

Grønne tage

Status på viden og erfaringer om grønne tage

Jensen, Nickolaj Feldt; Cornelius, Thomas; Du, Guangli

Creative Commons License
Ikke-specificeret

Publication date:
2023

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

Jensen, N. F., Cornelius, T., & Du, G. (2023). *Grønne tage: Status på viden og erfaringer om grønne tage*. (1 udg.) Institut for Byggeri, By og Miljø (BUILD), Aalborg Universitet. BUILD Rapport Bind 2023 Nr. 15

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

BUILD RAPPORT

2023:15

Grønne tage

Status på viden og erfaringer om grønne tage

Nickolaj Feldt Jensen, Thomas Cornelius, Guangli Du

Kolofon

Titel	Grønne tage
Undertitel	Status på viden og erfaringer om grønne tage
Serietitel	BUILD-rapport 2023:15
Udgave	1. udgave
Udgivelsesår	2023
Forfattere	Nickolaj Feldt Jensen, Thomas Cornelius, Guangli Du
Sprog	Dansk
ISBN	978-87-563-2117-4
ISSN	2597-3118
Omslag	Nickolaj Feldt Jensen
Foto	Angivet ved de enkelte fotos
Udgiver	Afdeling for Byggeri, Anlæg og Miljø – BUILD - Aalborg Universitet, A.C. Meyers Vænge 15, 2450 København SV E-post build@build.aau.dk www.build.dk

Indholdsfortegnelse	
1. Sammenfatning	4
2. Indledning	6
3. Hvad er grønne tage	7
3.1 Typer og opbygning	7
3.1.1 Typer af grønne tage	7
3.1.2 Klassifikation af grønne tage	8
3.1.3 Grønne tages opbygning	9
3.1.4 Varme og kolde tage	11
3.2 Grønne tages betydning for byen og bygningen	12
3.2.1 Byens klimaforhold	12
3.2.2 Tilbageholdelse af regnvand	15
3.2.3 Energibalancen for grønne tage	19
3.2.4 Grønne tages effekt på fugt og termiske forhold	20
3.2.5 Grønne tages påvirkning af energiforbruget	21
3.2.7 Støjreduktion	23
3.2.8 Biodiversitet i byerne	23
4. Projektering og udførelse	24
4.1 Design og bæreevne egenskaber	24
4.2 Eksempler på opbygning af grønne tage	25
4.3 Sikre tætheden af tagmembranen	27
4.4 Specifikke krav for grønne tage	28
4.4.1 Taghældning og fald mod afløb	28
4.4.2 Opdrift og vinderosion	28
4.4.3 Rodpenetration og bionedbrydning	29
4.4.4 Brand	30
5. Vedligeholdelse af grønne tage	30
6. Totaløkonomi (LCC) og Livscyklusvurdering (LCA)	32
6.1 Levetid af grønne tage	32
6.2 Totaløkonomi (LCC)	33
6.3 Livscyklusvurdering (LCA)	34
7. Erfaringer fra byggebranchen	35
8. Identificering af fremtidige forskningsbehov	37
9. Konklusion	45
10. Referencer	47
Bilag A: Erfaringer fra danske case bygninger	53

1. Sammenfatning

Rapporten er et litteraturstudie om grønne tagkonstruktioner, hvor der er indhentet erfaringer fra den danske byggebranche for at vurdere grønne tages ydeevne under dansk klima forhold, og for at afklare fordele og ulemper samt vurdere grønne tage i et bæredygtighedsperspektiv, herunder levetid, vedligehold, miljøbelastning og totaløkonomi.

Grønne tage har en række tekniske og bæredygtige fordele set i forhold til konventionelle sorte tage, men også en række ulemper, der skal tages med i overvejelserne når der vælges grønne tagkonstruktioner. Nogle af de mere interessante fordele er grønne tages evne til at reducere og forsinke afstrømning af vand, samt reducere storbyopvarmning (Urban Heat Island) ved at planter absorberer solstråling og anvender den til fotosyntese, i stedet for at opvarme byens overflader. Planter, specielt større buske og træer, giver skygge samt afgiver fugt, hvilket har en nedkølende effekt. Grønne tage kan i nogle tilfælde medvirke til en mere spændende arkitektur af bygningen, og vil have en positiv effekt på biodiversitet i byerne, dvs. etablering af et habitat for dyre- og planteliv. I andre lande har man undersøgt effekten af grønne tage med hensyn til at nedsætte varmemeforbrug om vinteren, og at nedsætte kølebehov om sommeren, ved at reducere varmemeforøgelse på tage (solkontrol). For de nordlige lande, hvor der er tradition for at bruge store mængder isolering i tagkonstruktionen, viser studier, at grønne tage vil have en begrænset effekt på disse varme- og køleeffekter. Studier viser, at grønne tage generelt har en højere forventet levetid end konventionelle tage, da tagmembranen i mindre grad udsættes for solstråling og forvitring af sensible dele af taget stort set undgås. Tagmembranen vil derimod være eksponeret for længere perioder med høj relativ luftfugtighed og øget eksponering fra fine partikler, der vil påvirke levetiden i negativ retning. Dertil kommer, at hvis der opstår en lækage i tagmembranen, så kan det være vanskeligt at lokalisere og dyrt af reparere.

Erfaringsopsamlingen inkluderer 6 danske case bygninger, hvor der præsenteres information om bygninger og tagkonstruktioner, erfaringer i forhold til svigt, skader og andre udfordringer, positive erfaringer, samt særlige forhold vedrørende vedligehold af grønne tage. Resultaterne fra erfaringsopsamlingen viser, at der generelt ikke var mange skader i de grønne tagkonstruktioner, men derimod blev der observeret del tilfælde af svigt, hvor en række detaljer ikke var udført korrekt, eller der ikke var udfærdiget tilstrækkelig dokumentation. De steder, hvor det er gået galt, har det hovedsageligt skyldtes komplekse konstruktionsløsninger eller ikke funktionelle installationer, hvilket inkluderer utætheder, vind erosion af vækstlaget, samt fejl ved sprinkleranlægget, der har ført til tagbrande.

Foruden de 6 case bygninger, blev der også udført dataudtræk fra Byggeskade-fondens database med fokus på bygninger med grønne tage. Disse viser, at 52% af sager med registrerede svigt ikke var relateret til det grønne tag, men derimod svigt i andre bygningsdele. Resultaterne viser at svigt relateret til de grønne tage primært skyldes: 1) fejl eller mangler i dokumentation, 2) utilstrækkelig inddækningshøjde, 3) brug af ikke veldokumenterede løsninger eller manglende erklæring om risikobehæftede forhold (f.eks. brugen af grønne tage på ventilerede kolde konstruktioner og på paralleltage), og 4) manglende udlægning af sten langs ovenlys, kanter, inddækninger, gennemføringer mm.

De fleste LCC studier finder grønne tage totaløkonomisk gunstige sammenlignet med konventionelle tage, hovedsagelig på grund af deres forlængede levetid. Inddragelse af sociale fordele kan forbedre den samlede værdi for samfundet ved

anvendelse af grønne tage, men det er en udfordring at kvantificere disse fordele. Som nævnt ovenfor, er energibesparelserne ved at anvende grønne tage ubetydelige i nordiske kolde klimaer, hvilket tyder på, det er de sociale fordele nævnt ovenfor, der vil bidrage mest til grønne tages værdi. Med hensyn til LCA af grønne tage, er analyser meget case-specifikke. Der er betydelige forskelle mellem studierne på en række faktorer, hvilket gør det vanskeligt, at give en generaliseret konklusion uden en detaljeret analyse.

Rapporten viser, at der er et behov for mere viden på en række områder, f.eks. i indlejrede teknologier, som potentielt kunne afhjælpe en af de større udfordringer; at lokalisere utætheder i tagmembranen under det grønne tag.

2. Indledning

Baggrund og formål

Nærværende rapport er baseret på et litteraturstudie samt indhentning af viden fra branchen for at vurdere de grønne tage i et dansk klima og for at afklare fordele og ulemper samt vurdere grønne tage i et bæredygtighedsperspektiv, herunder levetid, vedligehold, miljøbelastning og totaløkonomi. Dette sker ved at give eksempler på, hvilke typer der er egnede som grønne tage, herunder angivelse af diverse opmærksomhedspunkter under udførelse og projektering set i et dansk klima. Projektet giver et billede af, hvor varieret udvalget af grønne tag-systemer (opbygninger) reelt er. Herudover beskrives betydende egenskaber for grønne tage. Projektet kan virke som et grundlag for udarbejdelse af regler og anvisninger for etablering af grønne tage.

3. Hvad er grønne tage

Grønne tage er et overordnet begreb, der dækker over forskellige typer af opbygninger og former for beplantning på tagflader. Valg af type vil typisk ske på baggrund af ønsker om beplantningsform og biodiversitet, vægten af det grønne tags systemløsning og vedligeholdelsesbehov. Grønne tage kan eksempelvis etableres med henblik på miljøhensyn såsom:

- Reducere og forsinke afstrømning af vand
- Producere ilt
- Forlænge levetiden for tagdækningen
- Reducere storbyopvarmning (Urban Heat Island)
- Nedsætte varmebehov om vinteren, ved øget varmeisolering
- Nedsætte kølebehov om sommeren, ved at reducere varmemeforøgelse på tage (solkontrol)
- Absorbere støvpartikler og CO₂
- Bidrage til at opretholde biodiversitet, dvs. etablere et habitat for dyre- og planteliv

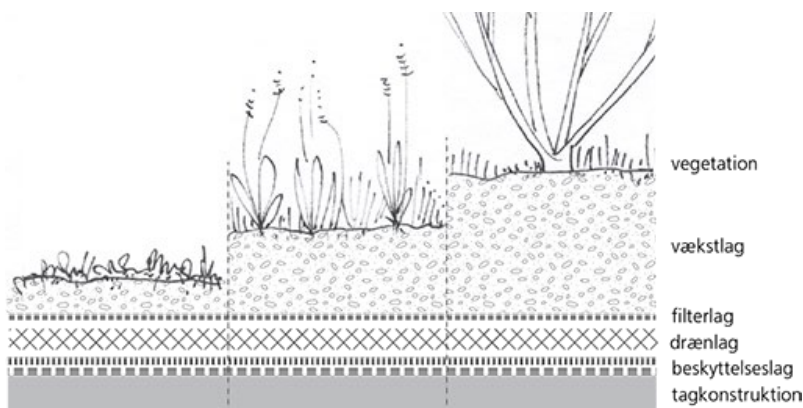
Derudover kan det grønne tag eventuelt medvirke til en mere spændende arkitektur af bygningen.

3.1 Typer og opbygning

3.1.1 Typer af grønne tage

Et typisk grønt tag omfatter en vandtæt barriere for at beskytte bygningen, et drænlag til at lagre og bortlede vand, et vækstmediumlag og et vegetationslag.

Der er to hovedtyper af grønne tage: Ekstensive tage, der er relativt billige at installere, kræver minimal vedligeholdelse og hovedsageligt benyttes til miljøforbedrende tiltag, men egner sig ikke til ophold. Intensive tage, tillader en større variation og størrelse af planter, såsom buske og små træer, men er som regel dyrere at opbygge og vedligeholde, for eksempel på grund af behovet for kunstvanding. På kommercielle og offentlige bygninger bruges oftest ekstensive tage medmindre tagene er primært beregnet som rekreativt rum.



Figur 1. Ekstensiv, semi-intensiv og intensiv grøn tag [1].

Ekstensive

Ekstensive tage har et tyndt vækstlag med sukkulente og tørketolerante planter som sedum, der kan overleve under barske forhold. Ekstensive tagene kræver minimal vedligeholdelse, når de er etableret og er normalt omkostningseffektive, især i bygninger med lang levetid. Ekstensive tage kan anvendes på flade tage såvel som på rejste tage. Lagopbygning og forankring varierer typisk med taghældning og klima [2].

Intensive

Intensive tage har et tykkere vækstlag og bør betragtes som et landskab med større frihed i forhold til valg af planter i forskellige størrelser inkl. højere planter såsom buske og træer med dybere rødder, som dem der findes i parker og haver. Disse planter kræver vanding i tørre perioder. På grund af deres tykkere og tungere vækstlag, kræver intensive tage konstruktioner med større bæreevnekapacitet end ekstensive tage. Det frarådes derfor generelt at etablere et intensivt grønt tag i forbindelse med renovering af tagkonstruktioner, medmindre der udføres de nødvendige beregninger for de bærende elementer. Intensive tage har større potentiale for gavnlige effekter på mikroklima og rekreativt brug end ekstensive tage. Prismæssigt ligger disse tage i den højere ende både i forhold til etablering såvel som vedligehold, men til gengæld er ophold muligt, så taget kan bruges som rekreativt område. Når skader opstår, fx utætheder, kan ubedring være kostbar.

Semi-Intensive

Det semi-intensive tag er en slags blanding mellem ekstensivt og intensivt tag, idet vækstlagets tykkelse ligger mellem det for hhv. ekstensive og intensive tage. Vegetationen er typisk en blanding af lave planter såsom græs og stauder, men også mindre buske. Mht. pleje og pris ligger de semi-intensive tage også imellem de ekstensive og intensive tage. Ophold på semi-intensive tage er ofte muligt. Ligesom med ekstensive tage, kan semi-intensive tage anvendes både på flade og rejste tage. Når der anvendes grønne tage på tagflader med hældning, er opbygningen mere kompliceret, da det kræver særlige foranstaltninger, blandt andet at der skal sikres mod erosion og nedskridning.

3.1.2 Klassifikation af grønne tage

Valget af vegetation bestemmer tykkelsen og dermed vægten af det grønne tag og kræver forskellig grad af vedligeholdelse. Tabellen nedenfor angiver klassifikationer for ekstensive, intensive og semi-intensive grønne tage og de vigtigste egenskaber. De angivne klassifikationer anvendes i hele denne rapport.

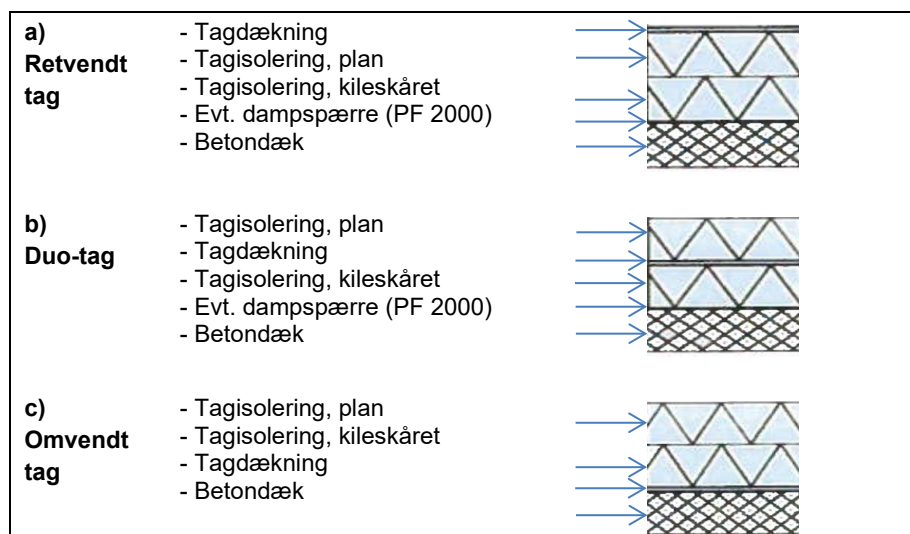
Tabel 1. Klassifikation af grønne tage jf. BYG-ERFA erfaringsblad (27) 161217 [3], i overensstemmelse med SBI-anvisning 273 – Tage [4]

	Intensive	Semi-intensive	Ekstensive
Vegetation	Mellemhøje træer og buske	Græsser og mindre planter	Sedum
Vækstlag	151 mm	61–150 mm	Max. 60 mm
Anvendelse	Egnet	Begrænset	Kun ifm. vedligehold
Vedligehold	Omfangsrig	I mindre omfang	Begrænset
Krav til membran	Rodhæmmende	Rodhæmmende	Evt. rodhæmmende
Inddækningshøjde	Min. 200 mm	Min. 200 mm	Min. 200 mm
Konstruktionsprincip	Omvendt eller duo-tag	Omvendt, retvendt eller duo-tag	Retvendt tag
Fald	Min. 1:100	Min. 1:100 (omvendt og duo-tag) / min. 1:40 (retvendt tag)	Min. 1:40
Afstand til afløb	6 m til tagkant, 12 m mellem afløb	6 m til tagkant, 12 m mellem afløb	7,2 m til tagkant, 14,4 m mellem afløb
Bærende konstruktion	Beton	Beton	Beton/træ (varmt tag)
Brand	Vedligehold	Vedligehold	Brandprøvet system eller hindring af brandspredning

Ved brug af bærende konstruktioner af træ er der risiko indbygget fugt. Derfor bør disse anvendes så der er fuld mulighed for visuel inspektion af de bærende konstruktioner, f.eks. loft til kip. Alternativt bør der indbygges indlejret teknologi til fugt- og /eller lækage-detektion.

3.1.3 Grønne tages opbygning

Grønne tages opbygning kan variere alt efter hvor tagdækningen ligger (duo-tag, omvendt tag, retvendt tag).



Figur 2 Forskellige opbygninger af tagkonstruktioner til grønne tage

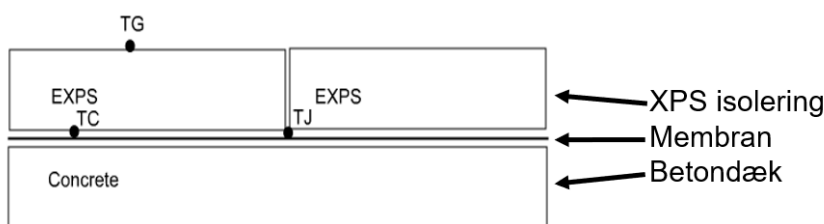
Retvendt tag

Retvendte tage opbygges så al varmeisoleringen er placeret under tagmembranen, som vist i Figur 2a. Dette beskytter varmeisoleringen mod nedbør, hvilket sikrer, at isolansen (varmemodstand) opretholdes, men tagmembranen vil dog være mere udsat i forhold til de andre tagopbygninger.

Omvendt tag

Omvendte tage opbygges så al varmeisoleringen er placeret over tagmembranen, som vist i Figur 2c. Typisk bruges ekstruderet polystyren (XPS) isolering, da det har en lukket pore struktur og derved ikke optager ret meget fugt. Placering af XPS isolering mellem tagmembran og vækstlag i det grønne tag beskytter tilmed tagmembranen mod rodpenetration.

Placeringen af isoleringen på ydersiden af tagmembranen resulterer i reduceret isolans i perioder med nedbør, forbi regnen vil kunne trænge ned mellem isolering og tagmembran og derved øge varmetabet. Dette medfører en relativ fugte temperatur mellem isolering og underliggende betondæk, se Figur 3.



$$RJT = \frac{TJ - TG}{TC - TG}$$

Relativ fugte temperatur (RJT)

- Tørt vejr RJT=1
- Regn RJT<1, vand vil løbe under topisolering og give ekstra varmetab

Figur 3. Definition af relativ fugte temperatur (RJT) [5]

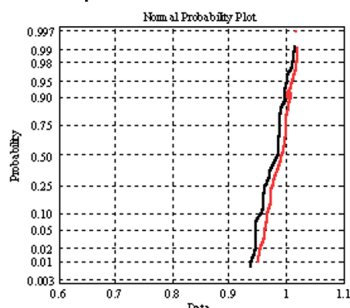
Effekten af den relative fugte temperatur for et normalt tag og et omvendt tag, hvor regnen kan trænge ned under isoleringen, ses i Figur 4. Når der er frostvejr, ses der ikke betydelige forskelle mellem normalt tag og omvendt tag, hvorimod for perioder med mildt vejr inklusiv regn, vil der være en lavere relative fugte temperatur, som resulterer i et øget varmetab i det omvendte tag.

U-værdien af et omvendt tag vil afhænge af klima og fugtabsorption i varmeisoleringsmateriale. Tillæg for nedbør ved beregning af omvendte tage er angivet i DS418 Anneks A4.

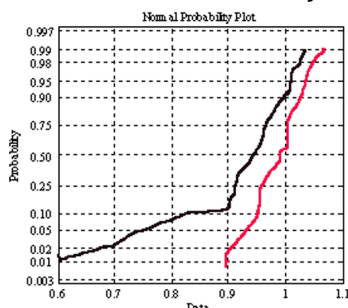
OBS

Ved ekstensive grønne tage anvendes typisk kun et retvendt tag. Duo-tag eller omvendt tag anvendes ikke til ekstensive tage da ballasten af det grønne tage ikke er tilstrækkelig til at sikre varmeisoleringen mod vindsug og flydning på grund af opdrift. Ved intensive grønne tage frarådes det at anvende retvendt tag opbygning, da der er risiko for, at vækstlaget fryser fast i tagmembranen og river den i stykker. Det anbefales derfor i stedet at anvende duo-tag eller omvendt tag til intensive grønne tage. Retvendt tag opbygning kan dog anvendes til semi-intensive grønne tage.

