

Avrenning fra ekstensive grønne tak i snødekte perioder

Av Bent C. Braskerud og Kim H. Paus

Bent C. Braskerud (Ph.D) er sjefsingeniør i Oslo kommune.

Kim H. Paus (Ph.D) er førsteamanuensis ved NMBU.

Summary

Run-off from extensive green-roofs during periods with snow cover. Green roofs are a popular way to include nature in an urban environment. How is runoff from green roofs in the cold and snow-covered part of the year, when growth media freeze, plants are dormant and covered with melting snow? This paper investigates 11 years of runoff from three green extensive roofs in Oslo, Norway. Precipitation through the snow-covered period (SCP) was approx. 1/3 of the annual precipitation (970 mm). When runoff from green roofs is compared to runoff from a non-vegetated bitumen roof, a retention of 16-31% is seen through the SCP, depending on drainage system, fabric, soil quality and depth. The difference in buildup did not influence the detention of the largest runoff intensities. Dampening the runoff happened even though the substrate was saturated. The runoff from the bitumen roof always exceeded the runoff from the green roofs. As a result, harmful inundation may be reduced in a part of the year when infiltration is restricted due to frost.

Sammendrag

Grønne tak er en populær måte å inkludere naturen i et urbant miljø. Mens grønne taks ytelse er godt dokumentert i sommerhalvåret er det fremdeles ubesvarte spørsmål til vinterhalvåret. Eksempelvis, hvordan er avrenning fra

grønne tak i den kalde og snødekte delen av året, når vekstmedier fryser, planter er sovende og dekket med smeltende snø? Denne artikkelen gjennomgår 11 år med avrenningsdata fra tre grønne tak i Oslo. Nedbør gjennom perioden da takene var dekket av snø utgjorde ca. 1/3 av årsnedbøren. Når avrenning fra grønne tak sammenlignes med avrenning fra et ikke-vegetert bitumentak, ble det funnet en volumreduksjon på 16-31% gjennom den snødekte perioden, avhengig av det grønne takets oppbygning. Forskjellen i oppbygging påvirket ikke tilbakeholdingen av de største avrenningsintensitetene. Demping av avrenningen skjedde selv om underlaget var vannmettet. Avrenningen fra bitumentaket oversteg konsekvent avrenningen fra de grønne takene. Som et resultat kan skadelig oversvømmelse reduseres i en del av året når infiltrasjon på bakkenivå er begrenset på grunn av frost.

Innledning

Mens flere studier har blitt utført for å evaluere ytelsen til grønne tak i varme klima, eller i de frostfrie periodene, er det manglede kunnskap om grønne taks ytelse i vintersesongen for kalde, tempererte områder. Om vinteren i kalde områder fryser normalt vekstmediet og snø akkumuleres over flere måneder. De fleste studier på grønne tak i kaldt klima har ekskludert episoder

med nedbør som snø og snøsmelting fra analysene (f.eks. Carson et al., 2013; Squier-Babcock og Davidson, 2020). Studier som inkluderer snøfrie vintersesonger rapporterer imidlertid ofte at tilbakeholdingen er redusert i vinterhalvåret (f.eks. Mentés et al., 2006; Squier-Babcock og Davidson, 2020), selv om det ikke er observert noen forskjell for lave nedbørintensiteter (Carson et al., 2013). Det er flere årsaker til mindre tilbakeholding om vinteren, men fraværet av evapotranspirasjon (ET) og en annen nedbørsfordeling blir ofte sett på som viktige faktorer (Mentés et al., 2006; Johannessen m.fl., 2017; Kuoppamäki, 2021). I en gjennomgang av grønne tak i kaldt temperert klima, fremhever Sysoeva og Gelmanova (2020) kunnskapshullet om grønne taks evne til å holde på vann under vinterforhold.

