennom fordampning og transpirasjon fra vegetasjon som er en del av takløsningen. Samlet kalles fordampning og transpirasjon for evapotranspirasjon. For å inkludere disse effektene til blågrønne tak i overvannsberegninger har det vært behov for økt kunnskap om hvordan blågrønne tak virker i norsk klima, som er både våtere og kaldere enn andre steder der blågrønne tak tradisjonelt har vært brukt.

Klima 2050 og pilotprosjektet Høvringen

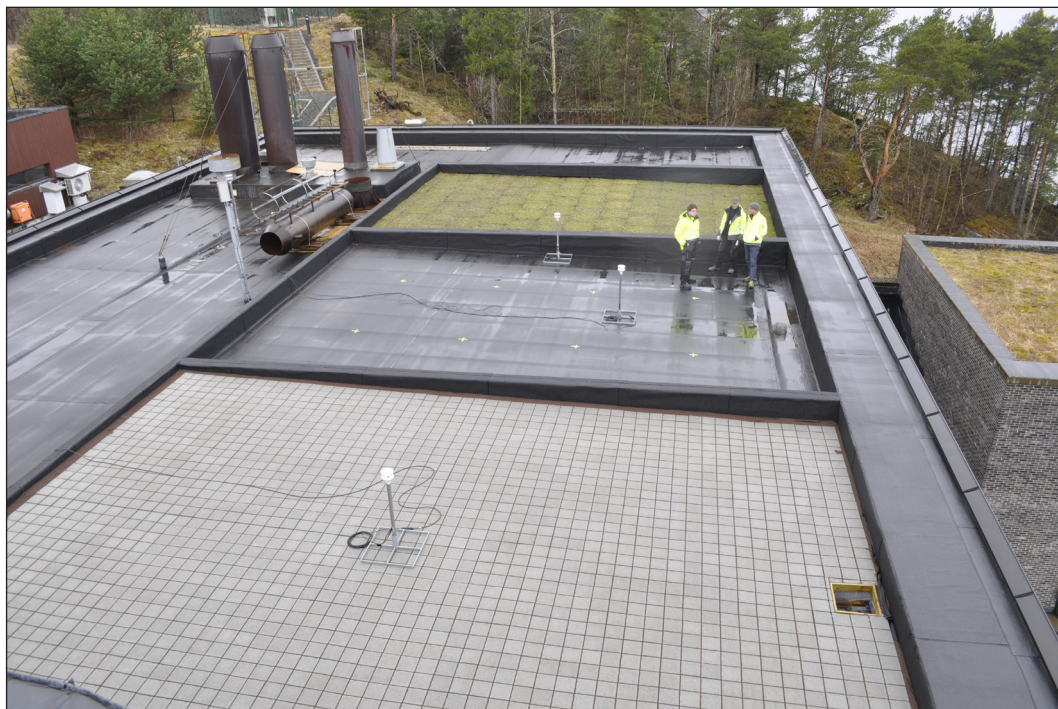
Klima 2050 har vært et senter for forskningsdrevet innovasjon (SFI). Senteret startet opp i 2015 og ble avsluttet i mars 2023. Klima 2050 har hatt som målsetning å redusere samfunnsrisiko på det bygde miljø og har blant annet jobbet med overvannshåndtering. Et viktig instrument i Klima 2050 har vært etablering av pilotprosjekter der vi har testet nye løsninger sammen med partnerskapet. Et sentralt pilotprosjekt har vært Høvringen som er en feltstasjon for fullskala testing av blågrønne løsninger, se Figur 1.

Feltstasjonen er plassert på taket til Trondheim kommune sitt avløpsrenseanlegg på Høvringen utenfor Trondheim sentrum og består av tre store forsøksfelt. Feltstasjonen er utstyrt med egen meteorologisk målestasjon og et avansert opplegg for måling av mengde vann som passerer slukene fra hvert av forsøksfeltene. Vi har kunnet måle hele spennet fra drypp til ekstremnedbør.