Frost perioder evt. sne



Perioder med mildt vejr inkl. regn



Figur 4. Sammenligning af målte værdier for relativ fugt temperatur (RJT) for normalt tag (rød) og omvendt tag (sort) [5]

Duo-tag

Duo-tage opbygges således at der er placeret varmeisolering både over og under tagmembranen, som vist i Figur 2b. Som ved omvendt tag opbygning, anvendes XPS isolering over tagmembranen, så isoleringen yder beskyttelse mod rodpenetration. Derudover vil anvendelse af duo-tag ligeledes resultere i reduceret isolans i perioder med nedbør.

3.1.4 Varme og kolde tage

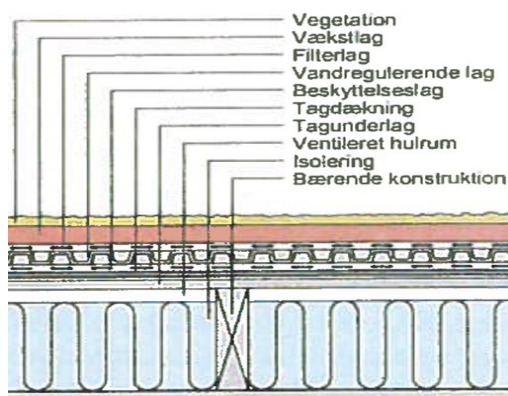
Ved varme tage forstås, at den bærende konstruktion ligger på den indvendige side af isoleringen, hvorfor den bærende konstruktions temperatursvingninger følger indvendige forhold. I kolde tage med ventileret hulrum er isolering inde i den bærende konstruktion (Figur 5), som derfor påvirkes af udvendige temperaturforhold.

Kolde tage opbygges som retvendte tage, mens grønne tage bygget som varmt tag kan opbygges såvel som retvendt, duo-tag eller omvendt tag.

Etableres grønne tage på kolde, ventilerede tagkonstruktioner, anbefales det at installere fugtovervågning eller at etablere et ekstra lag tagdækning på en tynd varmeisolering som ekstra sikkerhed. Derudover anbefales det, at tagkonstruktion skal kunne inspiceres indefra.

OBS

Grønne tage etableret på kolde, ventilerede tagkonstruktioner betragtes som værende risikobehæftede, og der findes endnu ikke en veldokumenteret løsning. Dette skyldes, at det grønne tag vil ændre de temperatur- og fugtforhold, som kendes fra de konventionelle opbygninger for kolde tage.



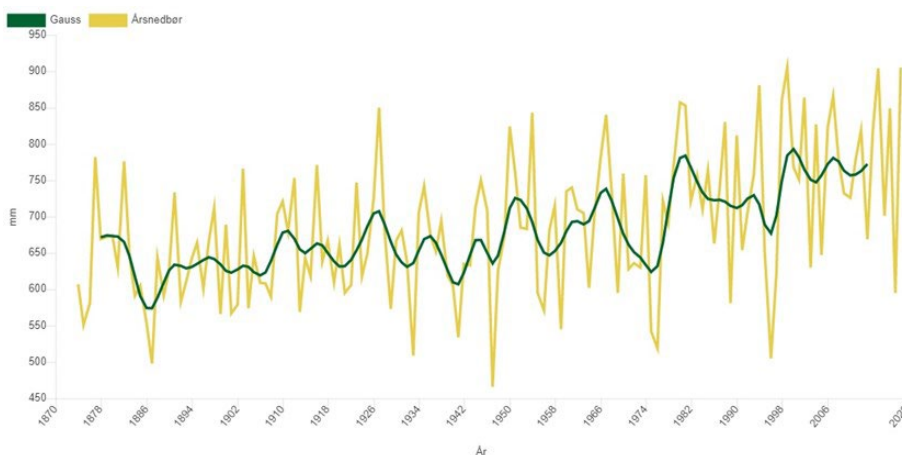
Figur 5 Principtegning af koldt tag anvendt som underlag for grønt tag.

3.2 Grønne tages betydning for byen og bygningen

3.2.1 Byens klimaforhold

Regnvand og vandafledning i byerne og på landet

De senere år har Danmark oplevet stigende udfordringer med for meget vand og klimaindikatorer viser, at årsnedbøren er stigende. Ifølge DMI, er den årlige mængde nedbør steget med omkring 100 mm fra 650 mm i 1870'erne til 750 mm i de senere år, dvs. en stigning på ca. 15% [6]. Den stigende årlige mængde nedbør kan ses i Figur 6 nedenfor. Den største stigning i nedbøren er sket om vinteren, hvor mængden er forøget med over 30% siden omkring år 1950.



Figur 6. Udviklingen i Danmarks årsnedbør fra 1874-2019 målt i mm. [6]

Det ventes at der frem mod år 2100 vil ske en yderligere stigning i mængden af nedbør om vinteren med knap 25 %. Derimod vil der om sommeren falde omtrent samme mængde nedbør som i dag - men nedbøren bliver oftere fra kraftige byger. Samlet ventes det, at årsnedbøren vil stige med ca. 13% [7], [8].

I modsætning til landområder, har byerne mindre grønne og blå arealer, dvs. arealer med skov og vand, der kan tage imod de stigende nedbørsmængder og sikre, at vandet nedsiver eller fordamper. Dette gør byerne mere udsatte i tilfælde af store mængder vand. Flere kilder (herunder [9]–[11]) påpeger, at den stigende mængde nedbør og skybrud vil lægge større pres på de eksisterende kloaksystemer i byerne, som har begrænset kapacitet for afledning af regnvand, og at der vil blive større risiko for oversvømmelser. Det påpeges at det kan blive dyrt og meget tidskrævende at udbygge kloaksystemerne i byerne til at kunne klare de fremtidige mængder nedbør.

Storbyopvarmning (Urban Heat Island)

Klimaforholdene i byerne adskiller sig ofte fra landområder. Modsat de omkringliggende landområder, kan der være stor variation i materialer, former og farver indenfor korte afstande grundet byernes komplekse struktur, hvilket gør mikroklimaet i byerne mere omskifteligt og kan resultere i større temperatursvingning.

INFO

En forøgelse af byernes grønne og blå arealer til lokal afledning eller anvendelse af regnvand (LAR-løsninger), herunder grønne tage, kan i nogen grad medvirke til at gøre byerne mere robuste overfor oversvømmelse.

ger. Fænomenet "varme-ø-effekt" beskriver det forhold, at temperaturen i byområder typisk er højere end temperaturen i de omkring liggende landområder. Dertil kommer, at jo højere udetemperaturer og jo større byområder, jo mere udtalt bliver varme-ø-effekten [12]–[14].

Årsagen til varme-ø-effekten ligger i byernes arealanvendelse og er det samlede resultat af ændringer af en række energibalancer, som følge af stigende urbanisering af et område [13]–[15]. De forskellige energibalancer præsenteres kort nedenfor:

- Mindre fordampning af vand fra planter og overflader i byen, grundet færre grønne og blå arealer og at en stor del af nedbøren ledes væk, fx i kloak, hvilket gør at fordampningsprocessens temperatursænkende potentiale ikke udnyttes.
- Solens kortbølgede indstråling vil i højere grad øge temperaturen af byens overflade, i stedet for at fordampe vand, som har en kølende effekt på omgivelserne.
- Byens byggematerialer har en høj varmelagringssevne (se Tabel 2), som gør, at materialer absorberer en stor andel af solens kortbølgede indstråling om dagen, og denne solenergi frigives i som varmestråling nattetimerne.
- Byen forskellige overflader har betydning, grundet at de typisk har mørkere farver og en lav albedo (se Tabel 2), hvilket betyder at overfladerne absorberer en større andel af solens kortbølgede indstråling og reflekterer mindre.
- Byluftens højere indhold af støv og forureningspartikler, er med til at absorbere og tilbagestråle overfladernes langbølgede varmeudstråling, hvilket betyder, at sker mindre udstråling – dvs. byen 'holder bedre på varmen'.
- Byens udformning bidrager også til opvarmningen, dels fordi luftstrømmene begrænses og varmen i høj grad "fanges" i gadeslugter, dels fordi høje bygninger blokerer for varmeudstrålingen til verdensrummet.
- Menneskeskabt varme bidrager yderligere til opvarmning af byen.

Tabel 2 viser byens overflader og deres egenskaber [15]

Byoverflade	Albedo	Specifik varmekapacitet	Porøsitet
	[%]	[J/kg K]	[%]
Asfalt	5-20	920	0,1 - 10
Mursten	20-40	750	30 - 50
Tegl	10-35	920	30 - 50
Beton	10-35	880	5 - 30
Granit	30-35	750	0,5 – 1,5
Glas	100	670	0
Sand, vådt	25	835	35
Sand, tørt	30	835	35
Bar jord	5-50	800	50
Vand, salt	5-10	3930	-
Vand, ferskt	5-10	4186	-
Vegetation, græs	30	Lav	50
Vegetation, skov	15	Lav	50

Beskrivelser af albedo, specifik varmekapacitet og porøsitet og deres indflydelse på det grønne tags energibalance er beskrevet nærmere i afsnit 3.2.3.

Danske studier [16] har kigget på overfladetemperaturerne i København og omegn for at undersøge varme-ø-effekten. Det blev observeret, at forskellige bebyggelsestyper resulterer i markant forskellige overfladetemperaturer med en forskel på ca. 3 °C mellem høj og lav bebyggelse. I forhold til forskellen mellem byen og de omkringliggende områder blev der observeret, at den største forskel var mellem industriområder og skov. Her er forskellen på op imod 10 °C på den varmeste dag. Derudover har undersøgelser for varme-ø-effekten i sommeren 2006 vist en forskel på op til 12 °C mellem indre København og områder uden for byen.

I dag betragter vi i Danmark ikke varme-ø-effekten som værende noget større udfordring, fordi vi sjældent oplever længerevarende perioder med hede-bølger. Men det ventes, at den årlige gennemsnitstemperatur stiger med ca. 3,4 °C over hele landet i år 2100, og at der vil forekomme flere og mere intense hede-bølger i fremtiden. Dette kan medføre en række udfordringer [7], blandet andet på grund af varme-ø-effekten. Større byer skal derfor i fremtiden arbejde mere målrettet med strategier for håndtering af ekstreme hede-bølger og evt. tørke problemer.

Den generelle anbefaling til at modvirke varme-ø-effekten er at tænke flere blå og grønne arealer ind i byområderne, dvs. flere haver og parker, gerne med store løvfældende træer, mere vand, samt "begrønning" af eksisterende overflader i form af grønne tage og facader [12]–[16]. Blå og grønne arealer skaber skygge, øger luftfugtigheden og bidrager til at holde temperaturen i byerne på et acceptabelt niveau. I [14] nævnes det, at parker og andre større grønne områder ikke kun sænker temperaturen inde i det grønne område, men også påvirker temperaturen i de omgivende bykvarterer. Vegetation absorberer solstrålingen i planternes blade og bruger energien til at drive fotosyntese, i stedet for at opvarme byens overflader [15]. Træer har den største nedkølede effekt i forhold til andre mindre planter, hvilket skyldes deres skyggevirkning, som sænker temperaturen på de omkringliggende overflader. I [14] nævnes det, at et studie har vist, at ca. 80% af den temperatursænkende effekt skyldes, at træerne skygger for solen. For grønne tage har man i [17] med simuleringer undersøgt kølepotentialet for bygninger i Togo. Man konkluderede, at med hensyn til fordampning fra planter og vækstmediet, og reduktionen af solopvarmning er det løvtætheden som har stor betydning. En større løvtæthed vil udjævne temperatursvingningerne og reducere den indendørs lufttemperatur. Et simuleringssstudie [18], har ligeledes vist, at grønne tage bidrager til reduktion af kulstofemissioner i byer og dermed afbøder grønt byggeri varme-ø-effekter.

Som beskrevet i afsnit 3.2.2, hjælper grønne tage med at tilbageholde regnvand lokalt (LAR-løsninger – Lokal Afledning af Regn), hvorefter den langsomt ledes til kloakken. Tilbageholdelsen af regnvand er med til at øge fordampningspotentialet i byen og sænke temperaturen. Grønne tage er et godt supplement til andre LAR-løsninger, som kan implementeres gradvist i takt med at bygningsmassen renoveres.

INFO

Træer har den største nedkølede effekt. Træers dybtgående rødder er med til at sikre fordampning fra jord og planteoverflader, og derved nedkøling af luften omkring de grønne områder, over en lang periode, modsat græs og mindre planter der kan tørre ud ved længerevarende hede-bølger.

3.2.2 Tilbageholdelse af regnvand

Der er store forskelle imellem afstrømningsmønstret i byerne og i landområderne. Mange af byens overfladematerialer er af natur uigennemtrængelige, fx, asfalt- og flisebelægninger, hvilket er hovedårsagen til hurtig afstrømning af regnvand og høje spidsbelastninger efter kraftige regnskyl. Grønne tage med gennemtrængelige overflader kan medvirke til at reducere og forsinke afstrømningen af regnvand, hvilket er vigtigt for at klimatilpasse vores byer og forbedre den bæredygtige byudvikling [19], [20].

Grønne tages evne til at reducere og forsinke afstrømningen af regnvand består hovedsageligt af to dele: 1) den ekstra modstand som jordlaget i den grønne tagkonstruktion yder, og 2) en betydelig del af regnen tilbageholdes i vækstlaget og drænlaget, hvorfra det fordampes ved transpiration fra planterne og evaporation fra vækstlagets overflade (samlet kaldet evapotranspiration). Vegetationslagets volumen og karakter kan have betydning for, hvor meget regnvand der fanges og tilbageholdes på planteoverfladerne, samt raten af fordampning fra planterne [19], [20]. Et feltstudie af Berretta et al. [21] viste, at fordampning er en vigtig parameter, der har indflydelse på evnen til at tilbageholde regnvand. Fugttab på grund af fordampning påvirkes af substrat egenskaber (fugtindhold) og vegetation. Tilstedeværelse af vegetation resulterede i højere daglige fugttab.

I litteraturstudiet af Andenæs et al. [22] blev det konkluderet, at det er veldokumenteret i litteraturen, hvordan grønne tage giver en effektiv metode til regnvandshåndtering, der både reducerer og forsinker den maksimale vandafstrømning, f.eks. under skybrud, samt reducerer den samlede mængde af afstrømning fra taget gennem fordampning, så længe jordlaget ikke er vandmættet. Det nævnes at forskning er blevet udført i flere klimaer verden over, herunder kolde klimaer. Der synes dog at være uenighed i om dette i vejledninger for grønne tage, f.eks. skriver BYG-ERFA, at effekten af regnvands tilbageholdelse er begrænset under skybrud [23]. I litteraturstudiet af Damen & Brouwers [24], undersøgte man effekten af regnvands tilbageholdelse for 13 grønne tage, hvor der blev fundet en gennemsnitlig årlig tilbageholdelse på mellem 18 og 75%, se Tabel 3 nedenfor. Af tabellen ses det, at den største vandtilbageholdelse forekommer ved de tykkeste opbygninger af grønne tage. Et andet, lidt nyere, litteraturstudie af Silva et al. [25] har ligeledes undersøgt effekten af regnvands tilbageholdelse for grønne tage, resultaterne er vist i Tabel 4 og Tabel 5 nedenfor.

Damen & Brouwers' litteraturstudie viste også, at vandtilbageholdelsen varierer afhængigt af årstiden. I kolde våde perioder, hvor solstrålingen er begrænset, er vandtilbageholdelsen lavere. Det skyldes, at vækstlaget i disse perioder i højere grad er vandmættet, vandreservoirer er altså fyldt og fordampningen er mindre.

INFO

Grønne tage har 3 klimaforebyggende virkninger:

- 1) LAR-løsninger kan gøres mindre, og det vil i nogen grad medvirke til at aflaste byens kloaksystem,
- 2) Mindre belastning af renseanlæg, da der bliver afledt mindre regnvand,
- 3) Flere metoder til håndtering af fremtidens øget nedbør.

Tabel 3. Vandtilbageholdelse som funktion af vækstlag og nedbørsmængde, [24]. Hentet fra [23].

Tykkelse grønt tag [mm]	Gns. vand- tilbage- holdelse [%]	Årlig nedbørs- mængde [cm]	Type vegetation vækstlag	Reference
55	60,6	477	40% ekspanderet skifer, 40% sand, 10% tørv, 5% dolomit, 3,33% komposteret haveaffald, 1,67% fjerkræ gødning - mos, sedum	Vanwoert et. al. (2005)
ca.75	62	901 (9 mdr.)	30% sand, 15% kompost, 55% skifer - sedum	Moran et. al. (2004)
75	63	961	30% sand, 15% kompost, 55% skifer - sedum	Moran et. al. (2005)
80	66	956	15% fibre, 25% indkapslede EPS, 15% perlite, 15% tørv, 15% kompost	Hutchinson et. al. (2003)
85	57	ikke oplyst	små granuler, porøse granuler	Liu and Minor (2005)
100	18	852	græs, vilde blomster	Spolek (2008)
100	45	ikke oplyst	forskellige typer	Mentens et. al. (2006)
100	55	314 (3 mdr.)	30% sand, 15% kompost, 55% skifer - sedum	Moran et. al. (2005)
100	63	262 (3,5 mdr.)	sedum	Moran et. al. (2004)
130	72	956	10% kompost, 20% fordøjede fibre, 22% perlit, 28% sandet lermuld	Hutchinson et. al. (2003)
150	29	511	sedum, skovgræs	Spolek (2008)
150	75	ikke oplyst	forskellige typer	Mentens et. al. (2006)
350	70	1106	33% vasket sand, 33% pimpsten, 33% humus	Johnston et. al. (2004)

Tabel 4. Gennemsnitlig vandtilbageholdelse i procent, [25]

Reference	Green Roof Type	Retention Range
Metselaar (2012) [21]	Extensive and Intensive (5, 10, 20, 40, 60 and 80 cm)	55 to 75%
Wong and Jim (2014) [22]	Intensive (16 platforms with 40 and 80 cm)	Average from 39 to 43%.
Stovin (2010) [23]	Extensive (prototype with 5 cm)	Average of 34%
Graceson et al. (2013) [12]	Extensive (36 decks 1.0 m ² with 20 cm)	44%
Stovin (2013) [24]	Extensive (20 cm)	3.2 to 23%
Ohnuma et al. (2014) [25]	Extensive (5cm)	30 to 57%
Lee et al. (2015) [26]	Extensive (7 pilots with 15 and 20 cm)	13 to 34% (15 cm) 43 to 61% (20 cm)
Carson et al. (2013) [27]	Extensive (3 pilots with 5 cm)	21 to 34% for rain >5 cm
Palla et al. (2010) [28]	Extensive (prototype with 12 cm)	Average of 51%
Longobardi et al. (2010) [18]	Extensive (two prototypes with 15 cm)	above 75% Between 50% and 100%
Palla et al. (2008) [29]	Extensive (20 cm)	Average of 85%

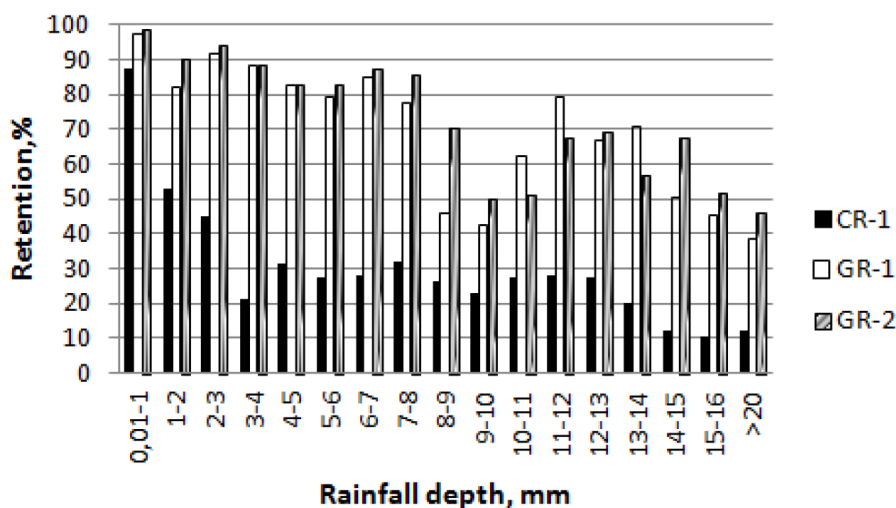
Tabel 5. Afstrømningsreduktion i procent, [25]

References	Extensive Green Roof	Intensive Green Roof
Oberndorfer et al. (2007) [30]	66 to 69%	26 to 100%
Gerardi et al. (2014) [20]	57 to 71.7%	-
Rowe (2011) [31]	50 to 60%	-
Gregoire; Clausen (2011) [32]	34 to 69%	-
Mentens et al. (2006) [33]	27 to 81%	54%
Hathaway et al. (2008) [34]	77 to 88%	54%
Galarza-Molina et al. (2014) [35]	38 to 100%	54%
Palla et al. (2008) [29]	95%	-

Foruden vækstlagets tykkelse, har taghældningen også en effekt, da en større taghældning typisk vil medføre en mindre vandtilbageholdelse. Den faktiske effekt af taghældningen i forhold til vandtilbageholdelse er stadig lidt uklar, da resultater i litteraturen ikke er entydige [24].

Der vil normalt være en større vandtilbageholdelse i intensive tage i forhold til ekstensive, men mest da intensive normalt vil være udført med større jorddybde, men der kan være betydelige variationer grundet type af vækstmedie og drænplade.