Solinstråling, lufttemperatur, fuktighet og vindhastighet er de viktigste faktorene som påvirker snøsmeltingen. Mens både nedbør som regn og grunnvarme påvirker snøsmeltingen, regnes de som mindre viktige (Otnes og Ræstad, 1978): For eksempel frigjør kondensering av 1 mm vanddamp 7,5 mm smeltevann, mens 10 mm regn ved 8 °C bare frigjør 1 mm. I denne artikkelen har vi definert *den snødekte perioden* fra første snøfall om høsten til siste snø er smeltet på taket om våren.

Hypotese

Gitt de frosne forholdene og sovende vegetasjon, er vår forventning at grønne, ekstensive tak har minimal effekt på varig eller midlertidig tilbakeholding av nedbør under den snødekkede perioden av året sammenlignet med tradisjonelle ikke-vegeterte tak.

Denne artikkelen gjennomgår noen av hovedfunnene i en artikkel publisert av Braskerud og Paus (2022).

Metoder

Forsøksstedet ligger i Oslo, ca. 210 moh (59°58'02"N, 10°44'81"E), og er et tak på en egen garasje med takstørrelse 24 m² og skråning 5,5% ("flatt tak"). Taktypen er en svart bitumenmembran. Garasjetaket er delt i tre 8 m² forsøks-

ruter med separate grønne tak konfigurasjoner (figur 1).

- Tak 1: Vegetasjonsmatte over et 25 mm dreneringslag av polyetylen (HDPE) fra 2009-11. På grunn av tørkestress ble det sommeren 2011 lagt en 10 mm filt mellom vegetasjonsmatten og dreneringslaget. Total høyde 65 mm + vegetasjon. Teoretisk vannlagring basert på Johannessen m.fl. (2018): 19 mm.
- Tak 2: Ikke vegetert fra 2009-2014 og fungerte som referanse de første 5 årene. Sommeren 2014 ble tak 2 vegetert med en vegetasjonsmatte over et vekstmedium på 40 mm, en filterduk (0,4 mm) over en eggekartong aktig drenering (20 mm). En 5 mm filt ble plassert mellom dreneringslaget og bitumentaket. Den totale dybden på det grønne taket er 125 mm + vegetasjon. Teoretisk vannlagring er 24 mm.
- Tak 3: Vegetasjonsmatte over en 10 mm filt. Total høyde 40 mm + vegetasjon. Teoretisk vannlagring: 13 mm.

Takene er videre omtalt som GR1 (grønt tak 1), GR2 (grønt tak 2 i perioden 2014 - 2021), GR3 (grønt tak 3) og REF (tradisjonelt ikke-vegetert tak i perioden 2009 - 2014).

Detaljer om oppsamling av smeltevann, nedbør, jordfuktighetsmålere, luft- og jordtemperaturmålere er beskrevet i Braskerud (2014) og Braskerud og Paus (2022). Observasjonene blir presentert som timesverdier.