Pilotprosjektet Høvringen og testing av ulike blågrønne takløsninger har vært utgangspunkt for fem doktorgradsarbeider i Klima 2050 (Johannessen, 2019; Hamouz, 2020; Andenæs, 2021; Abdalla, 2023; Pons, 2023). En kort presentasjon av de vitenskapelige arbeidene er også laget (Sivertsen m.fl., 2023).

Løsninger som er testet på Høvringen

Navnet **blågrønne** tak henspiller på det **grønne** elementet fra ekstensive grønne tak der man i tillegg også har inkludert et element for å øke kapasiteten til å håndtere det **blå** overvannet. Disse fargeangivelsene kan fort bli forvirrende, særlig hvis man tester løsninger med samme overvannshåndteringsmekanismer, men som ikke inkluderer for eksempel grønne plantevekster. Vi har derfor angitt de ulike blågrønne takløsningene vi har testet ved å bruke betegnelsen **fordrøyende tak** sammen med en spesifisering av toppdekket. På Høvringen er det testet tre generasjoner fordrøyende tak med i alt



Figur 1. Høvringen feltstasjon for testing av fullskala blågrønne løsninger. Foto: Tore Kvande (NTNU).

Tabell 1. Ulike takløsninger testet på Høvringen i perioden 2016-2023.

Generasjon	Testfelt 1	Testfelt 2	Testfelt 3
1 (2016-2018)	Fordrøyende tak med betongstein som toppdekke: – Betongstein – 200 mm lettklinker	Svart tak (referanse)	Fordrøyende tak med sedum som toppdekke: – Sedum – Magasinerings- og dreneringsplate
2 (2018-2021)	Fordrøyende tak med betongstein som toppdekke: – Betongstein – 100 mm lettklinker	Svart tak (referanse)	Fordrøyende tak med sedum som toppdekke: – Sedum – 100 mm lettklinker
3 (2021-2023)	Fordrøyende tak med gress som toppdekke: – Gress (ferdigplen) – 100 mm jord – 100 mm lettklinker	Svart tak (referanse)	Fordrøyende tak med sedum som toppdekke: – Sedum – Magasinerings- og dreneringsplate

seks ulike løsninger, se Tabell 1. Testfelt 2 har alltid vært et svart tak som har fungert som referanse.

I tillegg til løsningene som er testet på Høvringen, er resultater fra forsøksanleggene som er bygget i Oslo, Bergen, Sandnes og Trondheim analysert av flere av doktorgradsarbeidene. Her er hvert forsøksanlegg delt inn i flere ulike mindre felt med oppbygninger tilsvarende typiske standardløsninger levert av ulike produsenter av grønne tak, men takflatene er små sammenlignet med takflatene på testfeltene på Høvringen. Vi vil ikke gå nærmere inn på resultatene fra disse takene her, men spesielt interesserte henvises til f.eks. Johannessen (2019).

Målt fordroyning

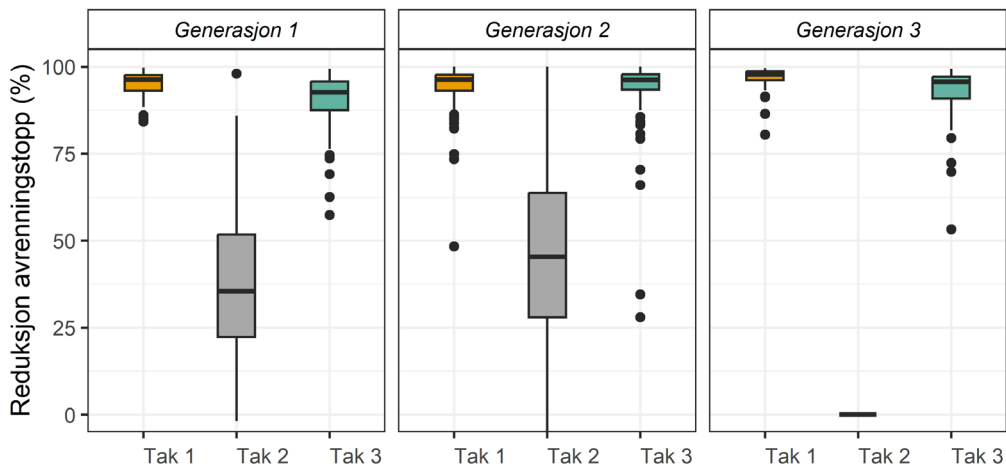
For hver generasjon av løsninger testet på Høvringen er det hentet ut regnhendelser i snøfrie perioder og analysert for reduksjon i avrenningstoppen og sentroidforsinkelse fra de forskjellige takene i forhold til målt nedbør. For den første generasjonen ble det registrert 57 hendelser i løpet av åtte 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, der Figur 2 viser et boksplokk over målt reduksjon i avrenningstopp og Figur 3 viser tilsvarende statistikk for målt sentroidforsinkelse. Det er knyttet en del usik-