Det er ligeledes blevet undersøgt hvor meget regnvand grønne tage kan tilbageholde ift. intensiteten af nedbøren, som vist i Figur 7 nedenfor. Fra Figur 7 kan det ses at procenten af regnvand der tilbageholdes af de to grønne tage, falder med stigende mængde daglig nedbør. Dertil viser et studie fra 2022, Jensen et al. [26], ifm. generering af et dansk referenceår til fugtberegninger, at 99 percentilen for nedbør ligger under 0,1 mm pr. time, og for daglig nedbør ligger 99 percentilen under 6 mm pr. dag.



Figur 7. Vandtilbageholdelse ift. daglig mængde nedbør. CR-1: reference tag (tagpap tag); GR-1: grønt tag 1 (ekstensivt grønt tag, med profilerede drænplader); GR-2: grønt tag 2 (ekstensivt grønt tag, med drænlag af grus), [27].

I Norge har man de senere år lavet en række forsøg for bestemmelse af effekten af regnvands tilbageholdelse for grønne tage. Resultaterne af disse studier kan give en ide om potentialet under danske klimaforhold. Johannesen et al. [28] undersøgte vandtilbageholdelse af fire forskellige typer ekstensive grønne tage i fire Norske byer (Trondheim, Bergen, Sandnes og Oslo), som repræsenterer de typiske kolde og våde nordiske klimaer, fordelt over tre nordiske klima zoner. De grønne tages ydeevne ift. vandtilbageholdelse er baseret på 3-8 års felt målinger. Forsøgene viste en akkumuleret årlig vandtilbageholdelse på 11-30% og 22-46% for perioden maj til oktober. I forhold til at forsinke afstrømning under spidsbelastning, blev det observeret, at medianen for kraftige regnskyl lå mellem 65 og 90% afhængigt af det grønne tags placering og konfiguration.

Hamous [29] undersøgte eksperimentelt effekten af regnvands tilbageholdelse for to grønne tage (et med 30 mm sedum tag og et med 30 mm sedum tag med

INFO

De grønne tages ydeevnen ift. vandtilbageholdelse er stærkt afhængig af tagets maksimale fordampningsevne og mindre afhængig af materialers vandlagringskapacitet.

100 mm ekspanderet lertilslag), som blev holdt op imod to grå tage bestående af fliser på ekspanderet lertilslag (et med beton fliser samt 200 mm letklinker lag, og et med letklinker fliser og 100 mm letklinker lag) og et konventionelt sort tagpap tag som reference. Den totale akkumulerede afstrømning blev reduceret med henholdsvis 24 og 37% for de to grønne tage. I forhold til at forsinke afløb under spids belastning, blev der observeret en gennemsnitlig reduktion på 65 og 88% for henholdsvis det tynde og tykke grønne tag og 86-88% for de to grå tage. Den gennemsnitlige volumen reduktion var på henholdsvis 30 og 46% for de to grønne tage og 22-24% for de to grå tage.

Under danske forhold har DTU og KU tilbage i 2013 udviklet en afstrømnings-model baseret på eksperimentelle forsøg med 3 ekstensive grønne tage, placeret henholdsvis i Odense og i København [30]. Af de efterfølgende beregninger med modellen for de tre forsøgstage over en 22-årig periode blev det fundet at:

- Tagene potentielt kan tilbageholde 32-59% af den totale årlige nedbør.
- Kan reducere den gennemsnitlig volumenstrømning med 2-4 % for 5- til 10-års regnhændelser.
- Taget med den største tilbageholdelses evne, havde en 7-8 % tilbageholdelse ved en 5 års hændelse og 3-4 % for en 10-års hændelse.
- Kan give en reduktion af spidsbelastningen under 5-10 års regn hændelser på mellem 10-36 %.
- Kan give en lille forsinkelse af spidsbelastningen under 5-10 års regn hændelser, på under 10 minutter.

Med hensyn til grønne tages hydrologiske opførsel og regnvandshåndtering, skriver Andenæs et al. [22], at det er en vigtig del af driften af grønne tag at holde afløb og nedløbsrør funktionelle over tid. Det tilføjes, at man må antage, at eksperimentelle grønne tagkonstruktioner har en tendens til at blive mere nøje overvåget og bedre plejet under drift end grønne tage i praksis, hvilket øger effekten af regnvands tilbageholdelse.

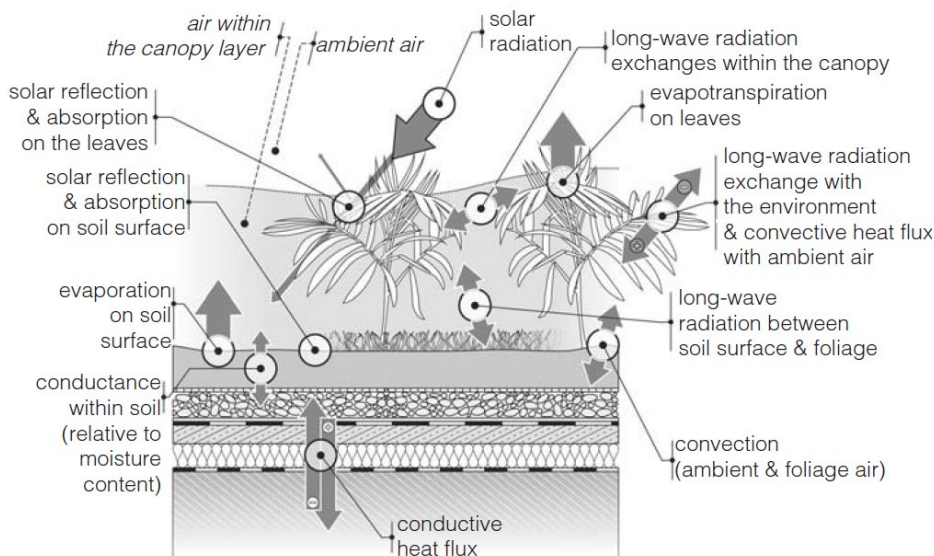
Ift. en potentiel aflastning af kloaksystemet ved tilbageholdelse af regnvand ved hjælp af grønne tage, ses af værdierne fra Tabel 3, Tabel 4 og Tabel 5, at den gennemsnitlige tilbageholdelse af regnvand for de grønne tage ligger på omkring 60%. Antages det at der opføres grønne tage på 25% af alle bygninger i parcelhuskvarterer og byområder med en bebyggelsesprocent på hhv. 20-25% og 60%. Så vil dette resultere i en estimeret regnvandstilbageholdelse i størrelsesordenen på 3-4% i parcelhuskvarterer hhv. 8-10% i byområder. Holdes disse regnvandstilbageholdelses procenter op imod, at der frem mod år 2100 ventes at årsnedbøren vil stige med ca. 13%, som nævnt i afsnit 3.2.1, kan opførelse af grønne tage for tilbageholdelse af regnvand næppe stå alene med henblik på løsning af fremtidens klimaudfordring.

3.2.3 Energibalancen for grønne tage

Helt grundlæggende har en grøn tagkonstruktion to eller tre yderligere lag sammenlignet med et konventionelt sort tag. En grøn tagkonstruktion består typisk af: drænlag (valgfrit), vækstlag og vegetationslag (som er volumen dækket af planterne). Hvert af lagene i den grønne tagkonstruktion spiller en vigtig rolle i forhold til tagets energibalance, som kan ses i Figur 7. Vegetationslaget har en solafskærmende effekt for overfladen af vækstlaget og forhindrer overophedning af det grønne tag i sommerperioden. Effektiviteten af solafskærmningen afhænger i høj grad af vegetationstypen og tætheden af bladene. F.eks. giver træer og større buske betydelig mere solafskærmning end græs, sedum og andre mindre planter, som beskrevet i afsnit 3.2.1. Luften i vegetationslaget holdes på en relativt lav temperatur grundet skyggeeffekten, hvilket er med til at holde vækstlagets overside køligt ift. den omgivende temperatur. I den kolde periode vil planternes fordampning være begrænset, og skygge vil ikke være en afgørende faktor for det grønne tags energibalance på grund af lave højde på solen i denne periode. Derimod vil rodrespirationen være til stede. Dette er en biologisk funktion, som forhindrer rodfrysning og holder jorden i rodområdet på temperaturer lidt højere end atmosfæren under lave udetemperaturer [19], [31].

INFO

Vegetationen absorberer det meste af den indkommende solstråling og bruger den til sine biologiske funktioner som fordampning, fotosyntese osv., i modsætning hertil vil andre overflader blive opvarmet af eller reflektere solstrålingen. Derved opvarmer de omkringliggende overflader og bidrager til overophedning af byerne.



Figur 8 Energibalancen for et grønt tag [32]

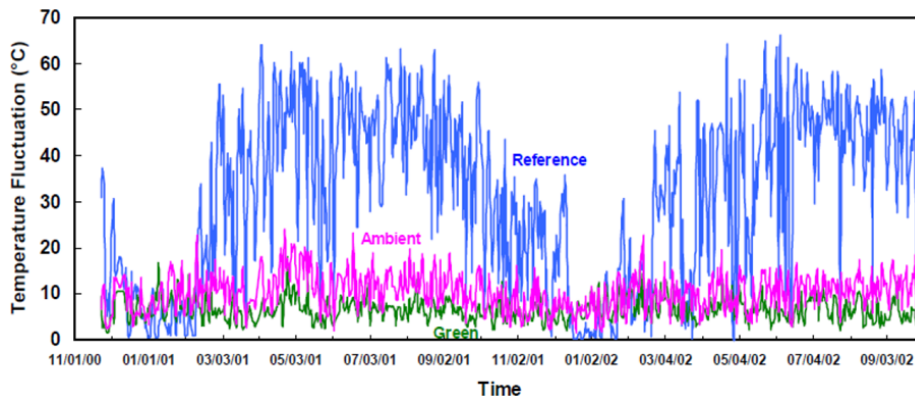
De forskellige delementer der indgår i et grønt tags energibalance, er beskrevet kort nedenfor:

- Varmeledning (konduktion): Den mest simple måde er at flytte varme via molekyler til et koldere sted. Helt grundlæggende, molekylerne i et varmt materiale vibrerer mere end molekylerne i et koldt materiale, og de varme molekyler vil derfor sætte de kolde molekyler mere i bevægelse og derved overføre energien til de kolde molekyler.

- Konvektion: Flytning af varme fra eller til en overflade ved hjælp af en strømmende gas eller flydende væske. Hastigheden for varmeoverførsel stiger med strømningshastigheden.
- Stråling: Elektromagnetisk varmeoverførsel fra alle varmere overflader til alle køligere overflader. Varmestrålingen kan reflekteres, absorberes eller transmitteres gennem en overflade som f.eks. lys gennem et vindue. Solstråling består af kortbølget stråling, der indeholder meget energi, hvilket optages af skyer samt overflader på jorden, f.eks. jord, beton og tegl. Overfladerne bliver herved opvarmet og genudsender energien som langbølget stråling i form af infrarøde stråling. Langbølget stråling indeholder mindre energi end kortbølget stråling.
- Afgivelse af varme ved fordampning: for grønne tage afgives varmen ved at vandet fordamper.
- Transpiration (fordampning fra planterne): er planterens naturlige beskyttelsesforanstaltning mod overophedning af blade. Hvilket grundlæggende er en biologisk motiveret, tvungen fordampningsproces fra bladene. Ved fordampningen reduceres overfladetemperaturen, og derved afkøles den luft, som er i kontakt med bladene. Så længe der er tilstrækkelig med fugt i vækstlaget, vil intensiteten af fordampningen svare til den varmepåvirkning, som planterne udsættes for. Hvilket betyder, at denne biologiske kølemekanisme er tilpasset til omgivelsernes 'varmestress' og er maksimeret i perioder med høj solintensitet.
- Albedo: (lat.: hvid) betegner en overflades evne til at reflektere sollys, det vil sige kaste det tilbage. Albedoeffekten måles på en skala fra 0, som er mørkt (sort), til 1 som er lyst (hvid).
- Termisk masse /specifik varmekapacitet: Evnen til at lagre varme i noget tungt, f.eks. en stor sten, beton eller tegl. Den specifikke varmekapacitet angiver den mængde energi, der skal til for at opvarme 1 kg af materialet 1 grad, og varmekapaciteten fortæller derfor noget om, hvor meget varme der kan lagres i de forskellige materialer.
- Materialernes porøsitet er et udtryk for hvor mange (tilgængelige) hulrum, der er i et materiale. Dette har betydning for, hvor meget vand der kan lagres i det pågældende materiale, og som kan fordampe.

3.2.4 Grønne tages effekt på fugt og termiske forhold

Termiske egenskaber af grønne tage kan reducere energiforbruget i de øverste lejligheder/tagboliger i etagehusene ved at holde taget varmere om vinteren og køligere om sommeren (teoretiske og praktiske erfaringer viser, at køle-mekanismen er mere effektiv end varme-mekanismen), da effekten er afhængig af det grønne tags design og også af en række forhold såsom lokale klimatiske forhold og bygningens eksisterende isoleringsgrad. Figur 8 viser en sammenligning mellem et konventionelt sort referencetag og et grønt tag med hensyn til tagmembranens temperatursvingninger. Det ses, at det grønne tag udjævner temperatursvingningerne, når taget påvirkes af solstråling, ved at beplantningen optager eller reflekterer en stor del af solstrålingen. Dette resulterer i betydeligt mindre temperatursvingninger i tagmembranen.



Figur 9 Grafen viser tagmembranens temperatursvingninger: Det se hvordan det grønne tag reducerer de daglige temperatursvingninger på tagmembranen. (Reference tag (Blå); et grønt tag (Grøn); luftens temperatur (Lilla)). Måleperiode: 22. nov. 2000 til 30. sep. 2002, Canada. [33]

3.2.5 Grønne tages påvirkning af energiforbruget

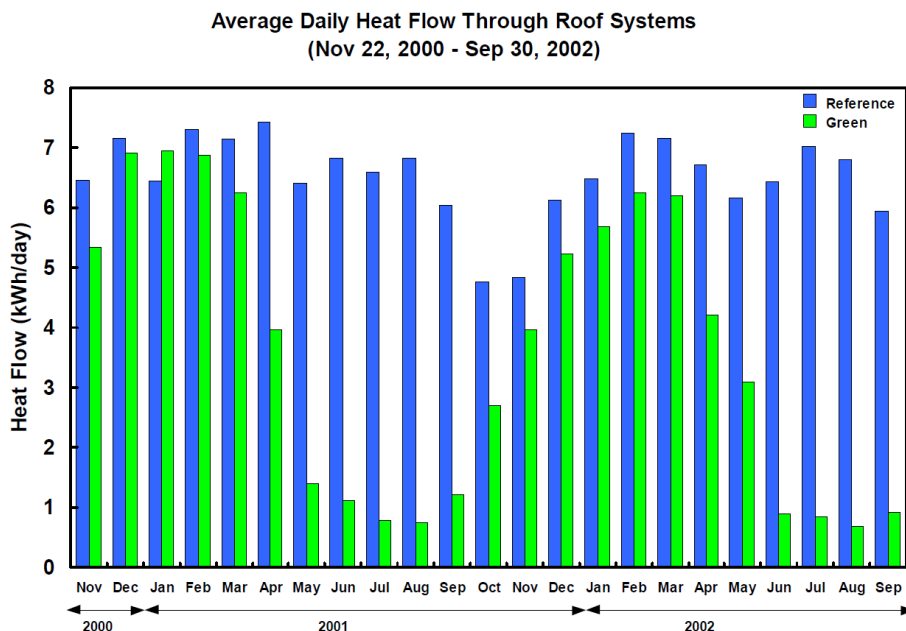
Grønne tages høje varmekapacitet gør, at temperaturen stabiliseres. Derudover virker fordampning af vand fra planternes ofte ret tykke blade (der lagrer store mængder vand) og vækstmediet, kølende. Grønne tage har pga. farven en bedre evne til at reflektere UV-stråling (kaldt albedo) end normale tage, hvilket også bidrager til en kølende effekt. Størstedelen af UV-strålingen absorberes dog af planterne via fotosyntese.

Et canadisk studie viste således, at tagmembranens overfladetemperatur under beplantningen i koldt klima gennemsnitligt kun varierede 6° C i forhold til et konventionelt sort tag, hvor temperaturudsving over dagen var hele 45° C [34]. Denne temperaturstabiliserende effekt er mest udpræget om sommeren og i mindre grad om vinteren. Dette skyldes forskellige mekanismer, der virker samtidig. Om sommeren medfører de høje temperaturer, at vandet fra planterne fordamper hurtigt. For at vand kan blive til vanddamp, skal der tilføjes energi. Denne energi (fordampningsvarme) stammer fra den omgivende luft, som derfor afkøles. Om vinteren er det især varmekapaciteten, der forhindrer varmetab, hvilket påvirker energiforbruget positivt.

At tagmembranens overflade under beplantningen forbliver varmere om vinteren og køligere om sommeren, reducerer bygningens energiforbrug til hhv. opvarmning og nedkøling. I det nævnte studie fra Canada viste forskerne, at grønne tage reducerer det gennemsnitlige daglige energibehov for klimaanlæg om sommeren med mere end 75 % [33]. Selvom effekten også ses om vinteren, er den mindre udtalt. Figur 9 viser årstidsvariationen i varmestrømmen gennem taget for hhv. grønne tage og konventionelle tage.

INFO

Grønne tages forbedrede termiske ydeevne resulterer i et mindre udsving i tagets overfladetemperatur sammenlignet med almindelige tage. Hvilket kan føre til reduceret køle- og varmebehov. Denne effekt vil være begrænset for bygninger med større isoleringstykkelser i tagkonstruktionen.



Figur 10 Heat flow målingen viste, at det gennemsnitlige daglige energibehov på grund af varmestrømmen gennem grønt tag var signifikant mindre end referencetaget i foråret og sommeren. [33]

Spala et al. [35] undersøgte effekten af et grønt tag på køle- og varmbehov for en kontor bygning i Athen, Grækenland. Det blev observeret, at det grønne tag kunne reducere månedskølebehovet med 15-39% i perioden maj til september for hele bygningen, og kunne reducere månedskølebehovet for den øverste etage med 27-58%.

I litteraturstudiet af Theodosiou [19] blev det konkluderet, at de fleste undersøgelser er enige om, at selvom de ekstra lag kan bidrage til en forøgelse af tagets varmeisolering, så er forøgelsen relativt lille. Det gælder specielt i de kolde perioder, hvor vækstlaget vil være vandmættet det meste af tiden. Det grønne tag kan derfor ikke erstatte den almindelige varmeisolering i tagkonstruktionen. Det positive bidrag til energiforbruget vil i nogle situationer være mere tydeligt i sommerperioden, hvor undersøgelserne generelt er enige om, at det grønne tag kan reducere kølebehovet.

Møller og Jensen [36] beskriver ligeledes, at grønne tages kølemekanisme synes at være bedre end dets varmeisolering. Det nævnes også, at det grønne tag i nogle tilfælde endda kan føre til øget varmetab, f.eks. på klare, solrige dage om vinteren, da vegetationen på det grønne tag kan have en kølende effekt via fordampning og skyggeeffekt, eller vandet i vækstlaget, der hvis det fryser, har en højere varmeledning end luft. For et godt isoleret tag vil selv et tykt grønt tag ikke have den store effekt på hverken køling om sommeren eller reduktion af varmetabet om vinteren. For dårligt eller ikke isolerede bygninger kunne derimod være en gevinst at hente. Det nævnes, at en isoleringstykkelse på 5-10 cm som udgangspunkt vil kunne udligne effekten af det grønne tag.

OBS

Resultaterne fra Canada viser, at reduceret energibehov ved et grønt tag ift. et konventionelt sort tag ikke er direkte sammenlignelige med grønne tage i Danmark. Dette skyldes at: 1) vi i Danmark har et mindre antal soltimer der kan opvarme tagoverfladen, og 2) vi har tradition for at bruge store isoleringstykkelser i taget, som bremser varmestrømmen gennem taget til indeklimaet. Selvom det tænkeligt vil have en mere begrænset effekt på varme- og kølebehovet i danske bygninger, så vil grønne tage stadig kunne føre til en reduktion af storbytemperaturerne om end i mindre omfang.

3.2.6 Indeklima

Niachou et al. [37] undersøgte den termiske ydeevne af et grønt tag i Athen, Grækenland, hvor det blev observeret, at indetemperaturen blev reduceret med 2 °C i undersøgte perioder i juli måned. Antallet af inde temperaturer over 30 °C i perioden 30. juni til 17. august blev reduceret med 73%. Et andet studie fra Californien, USA, viste, at et grønt tag kunne reducere inde temperaturer med 3-4 °C i de varme måneder. For danske forhold, som nævnt ovenfor, vil den positive effekt fra det grønne tag være minimal grundet, at vores velisolerede bygninger i langt mindre grad vil blive påvirket af svingninger i tagets overfladetemperatur.

3.2.7 Støjreduktion

I feltstudiet af Van Renterghem & Botteldooren [38], har man udført in-situ målinger til sammenligning af den akustisk effekt på 5 ekstensive grønne tage. Fra studiet konkluderede man, at grønne tage kan virke lyddæmpende på to måder; via en forbedret isolering og via absorption af lydbølger. Målinger viste, at grønne tage kan føre til konsekvent og markant lydreduktion på steder, hvor kun diffrakterede lydbølger ankommer i forhold til konventionelle tage.