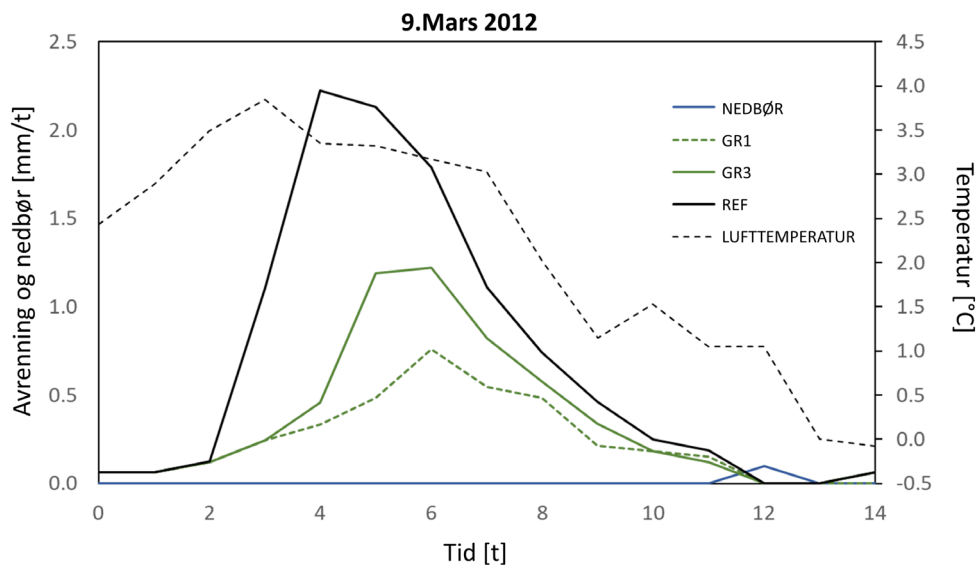
Resultater og diskusjon

Den snødekkede perioden varierte fra 104 til 192 dager, dvs. over 6 måneder på det meste (median 156 dager). Den gjennomsnittlige lufttemperaturen var - 5,8 °C de to første sesongene, men avtok gradvis igjennom perioden og var ca. 0 °C de siste årene. Det betyr at snødekket kom og gikk flere ganger i løpet av den snødekte perioden.

I den snødekte perioden var den gjennomsnittlige avrenningen høyere fra REF enn fra de grønne takene (henholdsvis 16 og 19 % sammenlignet med GR3 og GR1). Dette endret seg til det



Figur 1. Forsøksfeltet er en garasje med 3 felt på 8 m² hver (Foto: 3. mars 2011).

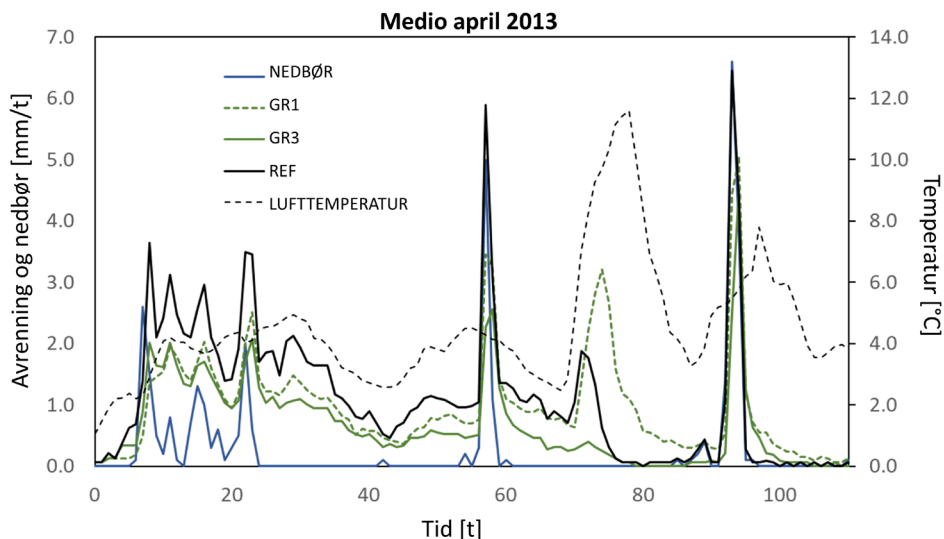


Figur 2. Snøsmelting og avrenning fra det tradisjonelle taket (REF) og de to grønne takene (GR) fulgte lufttemperaturene ganske tett. Snødybden gikk ned fra 5 cm i begynnelsen av episoden til 0 cm på slutten. Den relative reduksjonen i avrenning var 66 % for GR1 og 45 % for GR3. Gjennomsnittlig vanninnhold i substratet var 20 og 25 % for henholdsvis GR1 og 3. Feltkapasiteten til de grønne takene ble nådd siden avrenningen hadde startet før avrenningstoppene.

motsatte da REF ble dekket av vegetasjon (GR2). For de siste 6 sesongene hadde GR2 mindre avrenning enn GR1 og GR3. GR2 har en oppbyggingsdybde 2-3 større enn de andre takene. Hvis avrenning for GR1 og GR3 er 16-19% mindre enn et standard bitumentak, og avren-

ning fra GR2 er 8-12% mindre enn de to andre, vil et grønt tak med dybde 125 mm fjerne 24-31% av nedbøren i den snødekte perioden av året.