kerhet til målingene fra tak 2 under tredje generasjon, så disse resultatene er ikke beregnet.

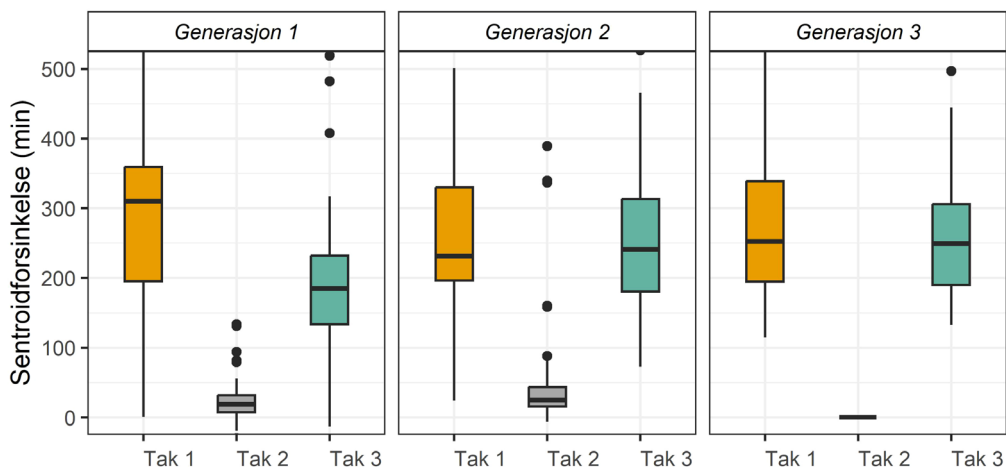
Boksplokkene i Figur 2 og 3 viser medianen (tykk strek), 25 % persentilen og 75 % persentilen (øvre og nedre del av den fargede boksen), viskere som er et uttrykk for naturlig variasjon, mens punktene over og under viskerne er verdier som ligger utenfor det som er antatt å være normal fordeling av hendelsene. 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. Går en litt mer i detalj, kan det bemerkes at løsningen testet på tak 1 i første generasjon har antatt høyest fordryningsvolum, noe som gjenspeiles i den høyeste sentroidforsinkelse, mens løsningen testet på tak 3 i første generasjon har minst fordroyning. 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 i resultatene for sentroidforsinkelse.