3.2.8 Biodiversitet i byerne

Biodiversitet er betegnelsen for biologisk diversitet, dvs. variationen af gener, arter og økosystemer i den levende natur. I dag er biodiversiteten mange steder truet og arter uddør. På grund af intensivering af landbruget og urbanisering, overudnyttelse, forurening, klimaændringer og introducerede arter, som konkurrerer med de oprindelige dyr og flora. Hvilket alt sammen skader de naturlige økosystemer. Det vurderes, at tabet af biodiversitet er så stort, at der er tale om en krise, der kan sammenlignes med klimakrisen. Det påpeges, at når først de naturlige økosystemer er ødelagt, er det ofte dyrt og nogle gange umuligt at genoprette dem [39]. Et feltstudie fra Chicago regionen, USA [40], sammenlignede bisamfund på 6 grønne tage, i 6 byparker og 6 prærier over en sommer periode. Studiet viste at:

- Hjemmehørende bier er til stede på grønne tage, selv ved lavere tæthed og diversitet end i referencen (dvs. levesteder for bier i Chicago-regionen).
- Der blev indsamlet færre bier og færre biarter på grønne tage i forhold til byens parker eller prærier.
- I forhold til antal af bier og diversiteten i bi samfundet, var de grønne tage og prærie tydeligt forskellige fra hinanden, mens byparker var mellemtilgængelige og lignede de grønne tage og prærie.
- Biernes samfund er signifikant forskellige alt efter naturtype, og var signifikant korreleret med blomstrende plantesamfund på stedet. Der blev observeret en positiv korrelation mellem størrelsen af naturområderne og antal bier og biernes artsrigdom.
- Grønne tage er potentielt værdifulde for bevarelse af bier i byerne.

OBS

For danske forhold, vil der med Danmarks velisolerede bygningsmasse være minimale energibesparelser at hente i vintermånederne. Fremadrettet kunne der til gengæld være et potentiale ift. reduktion af kølebehovet, med forventningerne om et varmere dansk klima i fremtiden.

4. Projektering og udførelse

Grønne tage er tage, der delvist eller helt er dækket af planter af forskellig art såsom græs, stauder, buske eller træer. Oftest bruges lave, hårdføre planter (sedum og græs), der erfaringsmæssigt egner sig til længere tørkeperioder, da de gemmer meget vand i deres tykke blade. Planterne sidder i et vækstlag, som ikke består af almindelig havejord, men derimod et industrielt fremstillet substrat. Nedenunder er der yderligere forskellige lag, der dækker over et vandreservoir, beskyttelse mod penetration af rødder, vand og fine partikler samt isolering. Lagene kan variere afhængig af anvendelsen. Der skelnes mellem forskellige former for grønne tage: ekstensive, intensive og semi-intensive tage alt efter vækstlagets tykkelse og vegetation. Grønne tage har flere funktionelle lag, der afhænger af tagtypen.

4.1 Design og bæreevne egenskaber

Byggeri med grønne tage har til formål at opnå en bæredygtig løsning, der er miljømæssig ansvarlig og ressourceeffektiv i hele tagets livscyklus fra design til dekonstruktion.

Design af grønne tage medfører en opbygning med jordlag og beplantning på taget. Dette påvirker anvendelse og vedligeholdelse samt medfører ekstra belastninger på konstruktionen, som der skal tages fornødent hensyn til i designfasen.

Udover almindelige belastninger som egenvægt fra den bærende konstruktion og jorden, samt variable laster fra sne og personlast, (se Figur 10) skal man være særlig opmærksom på at regnvandet i sig selv kan være en betydende lastpåvirkning af konstruktionen – her især hvis taget anvendes som egentlig reservoir.

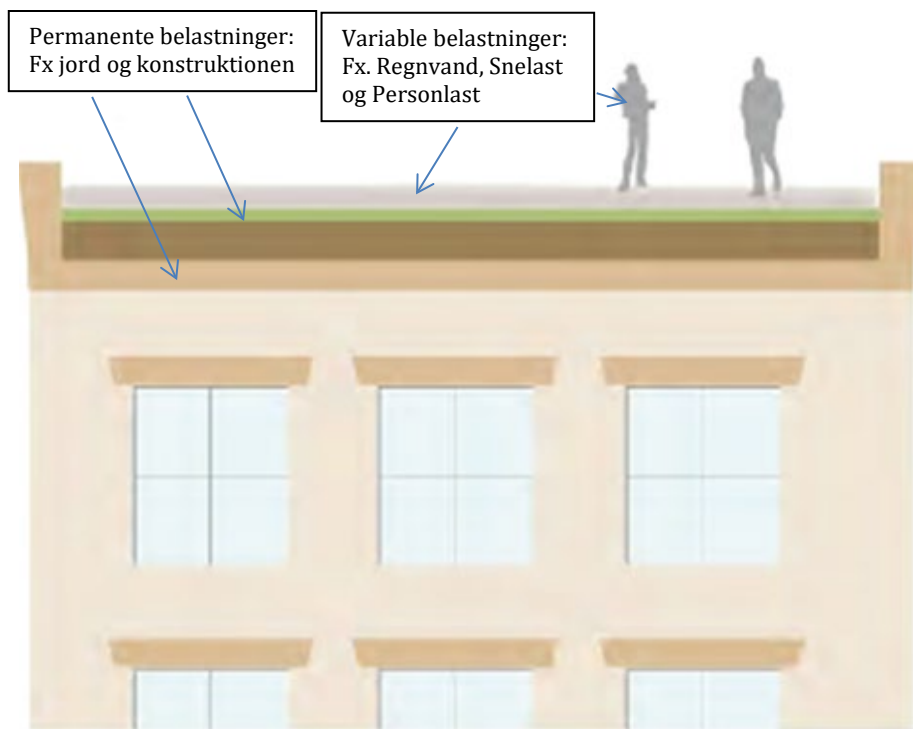
I designet af taget bør man endvidere være opmærksom på, at løbende vedligehold kan blive vanskeliggjort af den grønne tagoverbygning, hvorfor afløb og andre vedligeholdskrævende konstruktioner bør indbygges, så de er tilgængelige ved eventuelt behov for vedligehold eller udskiftning. Selve designet af det grønne tag skal også tage hensyn til, at de rette betingelser for dræning er til stede, da en utilstrækkelig dræning kan føre til skader i membranen, se også [3].

Der skal være særlig opmærksomhed under designet ved opbygning af grønne tage over fugtfølsomme konstruktioner, såsom tagkonstruktioner opbygget med tagspær i træ, så der ikke indbygges skjulte svigt i konstruktionerne.

OBS

Grønne tage medfører ekstra belastninger fra jord og regnvand.

Fugtfølsomme konstruktioner under grønne tage bør have særlig opmærksomhed i designfasen.

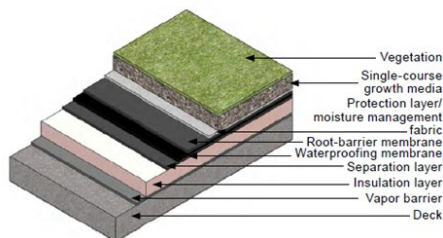


Figur 11 Belastninger på taget

4.2 Eksempler på opbygning af grønne tage

Ekstensive

Ekstensive tage har et tyndt vækstlag med sukkulente planter som sedum, der kan overleve under barske forhold. Ekstensive tagene kræver minimal vedligeholdelse, når de er etableret og er normalt omkostningseffektive, især i bygninger med lang levetid.



Det grønne tag

- (1) Vegetation
Der anvendes mangeårige, tørketålende plantearter, typisk sedum, mosser, urter og græsser. Dyrkes af frø, sedum skud, eller specielle præfabrikerede vegetationsmåtter.

- (2) Enkelte vækstmedier (Max. 60 mm)
Vækstlag; specialfremstillet vækstmedie.

- (3) Beskyttelseslag
Beskyttende lag bestående af filtdug, måtter af gummigranulat eller lign. som sikrer mod mekanisk beskadigelse.

Vandregulerende lag

Opbevaring af regnvand og bortledning af det overskydende vand til dræningsfaciliteter. Drænlaget kan være fremstillet af løse materialer såsom lavasten eller plast. Drænlaget sikrer ventilation af rødderne.

- (4) Rodbarrieremembran
Rodsikringslag beskytter mod gennemtrængen af vand og planterødder.

Underliggende tagkonstruktion

- (5) Tagmembran
- (6) Adskillelseslag

- (7) Isolationslag
- (8) Dampspærre
- (9) Dæk

Figur 12 Ekstensive grønne tage [2]

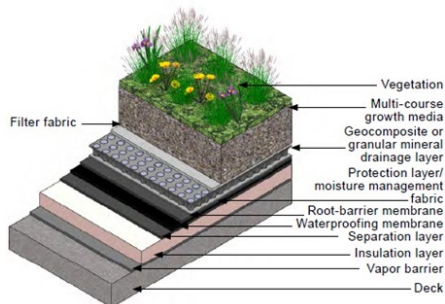
Intensive

Intensive tage har et tykkere vækstlag og bør betragtes som et landskab med planter, der findes i parker og haver. Disse planter kræver vanding i tørre perioder. På grund af deres tykkere og tungere vækstlag, kræver intensive tage større strukturel støtte end ekstensive tage. Men intensive tage har også større potentiale for gavnlige effekter på mikroklima og rekreativt brug end ekstensive tage.



- Det grønne tag
- (1) Vegetation (mange forskellige plantearter)
Mangeårige, gennemprøvede plantearter som dem der også kan findes i alm. have såsom græs, stauder, træer og buske. Planter som stauder, planter som kommer med jord og rødder og rullegræs.
 - (2) Flerlags vækstmedier (Min. 151 mm)
Vækstlag; specialfremstillet vækstmedie.
 - (3) Filter stof
Filtudug, som adskiller drænlaget og vækstlaget. Forhindrer gennemtrængningen af fine partikler til drænlaget.
 - (4) Geokomposit eller granuleret mineral vandregulerende lag
Opbevaring af regnvand og bortledning af det overskydende vand til dræningsfaciliteter. Drænlaget kan være fremstillet af løse materialer såsom lavasten eller plast. Drænlaget sikrer ventilation af rødderne.
 - (5) Beskyttelseslag
Beskyttende lag bestående af filtudug, måtter af gummigranulat eller lign. som sikrer mod mekanisk beskadigelse.
 - (6) Rodbarrieremembran
Rodsikringslag beskytter mod gennemtrængningen af vand og planterødder.
- Underliggende tagkonstruktion
Tagunderkonstruktionen skal have tilstrækkelig bæreevne.
- (7) Tagmembran
 - (8) Adskillelseslag
 - (9) Isolationslag
 - (10) Dampspærre
 - (11) Dæk

Figur 13 Intensive grønne tage [2]



- Det grønne tag
- (1) Vegetation
Mangeårige, gennemprøvede plantearter. Semi-intensive grønne tage udføres oftest med græs, bunddække, stauder, urteagtige planter og mindre buske (eventuelt blandet med sedum).
 - (2) Flerlags vækstmedier (61-150 mm)
Vækstlag; specialfremstillet vækstmedie.
 - (3) Filter stof
Filtudg, som adskiller drænlaget og vækstlaget. Forhindrer gennemtrængning af fine partikler til drænlaget.
 - (4) Geokomposit eller granuleret mineral vandregulerende lag
Opbevaring af regnvand og bortledning af det overskydende vand til dræningsfaciliteter. Drænlaget kan være fremstillet af løse materialer såsom lavasten eller plast. Drænlaget sikrer ventilation af rødderne.
 - (5) Beskyttelseslag Beskyttende lag bestående af filtudg, måtter af gummigranulat og lign. som sikrer mod mekanisk beskadigelse.
 - (6) Rodbarrieremembran
Rodsikringslag beskytter mod gennemtrængning af vand og planterødder.

Underliggende tagkonstruktion
Tagunderkonstruktionen skal have tilstrækkelig bæreevne.
 - (7) Tagmembran
 - (8) Adskillelseslag
 - (9) Isolationslag
 - (10) Dampspærre
 - (11) Dæk

Figur 14 Semi-intensive grønne tage [2]

4.3 Sikre tætheden af tagmembranen

For at mindske risikoen for huller i tagmembranen anbefales det, at man sørger for så vidt muligt at beskytte membranen under udførelsesperioden, og grundigt planlægge, hvornår membranen skal installeres i forhold til øvrige aktiviteter. Man skal være opmærksom på at få fjernet eventuelle byggerester (søm, skruer mm.) inden installation af membranen. Færdsel på membranen før udlægning af det grønne tag skal mindskes mest muligt, hvorfor det anbefales at etablere færdselsveje. Derudover anbefales det, at membranen ikke anvendes som oplagingsplads for byggematerialer. [3]

Tæthedsprøvning af tagmembranen: det kan være vanskeligt og dyrt at lokalisere eventuelle utætheder i membranen under det grønne tag, da membranen ikke er synlig, når taget er færdigt. Det kan føre til at større eller mindre områder af det grønne tag må fjernes for at udbedre fejl. Det anbefales derfor, at der føres skærpet tilsyn under udførelsesperioden, og der kan eventuelt udføres en tæthedsprøvning, f.eks. ved vandprøve (anvendes med omtanke da denne metode kan føre til følgeskader i tilfælde af utætheder) eller ved scanning af membranen med elektrisk detektering (se afsnit 8, for mere om elektrisk detektering). [3]

4.4 Specifikke krav for grønne tage

4.4.1 Taghældning og fald mod afløb

Det blev i 2010 besluttet af Københavns Kommune, at alle kommunale bygninger, som opføres med en taghældning på 30° eller derunder, skal etableres med grønt tag. Ved renovering af eksisterende byggeri skal der også ske en begrønning, hvis forudsætningerne er til stede [41].

Jf. SBI 273 [4] skelnes der mellem ekstensive og intensive grønne tage ift. fald mod afløb:

- Ekstensive grønne tage skal udføres efter samme regler som konventionelle tage, dvs. med et fald på mindst 1:40.
- For intensive grønne tage afhænger fald mod afløb af det grønne tags opbygning. For retvendte grønne tage skal faldet være på mindst 1:40, mens omvendte tage og duo-tage kan konstrueres med mindre fald på mindst 1:100, fordi membranen er beskyttet af den ydre isolering. Derudover skal intensive grønne tage forsynes med et drænlag, der sikrer afvanding

OBS

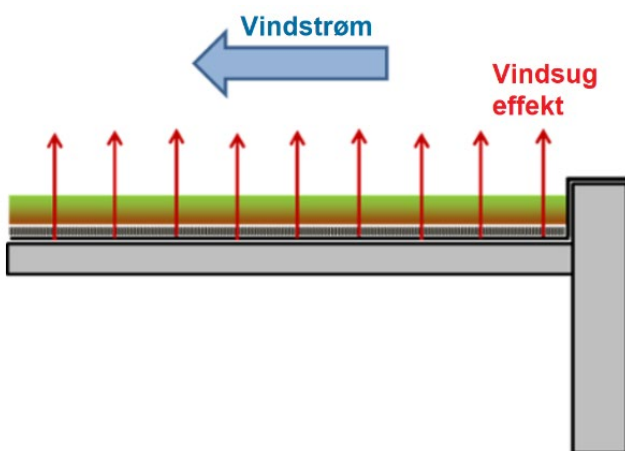
Ved taghældninger over 1:5 (11°) skal grønne tage forsynes med vinkelskinner eller lignende tiltag for at fastholde tagdækningen og derved sikre mod nedskridning. Typisk anbefales det ikke at installere grønt tag ved en taghældning på over 30°. Det gælder dog ikke græstage

4.4.2 Opdrift og vinderosion

Grønne tage skal konstrueres, så de er stabile overfor vindpåvirkning, og så der ikke forekommer stormskade, hvor grønne tage rives af bygninger eller at vækstmediet eroderes over tid af vinden.

Opdrift

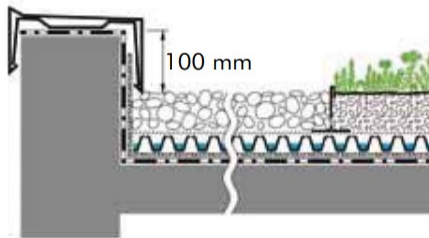
"Tagflader er særlig udsatte for vindpåvirkning i rand- og hjørnezoner, hvor de udsættes for opadrettede kræfter i form af et vindsug. Vindsuget på selve det grønne tag afhænger af muligheden for trykudligning mellem det grønne tag og selve tagdækningen." [4]



Figur 15 Effekten af vind på overfladen af et grønt tag. Kilde original illustration: [42]

Anbefalinger

Jf. Eurocode 1 Del 1-4 med tilhørende dansk anneks er det muligt at fordele vindlasten med 2/3 på tagdækningen og 1/3 på det grønne tag, hvis der anvendes vandafledningsplader, som muliggør trykudligning. Der skal etableres en tilstrækkelig fladevægt til at modstå suget på det grønne tag. Under normale vindforhold vil en fladevægt på 25 kg/m² i tør tilstand (50 kg/m² i vandmættet tilstand), normalt kunne sikre en tilstrækkelig egenvægt overfor vindpåvirkning. Sten render langs ydre tagkanter bør opbygges mindst 100 mm under overside af murkrone, se Figur 15.



Figur 16 Sten render langs de ydre tagkanter. Kilder: [43]

OBS

For at forebygge opdrift og vinderosion, skal tagkonstruktionen stabiliseres mod vind-sug for eksempel vha. høje murkroner eller sten/flise render langs de ydre tagkanter, der vil være mindre sårbar overfor vindpåvirkning.

Vinderosion

Ved vinderosion fjernes bittesmå jordpartikler af vinden. På grønne tage er det således vækstmediet, der med tiden kan blive reduceret., hvilket i sidste ende kan føre til ødelæggelse af det grønne tag. Dette kan være en alvorlig udfordring specielt i åbne områder, hvor vinden ikke bliver dæmpet af forhindreder, fx i kystnære områder og i byområder, hvor tilstødende bygninger forårsager turbulens i rand- og hjørnezoner [44].

Anbefalinger

Jo mere plantevækst, der er på taget, jo mere beskyttet er taget mod vinderosion, da planternes blade skaber en ru overflade der reducerer turbulens [2], [45]. Derudover stabiliserer planternes rødder vækstmediet og holder de forskellige lag af grønne tage sammen.

4.4.3 Rodpenetration og bionedbrydning

Rodpenetration og bionedbrydning af vækstmedie er de to typer af svigt for grønne tage, som kan medføre udfordringer, der kan føre til skader i de grønne tage.

Rodpenetration

Planter med aggressive rødder kan med tiden ødelægge den vandtætte membran (vandbeskyttelseslaget) på grønne tage.

Det anbefales ikke at anvende kemiske rodhæmmende produkter på grønne tage, fordi de vil blive udvasket med tiden. Desuden kan de forårsage vandforureningsproblemer. I stedet kan der bruges egnede materialer med tilstrækkelig rodresistens. Hvis der ikke er tilstrækkelig rodresistens, kan det føre til skade på det grønne tag herunder på den underliggende membran.

Anbefalinger

- Termoplastiske membraner egner sig bedst som rodbeskyttelse.
- Alle vandtætte membraner skal testes for rodresistens, dvs. testens formål er at måle vandtætningsmembraners sårbarhed over for rodskader.

Biologisk nedbrydning af medierne

Biologisk nedbrydning af plantefibre og andre organiske bestanddele i vækstmediet, der indeholder høje niveauer af organisk materiale, kan føre til et sammenbrud af jordens struktur, reduceret dræningskapacitet og anoxiske (iltfrie) forhold, der hæmmer plantevækst. Et skadet vækstmedium kan sjældent forbedres og må derfor erstattes helt gennem udskiftning af materialet.

Anbefalinger

- Vækstmediet bør have et lavt indhold af organisk materiale.

4.4.4 Brand

I modsætning til andre bygningsmaterialer, er grønne tage foranderlige afhængigt af vejrligsforhold, årstid og planternes alder, hvilket betyder, at der kan være variationer i tagets brandforhold. Bygningens brandsikkerhed skal opretholdes i hele dens levetid og i henhold til bygningsreglementet, så der opnås tilfredsstillende sikring mod brand og mod brandspredning til andre bygninger på egen og omliggende grunde. Det er en forudsætning, at tagdækningen under det grønne tag er klassificeret som $B_{ROOF}(t2)$. Ved enfamiliehuse, sammenbyggende enfamiliehuse, sommerhuse og boliger på 2 etager, er der dog mulighed for at anvende tagdækninger med en brandklasse ringere end $B_{ROOF}(t2)$ [4], [46].

For brandforhold skelnes der mellem ekstensive og intensive grønne tage:

- Ekstensive grønne tage brandsikres ved at anvende brandprøvede systemer eller ved hindring af brandspredning gennem konstruktive tiltag fx i form af adskillende brandbælter, en minimumstykkelse af vækstlaget og maksimalt indhold af organisk indhold i vækstlaget.
- Intensive grønne tage forventes vedligeholdt, så vegetationen ikke tørrer ud og fører til øget risiko for brand.