Lufttemperatur og nedbør påvirker avrenning fra snødekte tak. Figur 2 viser hvordan



Figur 3. Avrenning fra takene i midten av april 2013 ble forsterket av nedbør som regn. Avrenningen fra de grønne takene ligger med ett unntak i time 75, lavere enn fra REF. Snødybden på takene var 30 cm i begynnelsen av episoden og nådde 0 cm etter ca. 70 timer på GR3 og etter 80 timer på GR1 og REF. I time 75 er det mer snø på GR1 enn på REF. Av den grunn gir det varme været mer avrenning fra det grønne taket. Den siste toppen ved time 95, var en effekt av nedbør alene. Selv om de grønne takene er vannmettede, er det en viss reduksjon på avrenningen. Avrenning fra referansen følger nedbørmåleren. Den totale avrenningen var 15% og 40% mindre fra henholdsvis GR1 og GR3, sammenlignet med taket uten vegetasjon.

temperaturen alene påvirket avrenning fra takene når det var et 5 cm snødekke i mars. Figur 3 viser snøsmelting og nedbør som regn på et tak med 30 cm snø.

Den største avrenningsintensiteten når snø var akkumulert på takene skjedde i midten av april under den snødekte perioden i 2012/13 på REF (tabell 1 og figur 3). Avrenningen ble i hovedsak generert via snøsmelting da bare 7 mm regn ble observert. Avrenningen fra de grønne takene GR1 og GR3, var ganske likt for maksimal daglig avrenning gjennom studien (tabell 1, gjennomsnittlig henholdsvis 29,8 og 29,4 mm / dag).

Maksimal avrenning fra REF oversteg konsekvent avrenningen fra de grønne takene i samme periode (gjennomsnittlig 34 mm/dag sammenlignet med 25 mm/dag) og var statistisk signifikant ($p < 0,02$). For GR2, som ble etablert sommeren 2014, hadde taket mindre maksimal avrenning sammenlignet med GR1 og GR3. Forskjellen var imidlertid liten (gjennomsnittlig 29,7 mm/dag mot 31,2 mm/dag), og ikke statistisk signifikant.

Hvis alle observasjoner sorteres etter størrelsen på avrenningen og grupperes i den snødekte perioden (SDP) med lufttemperaturer under og over 0 grader, får vi kumulative frekvenser av timenedbør og avrenningsintensiteter fra takene i hele de snødekte periodene. Tabell 2 viser nedbør og avrenning fra persentilene 95, 99 og 100%. Som forventet er avrenningsintensiteten svært avhengig av om lufttemperaturen er under eller over frysepunktet. Mens det kun genereres beskjedne mengder avrenning fra takene i perioder med lufttemperaturer under 0 °C, overstiger avrenningsintensiteten nedbøren i perioder med temperaturer over 0 °C (tabell 2).

Stort sett ser vi at nedbør og avrenning fra det tradisjonelle taket (REF i tabell 2) er høyere enn fra de grønne takene. I den snødekkede perioden kan avrenningen fra REF være høyere enn nedbøren, fordi snø smelter, av og til samtidig som regnedbør pågår (se figur 3).

Når man sammenligner de to forsøksperiodene (dvs. 2009 til 2014 og 2014 til 2020), virker den dempende effekten av grønne tak gjennomgående, og avrenningsintensitetene fra de enkelte

Tabell 1. Høyeste daglige avrenning i den snødekte perioden (SDP) fra de tre grønne takene og referansetaket (første 5 år av tak 2).

SDP nr.	09/10	10/11	11/12	12/13	13/14	14/15	15/16 ^a	16/17	17/18	18/19 ^a	19/20 ^a
GR1 (mm/d)	35,5	22,9	18,1	31,2	32,9	26,8	29,2	22,8	25,5	46,1	36,6
GR2 (mm/d)	-	-	-	-	-	21,4	29,1	23,6	24,6	42,5	36,7
GR3 (mm/d)	33,8	23,4	21,2	26,9	30,3	22,8	30,1	29,4	25,1	45,5	34,7
REF (mm/d)	37,4	29,6	30,2	44,8	35,8	-	-	-	-	-	-

^a regn på ikke snødekket tak

Tabell 2. Persentiler (95 og 99 %) og maksimal av nedbør- og avrenningsintensiteter [mm/t] for ulike perioder og situasjoner. SDP er perioder fra det første snøfallet til den siste snøen hadde smeltet i vinterhalvåret. $T > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ inkluderer episoder der gjennomsnittlig lufttemperatur er positiv. «Resten av året» er mer eller mindre sommerhalvåret.