Målt retensjon

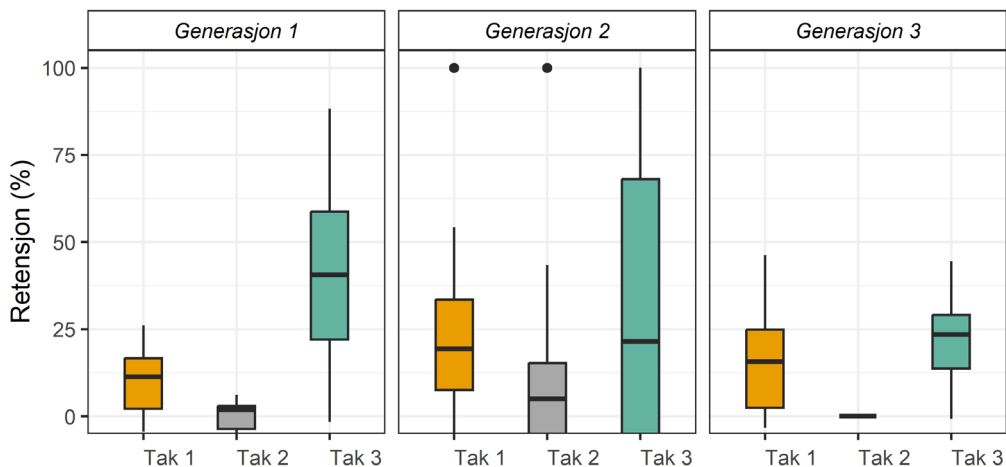
De samme dataene som ble brukt til å beregne fordroyningsegenskaper (måneder uten snøpåvirkning) er også brukt til å beregne månedlig retensjon. Figur 4 viser statistikk for månedlig retensjon for de ulike løsningene. Her er det en



Figur 2. Oppsummering målt reduksjon avrenningstopp, se Tabell 1 for detaljer om de ulike løsningene.



Figur 3. Oppsummering målt sentroidforsinkelse, se Tabell 1 for detaljer om de ulike løsningene.



Figur 4. Oppsummering målt retensjon, se Tabell 1 for detaljer om de ulike løsningene.

tydelig trend at løsninger med vegetasjon har som forventet høyere retensjon som følge av evapotranspirasjon, mens alle løsningene viser noe fordampning.

Ekstremtesting

Vi har også testet en av løsningene under ekstremforhold med en regnsimulator, se Figur 5. Det blågrønne taket som bestod av sedum og et lag med 100 mm lettklinker ble benyttet i testen (generasjon 2, testfelt 3 i Tabell 1). Det ble benyttet nedbørintensiteter tilsvarende 20 til 200 års returperioder for byene Trondheim, Bergen og Oslo.

Flere interessante observasjoner ble gjort under ekstremtestingen og for detaljer henvises til Hamouz m.fl. (2020). For det første ble det observert at konsentrasjonstiden til det blågrønne taket varierte med nedbørsintensiteten. Konsentrasjonstid er den tiden det tar fra en hendelse starter til hele taket bidrar til avren-

ningen. Dette ble målt ved å ta tiden fra man startet en nedbørshendelse med konstant intensitet til det ble konstant avrenning ved utløpet. Ulike blågrønne tak vil ha forskjellige konsentrasjonstid avhengig av flere faktorer som oppbygning av de ulike lagene, egenskaper til det fordøyende laget, størrelse og helning på taket. Konsentrasjonstiden vil også være avhengig av hvor mye vanninnhold det er i taket ved start og nedbørsintensiteten. Vi målte konsentrasjonstiden for både det svarte referansetak og det nevnte blågrønne taket med toppdekke av sedum og et underliggende lag med lettklinker og sammenlignet. Konsentrasjonstiden til det svarte referansetak ble målt til rundt 5 minutter og var uavhengig av nedbørintensitet, mens konsentrasjonstiden til det blågrønne taket ble funnet å være omvendt proporsjonal med nedbørsintensiteten og varierte mellom 90 minutter og 30 minutter for intensiteter mellom 0.8 og 2.5 mm/min.



Figur 5. Regnsimulator på Høvringen. Foto: Edvard Sivertsen (SINTEF)

En annen interessant observasjon fra forsøket er at avrenningskurven etter en hendelse fra et tak nær metningspunktet var omtrent lik for alle hendelsene. Dette gjør at tømmetiden fra en hendelse til taket er «regenerert» og klar til å ta i mot en ny hendelse kan beskrives med en matematiskfunksjon. Figur 6a viser median-kurven og 5% og 95% persentilene for 14 hendelser, og viser at avrenningskurven varierer lite. Det kan også kommenteres at avrenningskurven viser tydelig to mekanismer som kan tilskrives det fordrøyende laget, først ser vi en rask avrenning av vannet som er lagret mellom lettklinkerpartiklene og etter hvert overtar en langsom avrenning av vannet som er absorbert i lettklinkermaterialet.