5. Vedligeholdelse af grønne tage

Driftsomkostningerne er typisk højere for grønne tage end for konventionelle sorte tage, og mangelfuld vedligeholdelse kan få betydelig konsekvenser ift. tætheden af membranen, vandaflledning og brandsikkerheden. Det anbefales derfor som udgangspunkt altid:

- At renholde afløb, stenrender, overløb og lignende 2 gange årligt
- At kontrollere at inddækningshøjder ikke reduceres grundet et øget vækstlag
- At kontrollere plantevæksten, herunder fjerne utilsigtet plantevækst hvis rodnet kunne gøre skade på ikke rodfaste membraner
- At kontrollere tagets tæthed
- At brandsikkerheden sikres, herunder sikre at det grønne tag vandes og hindre utilsigtet plantevækst

Ved etablering af grønne tage bør der altid foreligge en vedligeholdelsesplan, hvilket inkluderer generel information om vedligehold samt oplysninger om pleje af anvendt vegetation, i henhold til leverandørens anvisninger.

Levetiden af grønne tage har betydning for totaløkonomien. Ofte er vedligeholdelses- og driftsomkostningerne mere dominerende end etableringsomkostningerne. Intensive tage kræver hyppigere og længere vedligeholdelsesbesøg end ekstensive tage, både i etableringsperioden og bagefter.

6. Totaløkonomi (LCC) og Livscyklusvurdering (LCA)

6.1 Levetid af grønne tage

Den forventede levetid er en vigtig parameter i totaløkonomiske beregninger (LCC) og livscyklusvurderinger (LCA) af grønne tage. Selvom initialomkostningerne er større for grønne tage end for konventionelle tage, er der eksempler på at den høje initialinvestering for grønne tage er genvundet på det tidspunkt, hvor det konventionelle tag ville blive udskiftet, se [47]. Derudover har grønne tage et reduceret behov for renovering og udskiftning, hvilket sparer ejeren for store udgifter i den forbindelse. Denne fordel opvejes dog i hvert fald til en vis grad af større omkostninger til etablering og større behov for løbende vedligehold og eftersyn af grønne tage sammenlignet med konventionelle tage. [48] fandt, at det at grønne tage skal udskiftes sjældnere end konventionelle tage er den største drivkraft til at opnå break-even ift. omkostninger og fordele, efterfulgt af energibesparende fordele. Dog er der andre undersøgelser, der viser at dette ikke altid er opfyldt, se fx [49], der viser eksempler på grønne tage, der ikke kan kompensere for deres initialomkostninger, selvom de har længere levetid end hvide eller sorte tage.

Man regner med, at den forventet levetid for grønne tage er på 40-55 år [47], [50] mod 20-35 år for konventionelle tage, så man kan sige, at levetiden fordobles [49]. Velbyggede konventionelle og grønne tage kan også opnå længere levetider. Tabel 4 og Tabel 5 viser sammenligninger mellem grønne, hvide og sorte tage med henblik på levetid for de forskellige typer tagkonstruktioner. Der findes dog mange forskellige studier med noget varierende resultater, så tallene er noget usikre. Faktorer som forskelle i klimaforhold, det grønne tags beplantning, håndværksmæssig udførelse m.m. kan være skyld i denne variation. Årsagen til grønne tages længere levetid er, at ældning af tagmembranen pga. UV-stråling, termisk, mekanisk og kemisk påvirkning forsinkes. Levetiden af grønne tage afhænger meget af tagmembranens levetid [51]. Til gengæld vil grønne tage være eksponeret for mere fugt, da taget vil have længere perioder med høj relativ luftfugtighed. Derudover vil der også være en øget eksponering fra fine partikler, der udvaskes fra vækstlaget. Tagmembranen skal derfor være egnet til at kunne modstå disse forøgede påvirkninger.

OBS

Studier viser at grønne tage generelt har en højere forventet levetid end konventionelle tage, da forvitring af sensible dele af taget stort set undgås. Tagmembranen vil dog være eksponeret for længere perioder med høj relativ luftfugtighed og øget eksponering fra fine partikler. Tagmembranen skal derfor kunne modstå disse forøgede påvirkninger.

Tabel 6 Gennemsnits værdier for levetid af tre typer af grønne tage. [49]

	Green	White	Black	Remarks
Installation, replacement and maintenance				
First installation cost (\$/m ²)	172	22	22	Median value from Table 2, including labor
Replacement cost (\$/m ²)	57	22	22	Equal to installation cost for white and black, 1/3 of installation cost for green
Maintenance cost (\$/m ² year)	2.9 ^a	0.2	0.2	Median value from Table 2; assumes black equals white
Roof life (years)	40	20	20	Median value from Table 2
Disposal cost (\$/m ²)	1.3	0	0	One-time cost
Energy-related benefits (relative to black)				
Avoided heating fuel cost (\$/m ² year)	0.3	0 ^b	0	Median value from Table 2
Avoided cooling electricity cost (\$/m ² year)	0.3	0.2	0	Median value from Table 2
Peak load shaving benefit (\$/m ²)	2.2	2.2 ^c	0	CMU/ABSC [37]
Air-quality-related benefits (relative to black)				
Avoided CO ₂ emission ^{d,e} (kg/m ² year)	5.7	4.3	0	Estimated from energy saving data
Avoided NO _x emission ^{d,f} (\$/m ² year)	0.011	0.009	0	Estimated from energy saving data
Avoided SO ₂ emission ^{d,f} (\$/m ² year)	0.013	0.011	0	Estimated from energy saving data
CO ₂ e offset by global cooling ^e (kg/m ²)	34	100	0	One-time
Stormwater-related benefits (relative to green)				
Annual stormwater fee (\$/m ² year)	0	0.9	0.9	Assumes white and black retain same amount of stormwater as green—impervious surface fee ^g
Annual stormwater BMP maintenance (\$/m ² year)	0	1.5	1.5	Median value [12]
Stormwater BMP equipment cost (\$/m ²)	0	44.7	44.7	One-time/replacement

^a The cost is spread across the 50 years; adopted from GSA [12].

^b None of the 22 case studies provided data for the winter heating penalty, thus this figure likely overstates the net savings.

^c Data available for green roof only. Same value was assumed for white roofs because the cost difference is insignificant.

^d Emission factors for heating fuel from EPA [38]; emission factors for electricity from EPA [39].

^e Price information for CO₂, increasing linearly from \$0/tons in 2005 to \$115/tons in 2060, from Fuller and Peterson [40].

^f Price information for NO_x and SO₂ from Niu et al. [15].

^g This assumption refers to case #11 (Portland Building) in which up to 35% of the stormwater fee can be waived by installing a green roof or another best management practice [13].

Tabel 7 Sammenligning af levetid af 'grønne' og konventionelle tagmembraner [2]

LIFETIME, YEARS	GREEN	BLACK
GRHC Life Cycle Cost Calculator	25	17
LBNL Research	29	14
Fraunhofer Institute	40	15
European Federation of Green Roof Associations	60	30
Mann, G. (2002) <i>Approaches to object-related cost-benefit analysis</i> .	50	25
Single Ply Systems & Glass, GAF Materials Corp, SBS/TPO average*	n/a	14
AOC Dirksen Green Roof Study	50	17

*Dataene repræsenterer et gennemsnit.

6.2 Totaløkonomi (LCC)

Der er udført mange studier af LCC og cost-benefit-analyser på grønne tage. Det er overkommeligt at beregne håndgribelige omkostninger såsom arbejdskraft- og materialeomkostninger, men at værdisætte de "immaterielle" sociale fordele, er vanskeligere. Det kan fx være regnvandsopbevaring, forbedring af luftkvaliteten, afbødning af byernes varme-ø-effekt, æstetik og urban biodiversitet. Disse sociale fordele giver tydeligst afkast i stor-skala byggerier. Den overordnede konklusion tyder på, at grønne tage har en bedre totaløkonomi end konventionelle tage på grund af deres energibesparelser og forlængede levetid, se [52] [53] [54] [47]

[55] [56] [57]. Det er tydeligt, at inddragelse af sociale fordele kan forbedre vurderingen af grønne tage, men det er en udfordring at tildele pålidelige økonomiske værdier til forskellige sociale fordele, såsom øget biodiversitet, bedre helbred og mangfoldige muligheder for sociale aktiviteter, se [53] [54] [58]. Der er dog også en betydelig risiko for negative afkast på investeringer i grønne tage på grund af variation af flere meget usikre faktorer, såsom tagtype, materiale- og arbejdsomkostninger, rente og lokalt klima, se [53] [59] [58] [49] [60] [61]. Derudover påpeger [52] at, i de nordiske kolde klimaer, er energibesparelserne af grønne tage ubetydelige, hvilket tyder på, det er de sociale fordele nævnt ovenfor, der vil bidrage mest til de grønne tages værdi. Da disse effekter er svære at kvantificere, er den økonomiske fordel af grønne tage svær at bestemme entydigt i de nordiske lande.

For eksempel fandt [54] at grønne tage i øjeblikket ikke er omkostningseffektive på en privat omkostningsbasis, men bliver konkurrencedygtige for flerfamiliehuse og kommercielle bygninger, når sociale fordele er inkluderet. [55] har kategoriseret sociale fordele ved grønne tage henholdsvis privatøkonomisk og samfundsøkonomisk. De fandt for de undersøgte bygninger, at tilbagebetalingstiden for grønne tage er ca. 13 år, når man kun ser på fordelene privatøkonomisk, men bliver nærmere 3 år, når man inkluderer de sociale fordele samfundsøkonomisk. [56] fandt, at når der tages hensyn til energibesparelser, regnvandsreduktion og kommunale tilskud, er et grønt tag i Schweiz 27 % - 37 % billigere end et konventionelt fladt tag, og tilsvarende er det 16 % - 26 % billigere i Holland. [60] fandt, at grønt tag er 10 % til 14 % dyrere end konventionelle tage, men bliver mere omkostningseffektivt i en følsomhedsanalyse, når man inkluderer sociale fordele eller ændrede parametre for rente, byggeomkostninger og energipriser. De fandt, at det grønne tag er 20 % -25 % billigere end det konventionelle tag over 40 år, når man inkluderer forbedring af luftkvaliteten og reduktion af regnvand. [53] fandt, at grønne tage er en "lavrisiko"-investering, med en tilbagebetalingstid på investeringen er 4-14 år.

6.3 Livscyklusvurdering (LCA)

Livscyklusvurdering (LCA) er en standardiseret metode, der kan bruges til at kvantificere miljøpåvirkningen af grønne tage gennem deres livscyklus. Flere LCA-studier har konkluderet, at grønne tage er en miljøvenlig løsning, se [62] [63] [50] [64] [65] [66] [67] [68]. I modsætning hertil viste [69], at det globale opvarmingspotentiale (GVP) for grønne tage er næsten det samme som for andre tagtyper. [49] fandt, at hvide tage er bedre end grønne tage med hensyn til GVP. [70] viste, at et sten-/grusbelagt tag i nogle tilfælde er et bedre valg end grønne tage med hensyn til miljømæssig ydeevne.

Samlet set er LCA analyser på grønne tage meget case-specifikke. Det afhænger blandt andet af de forskellige parametre, der undersøges. Forskellig levetid, materialeegenskaber og tagtype giver forskellige resultater, se [54] [66] [69] [66] [71] [62] [72] [73]. Det er derfor ikke muligt at give en generaliseret konklusion uden en detaljeret analyse.

Ifølge [74] har kun 35% af LCA-studier for grønne tage dækket hele livscyklussen. Afhængig af design og materialevalg vil nogle grønne tages materiale eller -lag bidrage til betydelig miljøpåvirkning, fx XPS og mineraluld, se [63] [72]. For at opnå en robust analyse er det nødvendigt at evaluere grønne tage, hvor alle lag og alle materialeegenskaber er medtaget gennem hele livscyklussen.

7. Erfaringer fra byggebranchen

De senere år har der været en del fokus på grønne tage, specielt i København. Københavns kommune har i 2012 udgivet en rapport indeholdende en række case bygninger og cases for lokal planer med implementering af grønne tage [75].

Erfaringer fra danske case bygninger:

Skemaerne i Bilag A viser eksempler på case bygninger med grønne tage. Der præsenteres information om bygninger og tag konstruktioner, erfaringer i forhold til skader, andre udfordringer, positive erfaringer, samt særlige forhold vedrørende vedligehold af grønne tage. Der er indhentet data og erfaringer for følgende case bygninger:

- Det nye rigsarkiv, Kalvebod Brygge 32, 1560 København
- Birkegade 4-6, 2200 København N
- Skovbrynet, Torvegade 14-16, 3300 Frederiksværk
- Korsgadehallen, Korsgade 29, 2200 København
- Soklen 2-14, Fatningen 1-17, Fatningen 2-20. 2730 Herlev.
- Sandbjergvej 11-13, Sportsvej 12-18, Vestergårdsvej 22-78, Stadionvej 61-79 og Stadionvej 87-141. 2600 Glostrup.

Erfaringsopsamlingen for de 6 danske case bygninger viste, at der generelt ikke var mange skader i de grønne tagkonstruktioner. De steder, hvor det er gået galt, har det hovedsageligt været på grund af komplekse konstruktionsløsninger:

- Korsgadehallen: der blev observeret vandindtrængning, når det regnede kraftigt, og grundet det komplekse design af det grønne tag har det været besværligt at lokalisere, hvor indtrængningerne fandt sted. Det har betydet, at man over flere omgange har skulle åbne taget og udføre udbedring. Skaden skyldes en dårlig konstruktionsløsning, hvor man har anvendt Fundablokke i den grønne tagkonstruktion. Foruden vandindtrængning har man i Korsgadehallen også oplevet udfordringer med det installerede sprinkleranlæg, som ikke fungerer efter hensigten, hvilket førte til at vegetationen tørrede ud i de varme sommermåneder. Dette har ført til 2-3 brande på det grønne tag.
- Edison Park: Der været flere mindre tilfælde af vandindtrængning i det grønne tag på den ene boligblok, og her har man ligeledes haft en del udfordringer med at lokalisere og udbedre utæthederne.
- Birkegade 4-6: i dette tilfælde har man ikke oplevet vandindtrængning, men derimod erosion af vækstlaget. Dette skyldes et noget specielt design, hvor man har forsøgt sig med at lade det grønne tag strække sig ud over kanten på bygningen, "som en tunge". Tungen har været meget udsat for påvirkninger fra regn og vind.

Foruden de større skader, blev der også observeret en række mindre udfordringer som inkluderede:

- Efterladenskaber fra hundeluftere og hærværk på offentlig tilgængelige grønne tage.

- Vedligehold: på Birkegade 4-6 har man valgt at uddelegere nogle af vedligeholdsopgaverne, herunder vanding af det grønne tag, til beboerne, som på skift har ansvaret for dette. Man oplever dog, at nogle beboere glemmer at få vandet det grønne tag, og det derfor tørrer ud i perioder.
- Mos og dyr på taget: ved Glostrup Vestergård har man observeret vækst af mos på det grønne tag, hvilket har gjort taget interessant for fugle som sidder og piller i Sedum taget.

Dataudtræk fra Byggeskedefondens database:

Dataudtræk fra Byggeskedefondens database [76] med fokus på bygninger med grønne tage viser, at der er 46 sager med svigt eller skader. Gennemgang af sagsrapporter har vist at svigt i 24 sager (52%) ikke var relateret til den grønne tagkonstruktion, men derimod svigt i andre bygningsdele. I 21 sager blev der registreret svigt relateret til de grønne tage, og i én enkelt sag er der blevet anerkendt en skade forårsaget af det grønne tag. Sagen med skade som følge af det grønne tag, Torvegade 14-16, er inkluderet i eksemplerne nedenfor. Ud over Torvegade 14-16, blev der fundet to sager, hvor man har observeret indtrængning af vand, men årsagen er ikke oplyst.

Gennemgang af sags rapporter har vist at følgende svigt er de mest udbredte. Svigt i dokumentation:

- Fejl eller mangler i dokumentation: 6 sager
- Brug af ikke veldokumenteret løsninger eller manglende erklæring om risikobehæftede forhold: 4 sager

Svigt i opbygning af tagkonstruktionen:

- Utilstrækkelig inddækningshøjde: 5 sager
- Manglende udlægning af sten langs ovenlys, kanter, inddækninger, gennemføringer mm.: 4 sager
- Manglende overløbssikring: 3 sager

Derudover blev der i en sag meldt om svigt i form af "fejl i afslutning af stern" og en anden sag med svigt i form af "manglende trekantliste i overgang mellem tage og murkrone".

8. Identificering af fremtidige forskningsbehov

8.1 Integreret elektronisk lækagedetektion

Elektronisk lækagedetektion (Electronic Leak Detection, ELD) anvendes til at kvalitetssikre tætheden af tagpaptage og andre vandtætte membraner, hvilket kan udføres direkte efter installationen samt hen over konstruktionens levetid. ELD kræver at tre betingelser er opfyldt for at opnå et nøjagtigt testresultat: 1) en jordforbindelse under membranen til at modtage den elektriske strøm (typisk et bærende betondæk, metaldæk eller en alternativ jordforbindelse), 2) en membran, der ikke er elektrisk ledende, og 3) at der ikke er elektrisk isolerende materialer placeret mellem membranen og jordforbindelsen, dette kunne f.eks. være isolering eller tagunderlagsplader af gips eller krydsfiner. [77]–[80]. De to mest almindeligt tilgængelige typer jordforbindelse er: 1) letvægtstrådnat, Figur 17, og 2) elektrisk ledende primer, Figur 18.

OBS

Et af de store udfordringer ift. lækager i grønne tage er at det kan være vanskeligt og dyrt at lokalisere og udbedre eventuelle senere opståede lækager/huller.

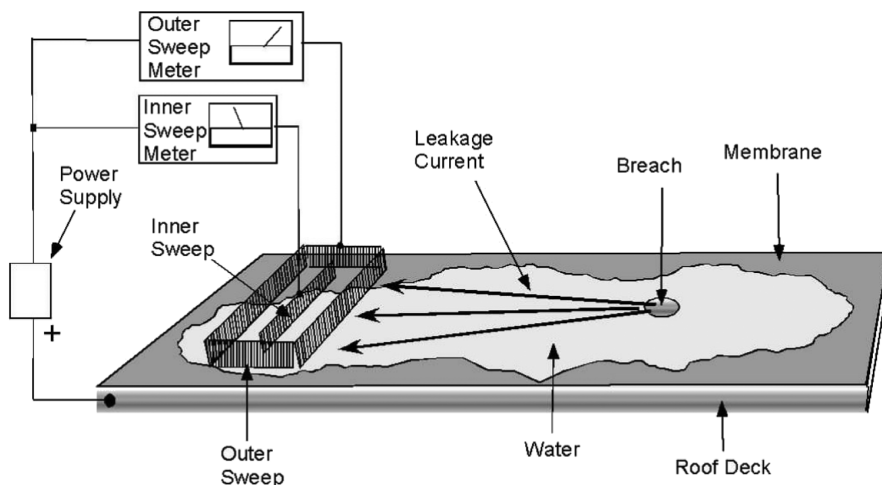


Figur 17. (a) letvægtstrådnat, og (b) implementering af letvægtstrådnat i tagkonstruktion. Kilde: Udlånt af Detec Systems LLC, PO Box 31725, Bellingham, WA 98228, USA



Figur 18. (a) elektrisk ledende primer, og (b) implementering af primer i tagkonstruktion. Kilde: Udlånt af Detec Systems LLC, PO Box 31725, Bellingham, WA 98228, USA

Princippet bag ELD er at etablere et spændingspotentiale mellem membranen og tagdækket og derefter spore eventuel lækagestrøm. Dette opnås ved at fugte overfladen af membranen, påføre en lav spænding til materialer, der fungerer som jordforbindelse, og derefter lokalisere områder med huller eller revner, hvor den elektriske strøm trænger gennem membranen grundet vandindtrængning [77], [79], [80]. Princippet bag elektronisk lækagedetektion kan ses i Figur 19, vist for en scanningsplatform til tagmembraner, som fungerer efter samme princip som ved brug af integreret letvægtstrådnat eller elektrisk ledende primer. ELD metoder er beskrevet i ASTM standard D7877-14 [82].



Figur 19. Grundlæggende kredsløb og anvendelse af scanningsplatform til tagmembraner. Kilde [77]

Lækagelokaliseringsgitter på oversiden af tagmembranen:

Denne type lækagedetektion anvendes typisk for omvendte tagkonstruktioner. En to-leder fugtdetektionstape er klæbet oven på membranen. Der påføres en målespænding mellem detektionslederne og det underliggende tagdæk. Utætheder i membranen vil resultere i en lækagestrøm fra dækket til detektionslederne gennem den elektrisk isolerende membran. I drift tilsluttes en valgt detektionsleder (et valgt felt indenfor gitteret) til strømmåleren, og der påføres et elektrisk potentiale mellem leder og det underliggende dæk, som fungerer som jordforbindelse. Enhver utæthed i tagmembranen i umiddelbar nærhed af den valgte detektionsleder resulterer i en fejlstrøm, som registreres af målekredsløbet. Imens målingen udføres, er alle andre detektionsledere forbundet til et beskyttelseskredsløb, hvorved der dannes en elektrisk blokering mellem den valgte detektionsleder og eventuelle andre strømlækagesteder ud over lederne umiddelbart ved siden af den valgte leder. Hver detektionsfelt i lokaliseringsgitteret måles i rækkefølge for eventuel lækagestrøm gennem utætheder i membranen til dækket nedenfor. Lækagestrømsniveauet kortlægges derefter i forhold til lokaliseringsgitteret "as-built", hvorved eventuelle utætte sektioner af membranen identificeres og lokaliseres. Efter at gitterfelter med utætheder er fundet, kan lederne bruges til at påføre et lokaliseringssignal til at udføre en lækagelokalisering ved hjælp af den elektriske gradient -for yderligere at lokalisere utæthederne inden for de enkelte gitterfelter [77].