		SDP ($T_{\text{luft}} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$)			SDP ($T_{\text{luft}} > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$)			Resten av året		
		95 %	99 %	Maks	95 %	99 %	Maks	95 %	99 %	Maks
2009 - 2014	Nedbør	0,30	1,40	4,30	0,80	2,10	11,50	0,70	2,80	29,70
	GR1	0,00	0,06	0,55	1,12	2,08	5,06	0,45	1,67	19,03
	GR3	0,00	0,12	0,64	1,07	2,01	4,82	0,46	1,74	15,35
	REF	0,00	0,12	1,94	1,39	2,81	6,51	0,71	2,69	25,89
2014 - 2020	Nedbør	0,60	1,40	4,20	0,70	2,00	4,10	0,60	2,70	26,20
	GR1	0,06	0,12	1,15	0,97	1,72	3,43	0,39	1,73	17,26
	GR2	0,06	0,12	1,39	0,96	1,76	3,58	0,28	1,67	16,80
	GR3	0,06	0,12	1,07	1,01	1,76	3,35	0,43	1,77	15,34

grønne takene er overraskede like. Et unntak er imidlertid GR2, som i «resten av året» har noe lavere avrenningsintensiteter enn GR1 og GR3 (tabell 2). Dette kan være en effekt av at GR2 har større kapasitet til å holde på vann enn de to andre grønne takene. Kapasiteten til GR2 ser likevel ikke ut til å påvirke takenes tilbakeholding av vann i perioder med snødekke og snøsmelting.

Fra tabell 2 fremgår det også at de høyeste registrerte avrenningsintensitetene forekom i løpet av «resten av året». Dette er ventet ettersom kraftig regnvær om sommeren har størst intensitet i Oslo. Når man sammenlikner de 1 % høyeste avrenningsintensitetene (99 %-persentilene i tabell 2) så forekom de største verdiene i snødekte perioder med temperaturer over frysepunktet. Grønne tak kan med andre ord ha en høyere avrenning i «vinterhalvåret» enn i «sommerhalvåret».

Mens sommerregn kan forårsake kostbare urbane flomhendelser, kan høye avrenningsintensiteter om våren likevel være kritisk i avløpssystemer som er utsatt for problemer som følge av tine-fryse-sykluser (f.eks. frosne avløp og frossen grunn med minimal infiltrasjon). Den dempende effekten ved grønne tak for de høye avrenningsintensitetene er derfor ikke bare et nytt funn, men kan altså kunne bidra til å redusere risikoen for ønskede hendelser i dreneringssystemet som følge av snøsmelting. Oppsummert viser resultatene at grønne tak, sammenlignet med tradisjonelle tak, reduserer avrenningsintensiteten gjennom hele året i kaldt klima.

De 1% (99% i tabell 2) høyeste avrenningsintensitetene fra referansetaket i smelteperioder sammenfaller typisk med de observasjonene på smeltehendelse som er vist i figur 2 og figur 3.

Fenomenet kan muligens forklares av referansetaketets lave albedo (dvs. den svarte bitumenmembranen). Når deler av det sorte referansetaket er eksponert, kan den lave albedoen ha forsterket snøsmeltingen. For et grønt tak forventes høyere albedo, og dermed er smelteeffekten mindre fremtredende. I tillegg, under forutsetning av at temperaturen under takene (dvs. i garasjen) er høyere enn lufttemperaturen, kan man forvente akselerert snøsmelting ved referansetaket på grunn av isolasjonseffektene av grønne tak (Lundholm et al., 2014).