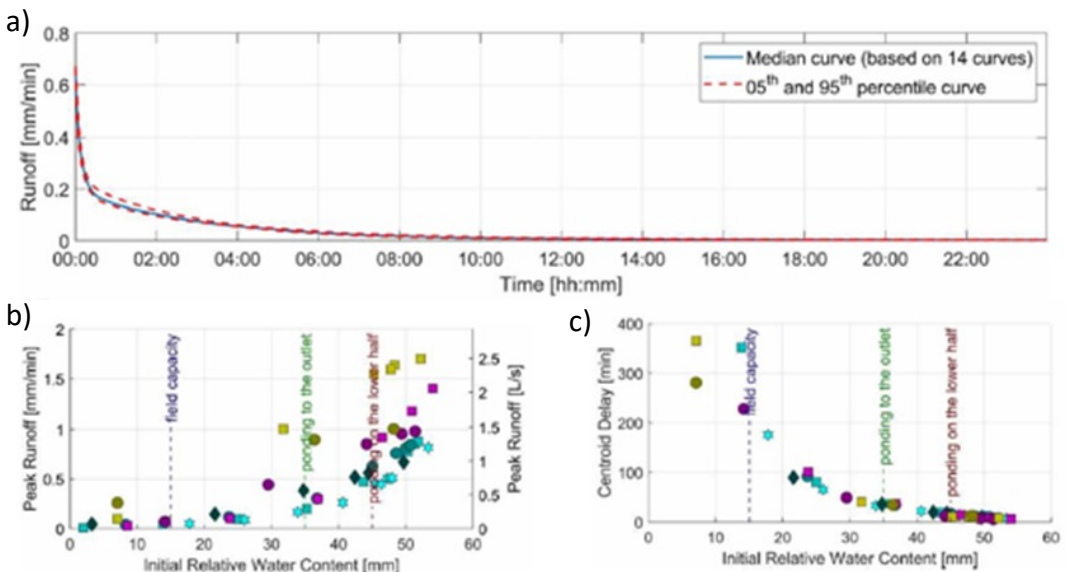
Figur 6b viser avrenningstoppen mens Figur 6c viser sentroidforsinkelsen som funksjon av det relative vanninnholdet i taket ved start av hendelsen. Merk at det er snakk om «ekstreme» hendelser med returperiode mellom 20 og 200 år. Vi ser at avrenningstoppen øker betraktelig når vanninnholdet ved starten av hendelsen øker, men effekten gjør seg gjeldende først når det starter å stuves opp vann ved utløpet. Sentroidforsinkelsen har en motsatt trend og

avtar med økende vanninnhold ved starten av hendelsen. Det er også verdt å merke seg at avrenningstoppen er liten, mens sentroidforsinkelsen er betydelig ved takets feltkapasitet.

Vi kan også nevne at studien viste at nedbørsprofil, regnintensitet og varighet har liten effekt på indikatorene sentroidforsinkelse og T50, som dermed er mer robuste indikatorer for å si noe om kapasiteten til å håndtere overvann.

Avrenningskoeffisienter

I en annen studie ble avrenningskoeffisienten fra vanlige komponenter i typiske blågrønne tak målt med standardtest i laboratoriet (se Figur 7) og sammenlignet med målte avrenningskoeffisienter på Høvringen (Schärer m.fl., 2020). Materialene ble testet individuelt og i samme kombinasjon som i oppbygningen av vanlige 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 veldig ekstrem hendelse i Norge, over 100 års gjentakintervall for Oslo, Bergen og Trondheim. I tillegg ble en 15 minutters nedbørshendelse på 11,4 mm brukt som er mer relevant



Figur 6. Avrenningskurve (gjennomsnitt med 5% og 95%-persentilene) som funksjon av tid (a), avrenningstopp (b) og sentroidforsinkelse (c) som funksjon av vanninnhold i taket ved start (fra Hamouz m.fl., 2020).

regnhendelse for norske forhold. Denne tilsvarer 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.