Før installation af lækagelokaliseringsgitter og isolering, anbefales det at udføre elektrisk lækagedetektion med en scanningsplatform til tagmembraner, for at bekræfte tagmembranens tæthed og udbedre eventuelle utætheder.

Lækagelokaliseringsgitter under tagmembranen:

Denne type lækagedetektion anvendes typisk for retvendte tagkonstruktioner. Et to-leder fugtdetektionstape er klæbet oven på dampspærren eller et andet passende lag under membranen. Der påføres en målespænding mellem detektionslederne indenfor et valgt gitterfelt. Utætheder i membranen vil resultere i en lækagestrøm fra dækket til detektionslederne gennem den elektrisk isolerende membran. Lækagedetektion, kortlægning og lækagelokalisering

INFO

Et permanent lækagelokaliseringsgitter, der placeres oven på en vandtæt membran, kan detektere og lokalisere lækager inden for et område defineret af gitterafstanden, ved at udsende en elektrisk lav spænding gennem detektions-systemet.

OBS

Et permanent lækagelokaliseringsgitter der placeres under membranen, kan detektere og lokalisere lækager inden for et område, der er defineret af gitterafstanden.

udføres som beskrevet ovenfor. Det skal bemærkes, at isolering eller tagunderlagsplader kan forårsage fejl i lækagelokaliseringsspositionen, da vand, der lækker gennem en membran, kan bevæge sig vandret, indtil en pladesamling nås. Derudover kræver det, at lækagen ved membranoverfladen lokaliseres ved hjælp af elektrisk vektor kortlægning [77]. Elektrisk vektor kortlægning: fungere ved at skabe et elektrisk ledende felt på oversiden af tagmembranen. Dette gøres ved at påføre vand på membranen og tilkoble puls-udstyret til de elektrisk ledende bærende dækelementer. Membranen påføres små elektriske pulser, hvorved strømmen søger efter en jordforbindelse. Hvis membranen ikke er vandtæt, har strømmen jordforbindelse. Utætheder kan da registreres, ved at anvende et håndholdt potentiometer med to prober der lokaliserer utæthederne. Et lækagelokaliseringsgitter placeret ovenpå dampspærren kan efter producenternes informationer med fordel kombineres med en elektrisk ledende primer placeret lige under tagmembranen [78]

Begrænsninger:

For retvendte tagkonstruktioner eller tagkonstruktioner uden et bærende betondæk er det lidt en udfordring med ELD systemer, da der i tagkonstruktionen ikke er nogle ledende materialeglag, der kan fungere som jordforbindelse. Derfor anvendes letvægtstrådnæt eller elektrisk ledende primer, som beskrevet ovenfor. I litteraturen er der delte meninger om pålideligheden af lækagedetektion ved at udnytte disse alternative jordforbindelser, herunder til hvordan de indbygges i tagkonstruktionen [80], [83].

Derudover kan type og/eller tykkelse af belastning ovenpå tagmembranen for nogle ELD systemer have en negativ indvirkning på pålideligheden af lækagedetektionen. Lynbeskyttelsessystemer, tagbrønde, metalrør og andre metal elementer, der kan fungere som jordforbindelse, kan ligeledes skabe falske meldinger om utætheder eller forstyrre målingsmønstrene, så nøjagtig lækagedetektionen ikke kan udføres [80], [83].

Fordele ved integreret ELD systemer:

- Automatiske lækagedetektionssystemer der kører 24/7 og hurtigt giver en alarm, hvis der skulle komme en utæthed i tagmembran eller andet vandtæt lag.
- Lækagedetektionssystemer kan anvendes til at overvåge udbedring af eventuelle utætheder.
- De bedre lækagedetektionssystemer vil - efter producenternes oplysninger - ikke bare give besked om en utæthed, men vil baseret på analyse af det elektriske signal være i stand til at lokalisere utætheden ned til et mindre område på tagfladen.

Anvendelse:

Efter producenternes oplysninger, anvendes de mindre komplekse (og billigere) lækagedetektionssystemer typisk til private huse, hvor tagstørrelsen starter på nogle kvm f.eks. til en altan og som normalt ikke er større end 100 til 150 m². Mens de mere komplekse systemer, der mere præcist kan lokalisere utætheden på tagfladen anvendes til større bygninger, hvor taget kan være dækket af in-

OBS

Der er flere problemstillinger man bør være opmærksom på ift. til ELD systemer:

- Ikke alle producenter af ELD systemer har opnået en god pålidelighed af lækagedetektionen.
- Nogle tagmembran producenter godkender ikke brugen af letvægtstrådnæt direkte under tagmembranen.
- Installation af letvægtstrådnæt længere nede i tagkonstruktionen, f.eks. mellem isolering og tagunderlagsplader, kan sænke pålideligheden af lækagedetektionen da der kommer til være ikke ledende materialer mellem membranen og letvægtstrådnettet.

tensive grønne tage eller solcelleanlæg. Mere komplekse lækagedetektionssystemer kan ofte være et krav fra bygherre til bygninger med kritiske tagkonstruktioner, såsom hospitaler, datacentre, museer og offentlige faciliteter.

ELD lækagedetektionssystemer er ikke en teknologi, der er brugt meget i Danmark og derfor har vi ikke mange erfaringer med systemerne, herunder fordele og ulemper.

8.2 Integreret Radio Frequency Identification (RFID)

Radio frequency identification (RFID) er en teknologi, der har været i stor udvikling i de senere år og har fundet flere anvendelser indenfor byggebranchen. Aktive målesystemer på batterier har ofte en levetid på omkring 5-10 år, hvilket er acceptabelt til målinger af inde- og udeklima, hvor der er muligt at udskifte batterierne. Når man overvåger fugt inde i bygningskonstruktioner, er batteriudskiftning ikke mulig, og levetiden bør derfor være betydelig længere eller systemet skal være forbundet til el. RFID systemer kan muligvis overvinde denne udfordring, fordi RFID kan installeres som en batteriløs sensor, der kan få strøm og aflæses trådløst via radiobølger. RFID "label" registrerer en stregkode. Dette sker ved, at der programmeres elektroniske informationer, der aflæses via radiobølger [84].

Et eksempel på anvendelse af RFID i byggeriet er sporing af bygningsmaterialer og elementer, hvilket kan forbedre kvalitetssikring og logistik, såsom:

- At sikre at bygningsmaterialer og elementer transporteres og opbevares under korrekte forhold.
- At sikre at de rette produkter er på det rette sted på det rette tidspunkt.
- At indeholde informationer til bygningsarbejderne om hvor bygningsdelen skal sidde, f.eks. tilkoblet digitale tegninger og beskrivelser.
- Kan anvendes på et senere tidspunkt til at identificere bygningsmaterialer og elementer, f.eks. i forbindelse med vedligehold og reparation.

Et andet eksempel på anvendelse af RFID i byggeriet er som indlejrede sensorer. RFID-baserede sensorer er passive og robuste, og er i stand til at optage data i adskillige årtier, f.eks. registrere fugtniveauer i konstruktioner [84]. RFID fugt sensorer kan eksempelvis installeres i et "netmønster" i tagkonstruktionen og efterfølgende aflæses med en håndholdt måler ved inspektion af taget.

INFO

Ikke-destruktiv overvågning af bygningsforhold baseret på indlejrede RFID-baserede sensorer er en robust og pålidelig måde at overvåge bygningsdele over længere perioder.

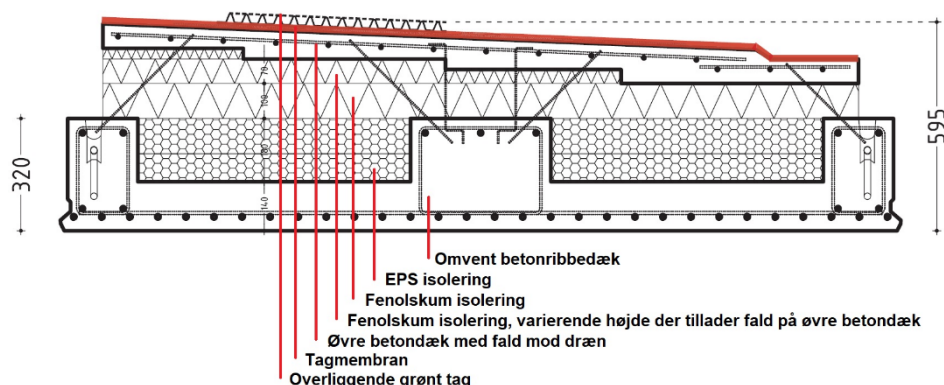
8.3 Green Roof 2

Green Roof 2 er en ny metode til at opbygge grønne tage, hvor tagkonstruktionen består af et omvendt betonribbedæk, som fungerer som det bærende dæk, flere lag isolering, og et øvre betondæk. Tagmembranen påføres på det øvre dæk. En snittegning af konceptet bag Green Roof 2 er vist i Figur 20. Figur 21 viser en fuld snittegning af Green Roof 2, hvor der ses samling mellem to tagelementer og samling til tilstødende bygningsdele. Fordelene ved Green Roof 2 er:

- Det øvre betondæk med påført tagmembran, øger robustheden af membranen og mindsker risikoen for punktering. Dette er med til at gøre Green Roof 2 mere langtidsholdbar.
- Det omvendte betonribbedæk giver systemet en større bæreevne end typiske betondæk, men giver samtidig lavere opbygningshøjde. Dette giver mere plads til isolering og/eller jord i vækstlaget, hvilket gør systemet praktisk, hvis der ønskes et intensivt grønt tag.
- Ved at beskytte isoleringen mod vejret, med det øvre betondæk og membran, medfører det mere frihed til at vælge isoleringsmaterialer med lavere termiske konduktivitet, såsom fenolskum. Typisk anvendes XPS, da det er hårdt og ikke-fugttransporterende.
- Green Roof 2 tagelementer (inklusive tagmembran) fabriksproduceres, hvilket sikrer, at tagkonstruktionen lukkes hurtigt, hvorefter det grønne tag kan påføres.

I betonribbedækket anvendes forspændt beton, og dækket vist i Figur 20 kan optage en belastning på op til 900 kg/m^2 - vægten af 300 mm vandmættet jord, snebelastninger og levende belastninger. Betonribber vil have en lille kuldebros effekt, men ved brug af tilstrækkelig isolering med lav varmeledning, fx fenolskum, i laget over ribberne, kan effekten mindskes betydeligt [86].

Green Roof 2 er et relativt nyt system, hvor ydeevnen endnu ikke er blevet dokumenteret gennem forskningsprojekter, men den første forsøgsbygning er opført med dette nye Green Roof 2 system i 2019.

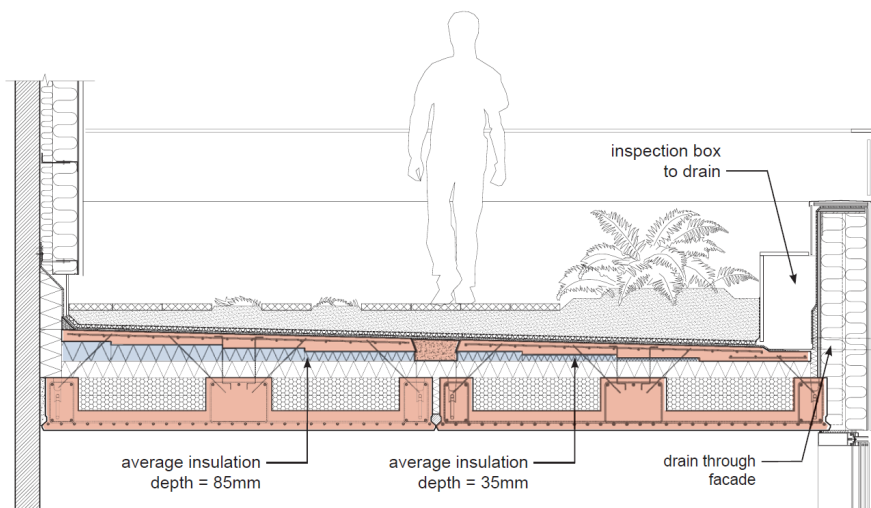


Figur 20. Opbygning af Green Roof 2 [86].

INFO

Primære fordele ved Green Roof 2:

- Øget robusthed for tagmembranen, som sikrer lang levetid.
- Betondæk løsninger der giver større bæreevne og lavere opbygningshøjde, hvilket giver mulighed for mere isolering eller jord i vækstlaget.



Figur 21. Fuld snittegning af Green Roof 2 med tagterrasse og grønt tag [86].

8.4 Risikostyring under udbuds- og udførelsesfaserne

Andenæs et al. har undersøgt risikostyring for grønne tagkonstruktioner. Det blev fundet, at der er huller i litteraturen i forhold til, hvordan risiko håndteres under udbuds- og udførelsesfaserne ved til grønne tage. Derudover blev det fundet, at der ikke eksisterer rammebetingelser for risikostyring af grønne tage, hvilket tyder på at implementeringen evalueres fra sag til sag [22]. Man undersøgte i studierne bl.a. på valg af kontraktforhold og fordeling af risiko i forhold til den grønne tagkonstruktion i den Norske byggebranche [87], [88], hvorfra man kunne konkludere følgende:

- Forholdet mellem bygningsfysik/tekniske løsninger og procesrelaterede problemstillinger synes at være meget lidt undersøgt.
- Styring af kvalitetsrisiko behandles ikke eksplicit eller konsekvent i risikostyringsprocesser eller i kontraktstrategier. Ingen af de undersøgte projekter håndterer eksplicit tekniske risici på en systematisk måde.
- Aspektet med risiko relateret til tage synes at være fuldstændigt fraværende i udbudsmaterialet.
- Det er typisk op til bygherren at vælge strategi for risikohåndtering, enten ved selv at acceptere risikoen, overdrage risikoen til entreprenøren, dele risikoen med entreprenøren eller blot undgå risikoen, ved at vælge en alternativ tagkonstruktion.
 - Det blev observeret at mindre bygherrer ofte vælger en kontrakt løsning, der giver entreprenører stor frihed til at vælge tagkonceptet og planlægge det i detaljer. Det overdrager indledningsvis risikoen til entreprenøren, men den valgte kontraktmodel kan give bygherre mindre indflydelse på bygningen og kan påvirke risikostyringen, navnlig risikoen for defekter på lang sigt.
 - Større bygherrer med flere ressourcer gør derimod mere brug af tekniske eksperter, som jævnligt inspicerer udførelsen af de grønne tage.

- Studierne viser, at de forskellige aktører i et byggeprojekt opfatter og håndterer kvalitetsrisici forskelligt. På leveringssiden af projektorganisationen er en primær bekymring fælles for alle involverede aktører - at undgå ansvaret for eventuelle mangler.
- Hver aktør har generelt en strategi og udfører risikostyring af eget arbejde, men udfordringer kan opstå de steder, hvor entreprenørernes strategier ikke overlapper hinanden. Et eksempel i forhold til grønne tage kunne være: "hvem bærer ansvaret for at sikre, at taget er ryddet for alt byggeaffald, før installationen påbegyndes?".
- For teknisk dokumentation udarbejdet for at undgå risici, blev det fundet, at dokumentationen enten var for utilstrækkelig til at dække alle detaljer eller for kompleks til at kunne anvendes i praksis. Dertil nævnes det, at en vurdering af design guidelines for bygninger viser et højt kompleksitetsniveau, hvor det kan være udfordrende at se det overordnede billede og danne et hierarki af risici. Guidelines kan desuden ikke dække alle bygningsdetaljer eller designelementer, hvilket kan tvinge designere ud i ukendte løsninger.

For kontraktforhold nævnes tidlig involvering af entreprenører eller offentlig-privat partnerskab, som alternative muligheder for at dele risikoen eller flytte den over på entreprenøren, der vil blive ansvarlig for den langvarige drift og vedligehold af det grønne tag, f.eks. en periode på 20-25 år.

Andenæs et al. har i et senere studie [89] udarbejdet en liste over 9 nøgleudfordringer for konstruktion af grønne tage, og der gives anbefalinger til, hvordan de kan løses. Anbefalingerne er bygget op omkring et sæt rammebetingelser udviklet til praktisk brug i byggeprojekter. Studiet konkluderede følgende:

- At de tekniske risici forbundet med grønne tage er talrige, men overordnet set overskuelige.
- At kritiske punkter ved grønne tage, bør få ekstra opmærksomhed under planlægning, projektering, konstruktion og vedligehold, hvilket inkluderer afløb og nødafløb, fastgørelsessystemer til tagudstyr og overgange mellem bygningselementer.
- Proces forståelse kan være en nøgelfaktor til effektivt at løse de nuværende udfordringer med grønne tage.

En række af problemstillingerne belyst af Andenæs et al. er de samme, som blev belyst i en master afhandling fra Aalborg Universitet fra 2015 for den danske byggebranche [23].

INFO

- Mange bygherrer vælger en udbudsløsning der giver entreprenører stor frihed til at vælge tagkonceptet, hvor prisen ofte bliver en afgørende faktor på bekostning af kvaliteten.
- Rådgivere har historisk haft udfordringer med teknologien, den praktiske udførelse og tilsyn af grønne tage, hvilket har resulteret i en række fugtskader. Dette kan skyldes at der indtil udgivelsen af SBI-Anvisning 273 i 2019 har været mangel på fælles retningslinjer.

8.5 Længerevarende ydeevne af grønne tage

Et andet interessant fund i litteraturstudiet af Andenæs et al. [22] er, at der er meget få studier, der har arbejdet med "end-of-life" byggetekniske forhold for grønne tage. Generelt viste litteraturstudiet, at der er en klar mangel på forskning der har fulgt grønne tage gennem deres fulde levetid. Der er derfor bl.a. mangel på data omkring grønne tages langtids egenskaber. Forfatterne påpeger, at der bør indsamles viden om renoverings-/ombygningsprojekter, der involverer ældre grønne tage, da dette vil give mulighed for at vurdere, hvordan taget har fungeret og er ældet.

OBS

Der er en mangel på data omkring grønne tages langtids egenskaber.

9. Konklusion

Baseret på erfaringsopsamlingen kan det konkluderes, at der generelt ikke var mange skader i de grønne tagkonstruktioner. Derimod blev der observeret del tilfælde af svigt, hvor en række detaljer ikke var udført korrekt, eller der ikke var lavet tilstrækkelig dokumentation. Der sager, hvor der er opstået svigt eller skader, har hovedsageligt haft komplekse konstruktionsløsninger, f.eks.:

- *Korsgadehallen*: der blev observeret vandindtrængning, og grundet det komplekse design af det grønne tag var det vanskeligt at lokalisere, hvor vandet trængte ind. Skaderne skyldes en dårlig konstruktionsløsning.
- *Birkegade 4-6*: i dette tilfælde har man oplevet udfordringer med erosion af vækstlaget, grundet en uegnet design løsning, hvor det grønne tag har været mere udsat for vind erosion.

Foruden dette har Korsgadehallen haft udfordringer med sprinkleranlægget, som ikke fungerede efter hensigten. Hvilket resulterede i at vegetationen tørrede ud og førte til 2-3 tagbrande på det grønne tag. Sprinkling bliver sikkert fremover vigtigere at have fuldstændig styr på, med den stigende risiko for hedebølger i fremtiden.

Baseret på dataene trukket fra Byggeskadefondens database blev det observeret, at en række svigt skyldes brugen af grønne tage på ventilerede kolde konstruktioner og på paralleltage. Grønne tage på ventilerede kolde konstruktioner anses ikke for at være en veldokumenteret løsning, fordi det grønne tag ændrer de temperatur- og fugtforhold, man kender fra konventionelle opbygninger. Grønne tage på paralleltage anses som risikobehæftede, fordi konstruktionen ikke kan inspiceres indefra, og det dermed kan være svært at opdage eventuelle skader i tide.

De fleste LCC studier finder grønne tage totaløkonomisk gunstige sammenlignet med konventionelle tage, hovedsagelig på grund af deres energibesparelser og forlængede levetid. Energibesparelsen ved brug af grønne tage afhænger væsentligt af det lokale klima, og er i nordiske kolde klimaer ubetydelig. Det er tydeligt, at inddragelse af sociale fordele kan forbedre den samlede vurdering af værdien af grønne tage, men det er en udfordring at kvantificere, fx regnvandsakkumulering, forbedring af luftkvaliteten, afbødning af byernes varme-ø-effekt, æstetik og urban biodiversitet. Man skal være opmærksom på, at når svigt opstår i grønne tage, fx i form af utætheder, kan udbedringsomkostningerne være betydelige. Dette kan have en betydning for den totaløkonomiske vurdering, især ved komplekse designs, hvor utætheder kan være vanskelige at lokalisere. Der er begrænset viden på dette område, da der ikke er gennemført mange langtidsstudier på grønne tages.