Konklusjon

Grønne tak reduserer avrenning selv i den kalde delen av året med mindre fordampning. Resultatene viser at de grønne takene reduserer og bremser avrenningen betydelig, og reduserer dermed volumet av kaldt vann som føres til avløpsrensaneanlegg ved felles avløp, samt risikoen for å overskride kapasiteten til nedstrøms avløpssystem i denne perioden. Vår forventning om liten virkning av de tynne grønne takene er mao. ikke riktig (falsifisert).

I snødekte perioder er det ingen avrenning fra takene i 98% av tiden så lenge lufttemperaturen er under null. For lufttemperaturer over null smelter snøen, og de 1 % høyeste avrenningsintensitetene (1,7-2,1 mm/t) kan være større enn de tilsvarende 1 % høyeste avrenningsintensitetene om sommeren, selv om nedbøren om sommeren er større og mer intens. Den maksimale avrenningen var imidlertid flere ganger høyere i "resten av året" (sommerhalvår).

Med klimaendringer skjer snøsmelting hyppigere. Avrenningsepisoder er individuelle og unike. Som et resultat er det vanskelig å forutsi tilbakeholdingen på de grønne takene. Denne undersøkelsen har imidlertid vist at selv tynne, grønne tak har en effekt.

Takk

Tid for utarbeiding av dette manuskriptet ble sponset av SURF-prosjektet (nr. 281022, støttet av Norges forskningsråd og Finans Norge, Norsk Vann og Statens Vegvesen), Oslo kommune og Universitetet for miljø- og biovitenskap. En

ekstra takk til Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) for praktisk bistand under oppsett og reparasjon av overvåkingsinstrumentene. Virkemidlene ble sponset av NVE og EU-Interreg 4b-prosjektet SAWA. De grønne takene ble betalt av Braskerud og SAWA-prosjektet.

Referanser

- Braskerud, B.C. (2014). *Grønne tak og styrtregn. Effekten av ekstensive tak med sedumvegetasjon for redusert avrenning etter nedbør og snøsmelting i Oslo*. NVE rapport 65/2014; 98 sider.
- Braskerud, B.C. and K.H. Paus (2022). *Retention of snowmelt and rain from extensive green roofs during snow-covered periods*. Blue-green systems, vol. 4, no. 2; 184-196. <https://doi.org/10.2166/bgs.2022.011>
- Carson, T.B., Marasco, D.E., Culligan, P.J. and McGillis, W.R. (2013). *Hydrological performance of extensive green roofs in New York City: observations and multiyear modeling of three full-scale systems*. Environ. Res. Lett. Vol 8, no 2 (13 pp) <http://doi:10.1088/1748-9326/8/2/024036>
- Johannessen, B.G., Hanslin, H.M. and Muthanna, T.M. (2017). *Green roof performance potential in cold and wet regions*. Ecol. Eng. 106; 436-447. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.06.011>.
- Johannessen, B.G., Muthanna, T.M. and Braskerud, B.C. (2018). *Detention and Retention Behavior of Four Extensive Green Roofs in Three Nordic Climate Zones*. Water, 10, 671; <https://doi.org/10.3390/w10060671>
- Kuoppamäki, K. (2021). *Vegetated roofs for managing stormwater quantity in cold climate*. Ecol. Eng. 171; <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106388>
- Mentens, J., Raes, D. and Hermly, M. (2006). *Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century?* Landscape and Urban Planning 77; 217-226
- Otnes, J. og Ræstad, E. (2017). *Hydrologi i praksis*. 2. utgave, Ingeniørforlaget, Oslo. ISBN: 8252400361.
- Squier-Babcock, M. and Davidson, C.I. (2020). *Hydrologic Performance of an Extensive Green Roof in Syracuse, NY*. Water 2020, 12, 1535; 15 pp. doi:10.3390/w12061535.
- Sysoeva, E. and Gelmanova, M. (2020). *Analysis of roof greening technology impact on rain and meltwater retention*. E3S Web of Conferences 175, 11023, INTER-AGROMASH 2020. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017511023>