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 ulike oppbygningene av blågrønne tak som ble testet, mens de observerte avrenningskoeffisientene fra felt varierte fra 0,02 til 0,41. Forskjellen i avrenningskoeffisienten målt på lab og i felt kan forklares med flere faktorer, der fuktighet i substratet på taket ved start av nedbør, luftfuktighet, temperatur og vind vil påvirke avrenningskoeffisienten målt i felt. Den store variasjonen i målte avrenningskoeffisienter på lab og i felt illustrerer utfordringene med å beregne effekten av blågrønne tak med en enkel avrenningskoeffisient. Metoden gir en beregning for maksavrenning, men dette er bare delvis nyttig for prosjektering av blågrønne tak og det anbefales å bruke mer avanserte dimensjoneringsmodeller.

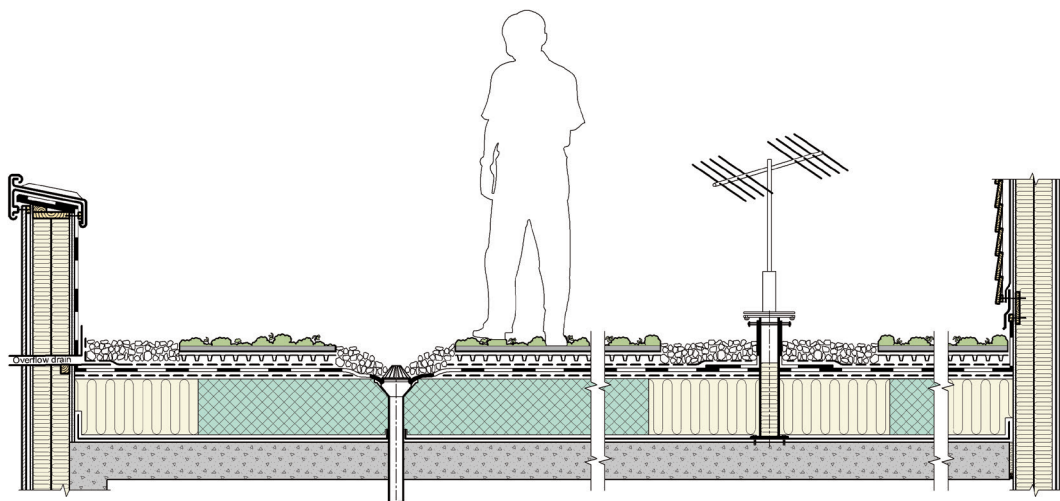
Risikohåndtering

Andenæs har gjennom sitt doktorgradsarbeid utviklet et støtteverktøy for risikovurdering ved utvikling og bygging av blågrønne tak (Andenæs, 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 «sjekk-punkter» for viktige avgjørelser for organisering av prosjektet, klare grensesnitt og tydelig plassering av ansvar. Figur 8 viser en prinsippskisse for en takkonstruksjon som inkluderer et blågrønt tak. Denne typen tak er prinsipielt enkle i oppbygningen, men de inngår i større takkonstruksjoner som ofte er komplekse med mange detaljer og grensesnitt der feil lett oppstår. Vi kan trekke fram tre forhold man bør tenke spesielt igjennom ved utvikling og bygging av blågrønne tak; i) hvordan unngå skader på taktekkning under bygging (Andenæs et al. 2022), ii) hvordan håndtere utvendig taknedløp og iii) hvordan påvirker regnkjøling isolasjonen ved omvendte tak.

Tak på store bygninger blir oftest bygget som såkalte kompakte, flate tak. Takkonstruksjonen for slike tak er bygget opp lagvis med materialer



Figur 7. Laboratorieoppsett for å måle avrenningskoeffisienter etter standardmetode. Foto: Lotte Askeland Schärer.