Grønne tages kan reducere og forsinke den maksimale vandafstrømning, f.eks. under skybrud, så længe jordlaget ikke er vandmættet, samt reducere den samlede mængde af afstrømning fra taget gennem fordampning. I Danmark, hvor tagkonstruktioner er vel isolerede, vil selv et tykt grønt tag ikke have den store effekt på hverken køling om sommeren eller reduktion af varmetabet om vinteren. Ved en livscyklusvurdering (LCA) af grønne tage er analyserne meget case-specifikke. Forskelle i studie omfang, levetid, materialespecifikation og tagtype kan resultere i forskellige resultater. Det er derfor vanskeligt at give en generaliseret konklusion uden en detaljeret analyse.

Fremtidige forskningsbehov

Der er i erfaringsopsamlingen blevet identificeret en række fremtidige forskningsbehov:

- Elektronisk lækagedetektion: Ved hjælp af indbygget teknologi kan huller eller revner i tagmembranen lokaliseres. Det gør det muligt at kvalitetssikre tætheden af tagmembraner direkte efter installationen og videre i konstruktionens levetid. Mens det er simpelt at udbedre utætheder i tagmembranen lige efter udlægning, er det besværligt og dyrt at lokalisere og lappe utætheder, hvis det grønne tag er etableret.
- Radio frequency identification (RFID): RFID er en indbygget batteriløs teknologi, der gør det muligt at udføre pålidelig og ikke-destruktiv evaluering af forhold i bygningsdele over længere perioder, hvilket kan bidrage til effektivt vedligehold af bygninger.
- Green Roof 2: Green Roof 2 er ny metode at opbygge grønne tage, der giver øget beskyttelse af tagmembranen og sikrer længere levetid, samt større bæreevne og lavere opbygningshøjde. Dette giver mulighed for mere isolering eller mere jord i vækstlaget, og dermed øget vandreservoir.
- Risikostyring under udbuds- og udførelsesfaserne: Der er mangel på regler og guidelines for risikostyring af grønne tage under udbuds- og udførelsesfaserne. Hvilket betyder, at bygherre ofte vælger en udbudsløsning, der giver entreprenører stor frihed til at vælge tagkonceptet, hvor der ofte kommer mere fokus på pris end kvalitet.
- Længerevarende ydeevne af grønne tage: Der er en mangel på data om grønne tages langtidsegenskaber og "end-of-life" byggetekniske forhold for grønne tage.
- Der er behov for øget viden om og ensartet grundlag for vurdering af grønne tages værdi - herunder deres miljøpåvirkning fra et livscyklusperspektiv.
- Undersøge de sociale fordele af grønne tage både set i forhold til store private og offentlige ejendomme, henholdsvis småhuse. Det kunne være muligheden for forbedrede omgivelser i form af øget biodiversitet, bedre helbred da grønne omgivelser har en positiv påvirkning på helbredet, og mangfoldige muligheder for sociale aktiviteter.

10. Referencer

- [1] L. F. Møller and M. B. Jensen, "Videnblad 04.09-03: Grønne tage - typologi og opbygning," København, Danmark, 2013.
- [2] GSA (US General Services Administration), "The Benefits and Challenges of Green Roofs on Public and Commercial Buildings," 2011.
- [3] T. P. Østergaard and T. Bunch-Nielsen, "BYG-ERFA erfaringsblad (27)161217: Grønne tage – membraner, dræning, isolering, vækstlag, brandsikkerhed og vedligehold," København, Danmark, 2016.
- [4] E. Brandt, T. Bunch-Nielsen, and M. Morelli, *SBI-Anvisning 273 Tage*. København, Danmark: BUILD - Department of the Built Environment, Aalborg University, 2019.
- [5] A. F. Nielsen and E. M. Paulsen, "Thermal Design of Highly Insulated Inverted Roofs," in *International symposium on roofing technology. NBS, USA September, 1985.*, 1985.
- [6] F. Rubek, M. Scharling, and J. Cappelen, "DMI rapport 20-01 Danmarks klima 2019," København, Danmark, 2020.
- [7] Miljøstyrelsen, "Vejret i Danmark bliver varmere, vådere og vildere," 2020. <https://www.klimatilpasning.dk/viden-om/fremtidens-klima/klimaaendringeridanmark/>
- [8] Miljøstyrelsen, "Nedbør og klimaforandringer," 2020. <https://www.klimatilpasning.dk/viden-om/fremtidens-klima/klimaaendringeridanmark/aendringer-i-nedboer/>
- [9] MBBL, "Regnvand i byen," 2013.
- [10] T. Patursson, "Klimaaendringers betydning for nedbør, grundvand og kloakker," 2020. <https://www.bolius.dk/klimaaendringers-betydning-for-nedboer-grundvand-og-kloakker-19487>
- [11] SUSTAINABLE.DK, "4. KLIMAFORANDRINGER OG VAND," 2017. <https://sustainable.dk/2-vand/7-klimaforandringer-aendrer-vandtilgaengeligheden/>
- [12] Københavns Kommune, "Københavns Klimatilpasningsplan," København, Danmark, 2011.
- [13] O. Bühler, M. B. Jensen, and K. Sejr, "Videnblad 03.01-71: Urban Heat Island 1," København, Danmark, 2010.
- [14] T. A. Carstensen and M. Rosenbak, "Videnblad 03.01-16: Den klimavenlige by – økologiske potentialer," København, Danmark, 2009.
- [15] P. Ehlers, L. Petersen, and J. R. Bendsen, "Den urbane varmeø - Byens overflader og materialer," København, Danmark, 2016.
- [16] O. Bühler, M. B. Jensen, C. Tøttrup, R. Borgstrøm, and K. Sejr, "Videnblad 03.01-72: Urban Heat Island 2," København, Danmark, 2010.
- [17] S. Hodo-Abalo, M. Banna, and B. Zeghamati, "Performance analysis of a planted roof as a passive cooling technique in hot-humid tropics," *Renewable Energy*, vol. 39, no. 1, pp. 140–148, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.renene.2011.07.029.
- [18] C.-F. Chen, "Performance evaluation and development strategies for green roofs in Taiwan: A review," *Ecological Engineering*, vol. 52, pp. 51–58, Mar. 2013, doi: 10.1016/j.ecoleng.2012.12.083.
- [19] T. Theodosiou, "Green Roofs in Buildings: Thermal and Environmental Behaviour," *Advances in Building Energy Research*, vol. 3, no. 1, pp. 271–288, Jan. 2009, doi: 10.3763/aber.2009.0311.

- [20] L. F. Møller and M. B. Jensen, "Videnblad 4.09-04: Grønne tage og regnvandshåndtering – del 1," København, Danmark, 2014.
- [21] C. Berretta, S. Poë, and V. Stovin, "Moisture content behaviour in extensive green roofs during dry periods: The influence of vegetation and substrate characteristics," *Journal of Hydrology*, vol. 511, pp. 374–386, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.01.036.
- [22] E. Andenæs, T. Kvande, T. M. Muthanna, and J. Lohne, "Performance of blue-green roofs in cold climates: A scoping review," *Buildings*, vol. 8, no. 4, 2018, doi: 10.3390/buildings8040055.
- [23] T. P. Østergaard, "Grønne tage - En Fugtsikker Løsning?," Aalborg Universitet, København, 2015.
- [24] N. A. G. A. Damen and H. J. H. Brouwers, "Technische eigenschappen van groene daken en gevels," Eindhoven, Holland, 2012.
- [25] da S. Mariana, E. Vazquez, M. K. Najjar, A. W. A. Hammad, and A. Haddad, "Assessing the Retention Capacity of an Experimental," *Water*, vol. 12, no. 1, 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/w12010090>.
- [26] N. F. Jensen, T. K. Hansen, M. Morelli, A. M. Svane, and R. Waagepetersen, "BUILD RAPPORT 2022:XX Klimadata til fugtsimuleringer Referenceår (Under udgivelse)," København, 2022.
- [27] E. Burszta-Adamiak, "Analysis of the retention capacity of green roofs," *Journal of Water and Land Development*, vol. 16, no. 1, pp. 3–9, 2012, doi: 10.2478/v10025-012-0018-8.
- [28] B. G. Johannessen, T. M. Muthanna, and B. C. Braskerud, "Detention and retention behavior of four extensive green roofs in three Nordic climate zones," *Water (Switzerland)*, vol. 10, no. 6, pp. 1–23, 2018, doi: 10.3390/w10060671.
- [29] V. Hamouz, "Retention and detention-based roofs for stormwater management in urban environments in cold climates," Norges teknisk-naturvidenskabelige universitet, 2020.
- [30] A. R. Michael Rasmussen *et al.*, "Grønne tages hydrauliske egenskaber," 2013.
- [31] C. Wark, "Cooler Than Cool Roofs: How Heat Doesn't Move Through a Green Roof," 2011.
- [32] T. Theodosiou, "Green Roofs in Buildings: Thermal and Environmental Behaviour," *Advances in Building Energy Research*, vol. 3, no. 1, pp. 271–288, Jan. 2009, doi: 10.3763/aber.2009.0311.
- [33] K. Liu and B. Baskaran, "Thermal performance of green roofs through field evaluation.," in *Proceedings of the First Annual International Green Roofs Conference: Greening Rooftops for Sustainable Communities.*, NRC - IRC, 2003, p. 10.
- [34] K. Liu and B. Baskaran, "Thermal performance of green roofs through field evaluation.," in *Proceedings of the First Annual International Green Roofs Conference: Greening Rooftops for Sustainable Communities.*, NRC - IRC, 2003, p. 10.
- [35] A. Spala, H. S. Bagiorgas, M. N. Assimakopoulos, J. Kalavrouziotis, D. Matthopoulos, and G. Mihalakakou, "On the green roof system. Selection, state of the art and energy potential investigation of a system installed in an office building in Athens, Greece," *Renewable Energy*, vol. 33, no. 1, pp. 173–177, 2008, doi: 10.1016/j.renene.2007.03.022.

- [36] L. F. Møller and M. B. Jensen, "Videnblad 04.09-10: Grønne tages termiske egenskaber," København, Danmark, 2015.
- [37] A. Niachou, K. Papakonstantinou, M. Santamouris, A. Tsangrassoulis, and G. Mihalakakou, "Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance," *Energy and Buildings*, vol. 33, no. 7, pp. 719–729, 2001, doi: 10.1016/S0378-7788(01)00062-7.
- [38] T. Van Renterghem and D. Botteldooren, "In-situ measurements of sound propagating over extensive green roofs," *Building and Environment*, vol. 46, no. 3, pp. 729–738, Mar. 2011, doi: 10.1016/j.buildenv.2010.10.006.
- [39] Miljøstyrelsen, "Hvad er biodiversitet?," 2020. <https://mst.dk/naturvand/natur/biodiversitet/hvad-er-biodiversitet/>
- [40] R. Tonietto, J. Fant, J. Ascher, K. Ellis, and D. Larkin, "A comparison of bee communities of Chicago green roofs, parks and prairies," *Landscape and Urban Planning*, vol. 103, no. 1, pp. 102–108, Oct. 2011, doi: 10.1016/j.landurbplan.2011.07.004.
- [41] Københavns Kommune, "Retningslinjer for grønne tage (2010-5899)."
- [42] UrbanScape, "WIND UP-LIFT AND WIND RESISTANCE OF GREEN ROOFS," 2016. <https://www.urbanscape-architecture.com/wind-up-lift-and-wind-resistance-of-green-roofs/>
- [43] Optigrun Roof Greening, "PLANNING AIDS WIND UP-LIFT PROTECTION," 2021. <https://www.optigrun.com/planning-aids/technical-subjects/wind-up-lift-protection/>
- [44] T. Bunch-Nielsen and N. D. Pedersen, "TOR 29 Fastgørelse af tagdækning og tagisolering. Tagpapbranchensoplysningsråd.," 2010.
- [45] T. Bunch-Nielsen and N. D. Pedersen, "TOR 29 Fastgørelse af tagdækning og tagisolering. Tagpapbranchensoplysningsråd.," 2010.
- [46] A. B. Vestergaard, "BYG-ERFA erfaringsblad (27) 121227: Grønne tage og vægge -brandsikkerhed og vedligehold," København, Danmark, 2012.
- [47] C. Clark, P. Adriaens, and F. B. Talbot, "Green Roof Valuation: A Probabilistic Economic Analysis of Environmental Benefits," *Environmental Science & Technology*, vol. 42, no. 6, pp. 2155–2161, Mar. 2008, doi: 10.1021/es0706652.
- [48] H. Niu, C. Clark, J. Zhou, and P. Adriaens, "Scaling of economic benefits from green roof implementation in Washington, DC," *Environmental Science and Technology*, vol. 44, no. 11, pp. 4302–4308, 2010, doi: 10.1021/es902456x.
- [49] J. Sproul, M. P. Wan, B. H. Mandel, and A. H. Rosenfeld, "Economic comparison of white, green, and black flat roofs in the United States," *Energy and Buildings*, vol. 71, pp. 20–27, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.11.058.
- [50] L. Kosareo and R. Ries, "Comparative environmental life cycle assessment of green roofs," *Building and Environment*, vol. 42, no. 7, pp. 2606–2613, Jul. 2007, doi: 10.1016/j.buildenv.2006.06.019.
- [51] U. Berardi, A. A. GhaffarianHoseini, and A. A. GhaffarianHoseini, "State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs," *Applied Energy*, vol. 115, pp. 411–428, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.10.047.

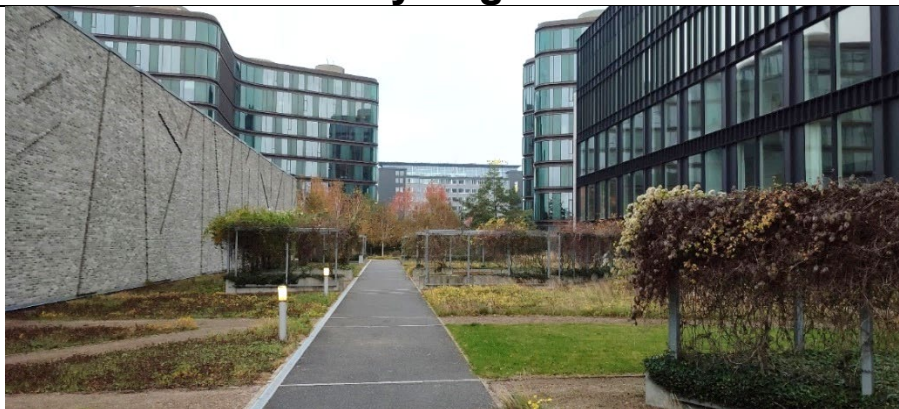
- [52] T. M. Erlend Andenæs, Tore Kvande and J. L. Muthanna, "Performance of Blue Green Roofs in Cold Climates.pdf." p. 24, 2018.
- [53] F. Bianchini and K. Hewage, "Probabilistic social cost-benefit analysis for green roofs: A lifecycle approach," *Building and Environment*, vol. 58, pp. 152–162, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.buildenv.2012.07.005.
- [54] M. Blackhurst, C. Hendrickson, and H. S. Matthews, "Cost-Effectiveness of Green Roofs," *Journal of Architectural Engineering*, vol. 16, no. 4, pp. 136–143, 2010, doi: 10.1061/(asce)ae.1943-5568.0000022.
- [55] H. Feng and K. N. Hewage, "Economic Benefits and Costs of Green Roofs," *Nature Based Strategies for Urban and Building Sustainability*, no. February, pp. 307–318, 2018, doi: 10.1016/B978-0-12-812150-4.00028-8.
- [56] D. Kantor, "Life Cycle Cost Analysis of Extensive Green Roofs in Switzerland and the Netherlands," *Journal of Living Architecture*, vol. 4, no. 1, pp. 14–25, 2017, doi: 10.46534/jliv.2017.04.01.014.
- [57] U. Porsche and M. Köhler, "LIFE CYCLE COSTS OF GREEN ROOFS - A Comparison of Germany, USA, and Brazil," *RIO 3 - World Climate & Energy Event*, no. December, pp. 1–5, 2003.
- [58] E. Shin and H. Kim, "Benefit-Cost analysis of Green Roof initiative projects: The case of Jung-gu, Seoul," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 11, no. 12, 2019, doi: 10.3390/SU11123319.
- [59] S. Ulubeyli, V. Arslan, and A. Kazaz, "Comparative life cycle costing analysis of green roofs: The regional aspect," *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, vol. 5, no. 2, pp. 136–144, 2017, doi: 10.21533/pen.v5i2.94.
- [60] T. Carter and A. Keeler, "Life-cycle cost-benefit analysis of extensive vegetated roof systems," *Journal of Environmental Management*, vol. 87, no. 3, pp. 350–363, 2008, doi: 10.1016/j.jenvman.2007.01.024.
- [61] I. Teotónio, C. M. Silva, and C. O. Cruz, "Economics of green roofs and green walls: A literature review," *Sustainable Cities and Society*, vol. 69, no. February, 2021, doi: 10.1016/j.scs.2021.102781.
- [62] M. Manso, J. Castro-Gomes, B. Paulo, I. Bentes, and C. A. Teixeira, "Life cycle analysis of a new modular greening system," *Science of the Total Environment*, vol. 627, pp. 1146–1153, 2018. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.198.
- [63] G. Peri, M. Traverso, M. Finkbeiner, and G. Rizzo, "Embedding 'substrate' in environmental assessment of green roofs life cycle: Evidences from an application to the whole chain in a Mediterranean site," *Journal of Cleaner Production*, vol. 35, pp. 274–287, 2012, doi: 10.1016/j.jclepro.2012.05.038.
- [64] T. Hong, J. Kim, and C. Koo, "LCC and LCCO 2 analysis of green roofs in elementary schools with energy saving measures," *Energy and Buildings*, vol. 45, pp. 229–239, 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.11.006.
- [65] S. Saiz, C. Kennedy, B. Bass, and K. Pressnail, "Comparative life cycle assessment of standard and green roofs," *Environmental Science and Technology*, vol. 40, no. 13, pp. 4312–4316, 2006, doi: 10.1021/es0517522.
- [66] P. Vacek, K. Struhala, and L. Matějka, "Life-cycle study on semi intensive green roofs," *Journal of Cleaner Production*, vol. 154, pp. 203–213, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.03.188.