Figur 8. Blågrønne tak har enkel oppbygning, men inngår i større takkonstruksjoner som gir mulighet for mange misforståelser og feil i grensesnitt mellom fag (Illustrasjon: Klima 2050).

som ligger tett oppå og inntil hverandre. I slike tak oppstår det en naturlig varmestrøm. Varmestrømmen gjennom taket kan gi snøsmelting på taket, selv når det er minusgrader i lufta, siden snøens varmeisolerende egenskaper gjør at det kan bli varmere enn null grader nede ved takmembranen. Derfor bygges kompakte tak normalt med innvendige nedløp, som er frostfrie helt ned i grunnen. Denne løsningen er bygningsteknisk god, men er i konflikt med lokal og åpen overvannshåndtering med frakopling av taknedløp. Å forene kompakte tak og utvendige nedløp byr på visse utfordringer. Når smeltevann ledes vekk fra taket og det er minusgrader ute, kan vannet fryse på nytt. Da dannes issvuller, istapper og det oppstår fare for frostskafer på takrenne og -nedløp. Tema er nærmere beskrevet i Skagseth et al (2021).

Omvendte kompakte tak er en type tak som gir bedre beskyttelse av membranen fra hyppige temperatursvingninger og mekaniske belastninger sammenlignet med rettvendte kompakte tak. Men dersom blågrønne tak blir bygget som omvendte tak, kan isolasjonen utsettes for ekstra stor fuktbelastning, som kan medføre at taket isolerer dårligere enn det som ble prosjektert (Bunkholt et al. 2022). Det er derfor viktig å ta hensyn til den faktiske isolasjonsevnen når man kombinerer omvendte tak med blågrønne tak.

Konklusjon

SFI Klima 2050 har dokumentert at ulike blågrønne tak bidrar til å håndtere overvann i urbane områder, spesielt er reduksjon i avrenningstoppen høy og sentroidforsinkelsen lang. Ved hjelp av ekstremtester har vi også økt forståelsen om hvordan slike tak påvirkes av regnintensitet og takets tilstand ved starten av hendelsen. Videre er det utviklet verktøy for å minimere risikoen for skade på underliggende bygning når blågrønne tak skal benyttes.

Referanser

Abdalla, E.M.H.: Developing design tools for green stormwater infrastructures in cold climates. Submitted Doctoral theses at NTNU, 2023.

Andenæs, E: Risk assessment of blue-green roofs. Doctoral theses at NTNU, 2021:333, Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering. ISBN: 978-82-326-6596-9

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

Bunkholt NS, Andenæs E, Time B & Kvande T: Omvendte kompakte tak. Varmetap på grunn av regn- og smeltevann. Klima 2050 Report 37. Trondheim 2022. ISBN 978-82-536-1768-8

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

Hamouz V, Pons V, Sivertsen E, Raspati GS, Bertrand-Krajewski JL & Muthanna TM: 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:10.2166/bgs.2020.101

Hamouz, V: Retention and detention-based roofs for stormwater management in urban environments in cold climates. Doctoral theses at NTNU, 2020:305, Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering. ISBN: 978-82-326-4958-7

Johannessen, B.G: Investigating the use of extensive green roofs for reduction of stormwater runoff in cold and wet climates. Doctoral theses at NTNU, 2019:99, Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering. ISBN: 978-82-326-3796-3

Pons, V.: The Future of Green Infrastructure: From climate data and scenarios to informed hydrological performance. Submitted Doctoral theses at NTNU, 2023.

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

Sivertsen E, Bruaset S, Maurin N, Abdalla E, Raspati G: Overvannshåndtering med fordøyende tak. Klima 2050 Report 47. Trondheim 2023.

Skagseth VA & Andenæs E: Kompakte tak med utvendige nedløp og risiko for isdannelse. Byggeindustrien 17/2021 s 28

Kalk skaper balanse i vannbehandling

Teknisk utstyr & Filtermateriale

Kontakt:
Franzefoss Minerals AS
 Sven Fürstenberg, 48 14 25 57
 sven.furstenberg@kalk.no

www.kalk.no



Aqua Balance