- [67] M. Shafique, R. Kim, and M. Rafiq, "Green roof benefits, opportunities and challenges – A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 90, no. April 2017, pp. 757–773, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.04.006.
- [68] E. Cubi, N. F. Zibin, S. J. Thompson, and J. Bergerson, "Sustainability of Rooftop Technologies in Cold Climates: Comparative Life Cycle Assessment of White Roofs, Green Roofs, and Photovoltaic Panels," *Journal of Industrial Ecology*, p. n/a--n/a, 2015, doi: 10.1111/jiec.12269.
- [69] C. Gargari, C. Bibbiani, F. Fantozzi, and C. A. Campiotti, "Environmental Impact of Green Roofing: The Contribute of a Green Roof to the Sustainable use of Natural Resources in a Life Cycle Approach," *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, vol. 8, pp. 646–656, 2016, doi: 10.1016/j.aaspro.2016.02.087.
- [70] K. Angelakoglou, M. Dimitriou, and G. Gaidajis, "Comparative evaluation of flat roof thermal systems in Greece," *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, vol. 4, no. 3, pp. 243–257, 2013, doi: 10.1080/2093761X.2013.801803.
- [71] M. El Bachawati, R. Manneh, R. Belarbi, T. Dandres, C. Nassab, and H. El Zakhem, "Cradle-to-gate Life Cycle Assessment of traditional gravel ballasted, white reflective, and vegetative roofs: A Lebanese case study," *Journal of Cleaner Production*, vol. 137, pp. 833–842, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.07.170.
- [72] L. Rincón, J. Coma, G. Pérez, A. Castell, D. Boer, and L. F. Cabeza, "Environmental performance of recycled rubber as drainage layer in extensive green roofs. A comparative Life Cycle Assessment," *Building and Environment*, vol. 74, pp. 22–30, 2014, doi: 10.1016/j.build-env.2014.01.001.
- [73] S. Bozorg Chenani, S. Lehvävirta, and T. Häkkinen, "Life cycle assessment of layers of green roofs," *Journal of Cleaner Production*, vol. 90, pp. 153–162, 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.11.070.
- [74] M. Shafique, A. Azam, M. Rafiq, M. Ateeq, and X. Luo, "An overview of life cycle assessment of green roofs," *Journal of Cleaner Production*, vol. 250, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119471.
- [75] Københavns Kommune, "Green Roofs Copenhagen," København, 2012.
- [76] Byggeskadefonden, "Søg i database med eftersyn," 2021. <https://bsf.dk/eftersyn/sog-i-database-med-eftersyn>
- [77] D. Vokey and D. Townsend, "Electrical Conductance Methods for Locating Leaks in Roofing and Waterproof Membranes," *Roofing Research and Standards Development*, vol. 7, pp. 169–179, 2011, doi: <https://doi.org/10.1520/STP49697S>.
- [78] Detec Systems, "Detec Systems Overview." 2021.
- [79] WSRCA, "A Guide for Electronic Leak Detection Testing of Roofing and Waterproofing Membranes," 2021.
- [80] P. Brooks, "Electronic Leak Detection: Sound Science, Not a Magic Wand," 2017. <https://iibec.org/electronic-leak-detection-sound-science-not-magic-wand/>
- [81] Detec Systems, "TruGround® Conductive Primer," 2021. <https://detecsystems.com/truground-conductive-primer/>

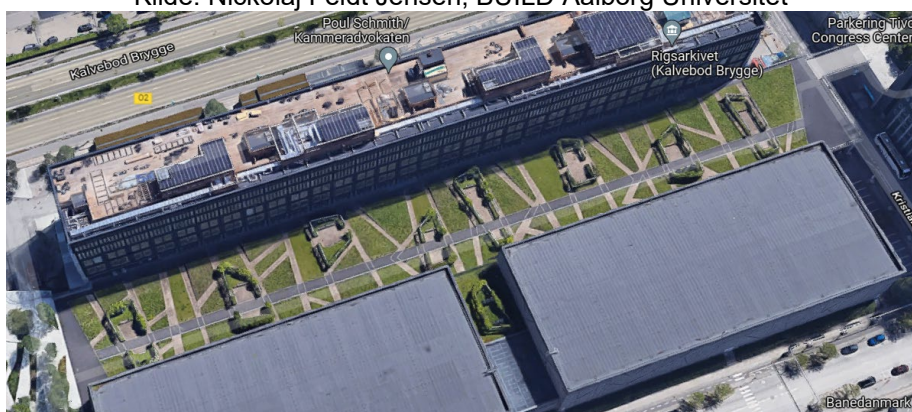
- [82] ASTM International, "ASTM D7877 - 14 Standard Guide for Electronic Methods for Detecting and Locating Leaks in Waterproof Membranes." 2014. doi: 10.1520/D7877-14.
- [83] Sika Sarnafil, "Technical Bulletin #15-8, "Electronic Leak Detection Testing Limitations." 2015.
- [84] K. Storgaard, M. Forman, and T. V. Rasmussen, "Indlejret teknologi i byggeriet: Potentialer og besparelsesmuligheder for offentlige bygherrer," København, Danmark, 2006.
- [85] ProGeo, "smartex® id RFID humidity sensors for detection of wetness inside the construction." 2018.
- [86] D. J. Duffus, "Green Roof 2." 2016.
- [87] E. Andenæs, B. Time, O. Torp, T. Kvande, and J. Lohne, "Risk management in procurement of blue-green roofs - Supplier perspective," *International Conference on Construction in the 21st Century*, no. 97, pp. 97–108, 2019.
- [88] E. Andenæs, A. Engebø, B. Time, J. Lohne, O. Torp, and T. Kvande, "Perspectives on quality risk in the building process of blue-green roofs in Norway," *Buildings*, vol. 10, no. 10, pp. 1–18, 2020, doi: 10.3390/buildings10100189.
- [89] E. Andenæs, B. Time, T. Muthanna, S. Asphaug, and T. Kvande, "Risk reduction framework for blue-green roofs," *Buildings*, vol. 11, no. 5, pp. 1–22, 2021, doi: 10.3390/buildings11050185.
- [90] Forlaget Pestium A/S, "Springhaler," 2022. <https://www.pestium.dk/dpil/springhaler/>

Bilag A: Erfaringer fra danske case bygninger

Det nye rigsarkiv



Kilde: Nikolaj Feldt Jensen, BUILD Aalborg Universitet



Kilde: Google Maps [<https://maps.google.com>]

Adresse	Kalvebod Brygge 32, 1560 København
Opført	1967
Bygningsbrug	Arkiv / kontor
Konstruktion af grønt tag	Stod færdigt i 2009
Grønt tag areal	Ca. 7000 m ²
Type af grønt tag	Intensivt, retvendt tag
Opbygning af tagkonstruktion	Bærende konstruktion: Betondæk Belægning: 200-250 mm XPS isolering, dampgennemtrængelig separationsmembran, 25 mm drænplade, min 120 mm skærver (8-12 mm), fiberdug, 40 mm blandet stenmel og skærver (3-5 mm), 20 mm stenmel (knust materiale). Hævet bed: 40+20 mm stenmel udskiftes med 170-380 mm systemjord. Asfalt stier: betondæk, 200-250 mm XPS isolering, dampgennemtrængelig separationsmembran, 25 mm drænplade, min 120 mm skærver (8-12 mm), 50 mm GAB 110 kg/m², 20 mm asfaltslidlag PA 45 kg/m².
Beplantninger	40 forskellige planter: græs, bunddækkende stauder, løg og klatreplanter

Det nye rigsarkiv (fortsat)

Erfaringer	Skader: Det er oplyst, at Rigsarkivet ikke har oplevet skader i det grønne tag i de 12 år, siden taget blev etableret. De eneste skader, der er blevet noteret for det grønne tag, skete under udførelsen (i forbindelse med konstruktionsarbejde på bygningsfacaderne, og de er blevet udbedret). Andre udfordringer: Det er oplyst, at de eneste udfordringer, man har oplevet i forhold til det grønne tag, har været mindre hærværks skader og efterladenskaber fra hundeluftere. Hundelorte er desværre en ting, som naturligt forekommer i offentligt tilgængelige områder. Afledning af regnvand: Det er blevet observeret, at det grønne tag har haft en positiv effekt på afledningen af regnvand i tilfælde af skybrud. Det grønne tag forsinkes afledningen af regnvandet, hvilket har ført til mindre belastning på det offentlige afløbssystem, da afledningen typisk sker i mindre mængder og over længere tid. Det vurderes at det grønne tag på årsbasis tilbageholder 60-70% af regnvandet. Asfalt stier: Der blev etableret stier med asfaltslidslag på det grønne tag for at beskytte tagmembranen. Etableringen skyldes behov for murerarbejde på tilstødende bygningsdele efter etableringen af det grønne tag. Se tegning nedenfor.
-------------------	---

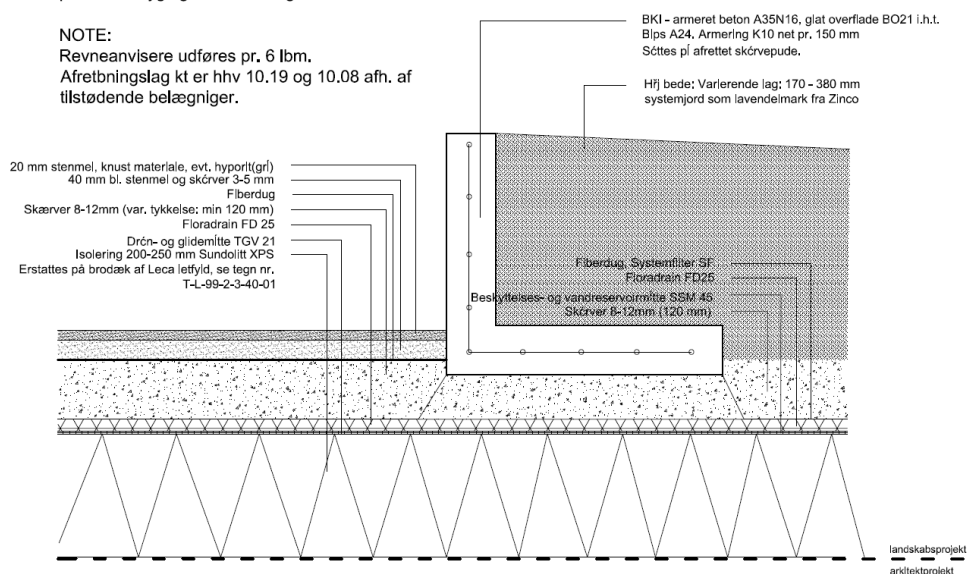
Det nye rigsarkiv (fortsat)

Tekniske tegninger:

DETALJEPRINCIP: BELÆGNING GU, HÆVET BED OG KANT BKI
på mellembygning med isolering

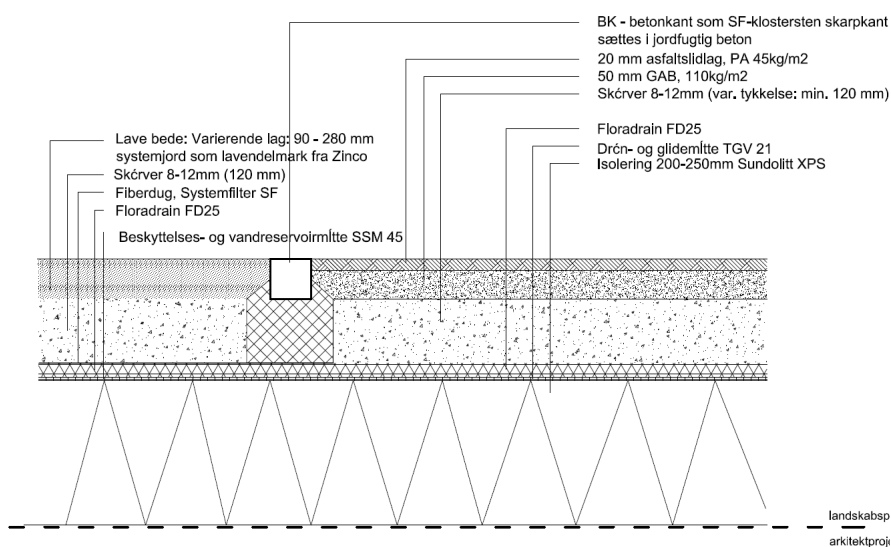
NOTE:

Revneanvisere udføres pr. 6 lbm.
Afretbningslag kt er hhv 10,19 og 10,08 afh. af
tilstødende belægninger.



Kilde: Udlånt af Schønherr Landskab, Nørrebrogade 45e, 2200 København

DETALJEPRINCIP: BELÆGNING AS, LAVT BED OG KANT BK
på mellembygning med isolering



Kilde: Udlånt af Schønherr Landskab, Nørrebrogade 45e, 2200 København

Birkegade 4-6



Kilde: Billede af Nikolaj Møller



Kilde: Billede af Julien Lanoo

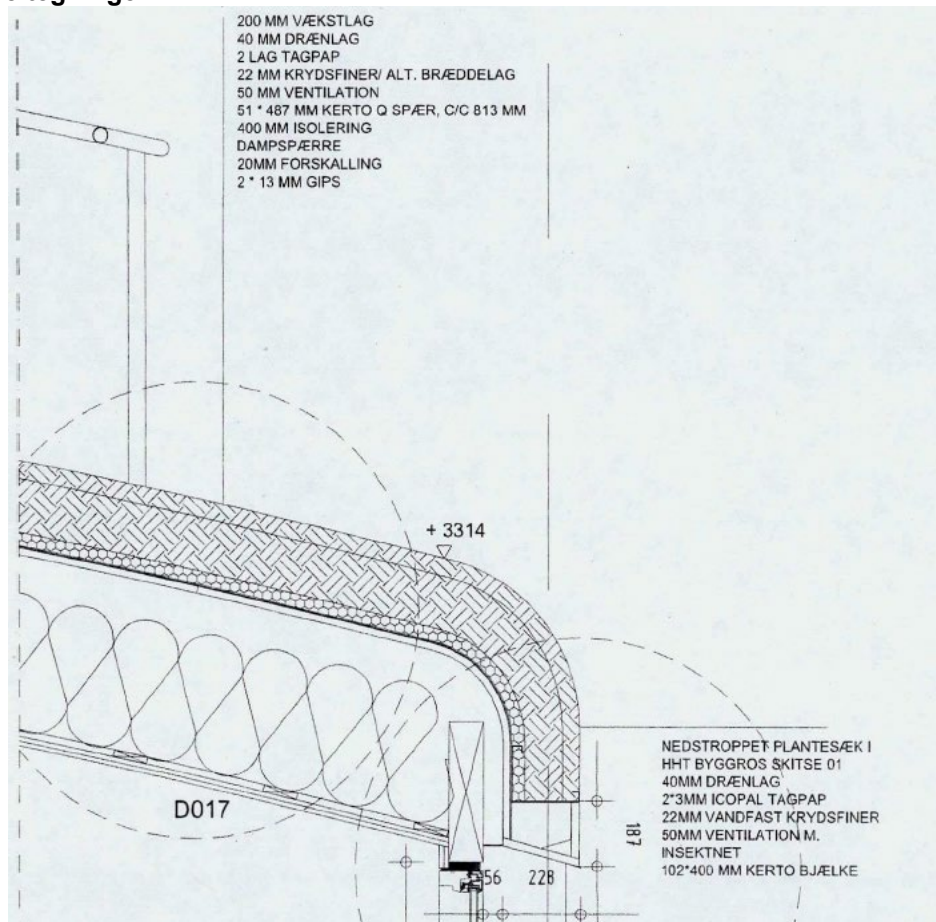
Adresse	Birkegade 4-6, 2200 København N
Opført	1889
Bygningsbrug	Andelsboliger
Konstruktion af grønt tag	2011
Grønt tag areal	490 m ² tagterrasse, hvoraf 160 m ² er grønt tag
Type af grønt tag	Intensive, retvendt tag
Opbygning af tagkonstruktion	Bærende konstruktion: Spær af kerto træ. Grønt tag: 2x13 mm gips, 20 mm forskalling, dampspærre, 51x487 mm Kerto spær CC813 mm med 400 mm isolering, 50 mm ventilation, 22 mm krydsfiner (alt. bræddelag), 2 lag tagpap, 40 mm drænlag, 200 mm vækstlag
Beplantninger	Græs, tidsler og andre små planter, samt 1 stk. lille træ
Arkitekt	JDS Architects

Birkegade 4-6 (fortsat)

Erfaringer	Fugt: Det er oplyst, at andelsboligforeningen ikke har oplevet indtrængning af fugt i den grønne tagkonstruktion. Derimod er indtrængning af fugt blevet observeret i dele af taghaven med tagpap og trædæk konstruktion, på grund af nogle svejsninger, der var gået fra hinanden. Trinlyd og støj: Det er oplyst, at der har været behov for at udskifte lofterne under taghaven, fordi konstruktionen på grund af fejl i projekteringen ikke opfyldte kravene til trinlyd og støj. Det er blevet observeret, af beboerne i taglejlighederne under taghaven, at man stadig kan høre folk på taget, specielt ved brug af møblerne på træ dækket. Trinlyd og støj reduceres betydeligt, hvis brugerne anvender græsset i stedet for træbelægningen. Andre udfordringer: En udfordring, man har haft med det grønne tag, er det specielle design, hvor det grønne tag strækker sig ud over kanten på bygningen, "som en tunge", se tegning nedenfor. Her er det oplyst, at det grønne tag er eroderet væk grundet påvirkninger fra regn og vind. Positive resultater: Det er oplyst, at beboerne har haft stor glæde af, at taget har kunne bruges som en grøn oase i midten af byen. Taget bliver brugt til alt fra afslapning til koncerter og andre begivenheder. Vedligehold: Det er oplyst, at man ikke har de store omkostningerne til vedligehold af taghaven, da vedligehold udføres af beboerne. Det gør det svært at sammenligne med omkostningerne til vedligehold fra før taghaven blev etableret. Beboerne vander det grønne tag på skift, og man gør brug af fælles arbejdsdage til rengøring og andet vedligehold af taghaven.
-------------------	--

Birkegade 4-6 (fortsat)

Tekniske tegninger:

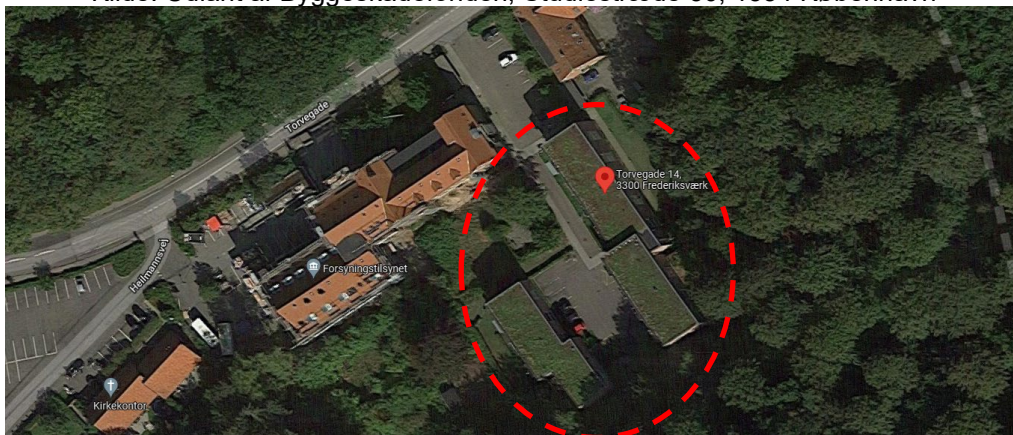


Kilde: Udlånt af JDS architects, Slotsgade 2, 4. TV, 2200 København

Skovbrynet



Kilde: Udlånt af Byggeskedefonden, Studiestræde 50, 1554 København



Kilde: Google Maps [<https://maps.google.com>]

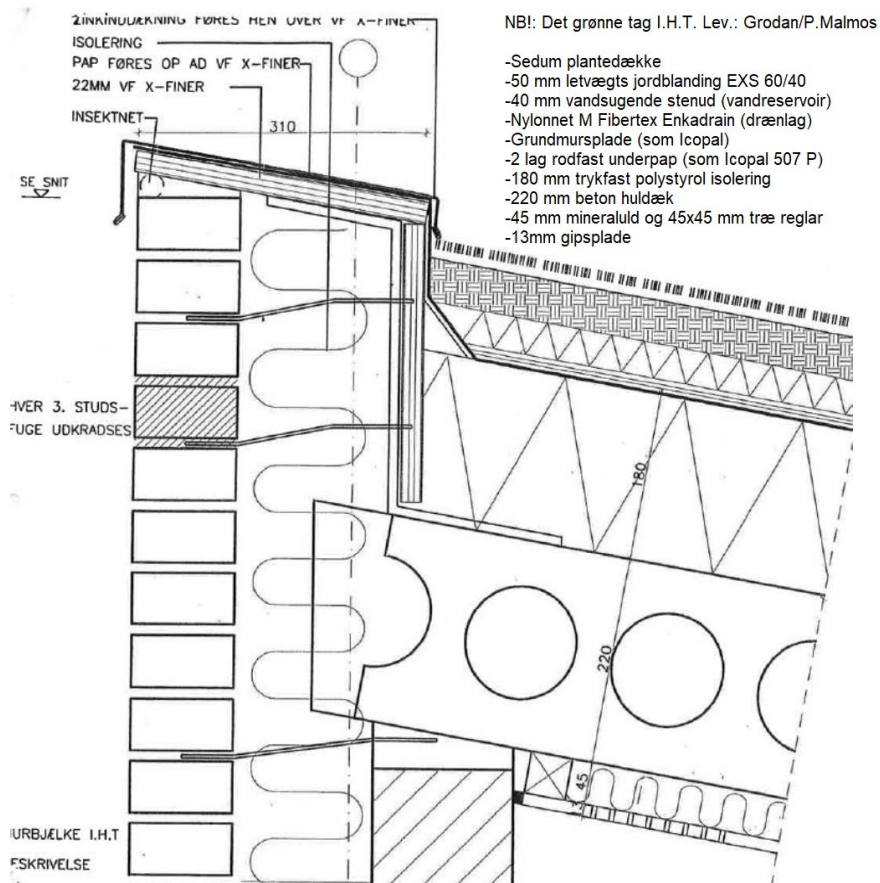
Adresse	Torvegade 14-16, 3300 Frederiksværk
Opført	2002
Bygningsbrug	Ældreboliger, 2 bygninger på 2-3 etager
Konstruktion af grønt tag	2002
Grønt tag areal	Ca. 850 m ²
Type af grønt tag	Ekstensivt, retvendt
Opbygning af tagkonstruktion	Bærende konstruktion: beton huldæk Grønt tag: 13mm gipsplade, 45 mm mineraluld og 45x45 mm træ reglar, 220 mm beton huldæk, 180 mm trykfast polystyrol isolering, 2 lag rodfast underpap (som Icopal 507 P), grundmursplade (som Icopal), Nylonnet M Fibertex Enkadrain (drænlag), 40 mm vandsugende stenuld (vandreservoir), 50 mm letvægts jordblanding EXS 60/40, Sedum plantedække. Der blev udført 150-200 mm sikkerhedszone med singles ved tagrende. Kipinddækning blev udført til omkring 50 mm over færdig tagoverflade.
Beplantninger	Sedum

Skovbrynet (fortsat)

Erfaringer	Registret svigt i forhold til det grønne tag: • Inddækninger for lave • Manglende afstand til inddækninger og gennemføringer • Vandindtrængning ved kipinddækning • Huller i tagpapmembranen Som oplyst ovenfor blev kipinddækning udført med en højde på omkring 50 mm, hvor kravet er min 150 mm over færdig tagoverflade. Følgende konklusioner fremgår af Byggeskadefondens skadesrapport: Karakter og omfang af skade: <i>"Der ses tydelige tegn på, at der indvendigt i "trapperum" ved indgang til nr. 16 ved vest facaden øverst oppe ved vinduesparti mod tagkant ved indgangsfacade stadigvæk periodevis forekommer vandindtrængning, hvor vandet løber ned over vinduespartiet på den indvendige side, og bl.a. giver anledning til misfarvninger på overflader samt afskalning af maling på fodlister på 1. sal. Vandindtrængning sker altid efter en periode med længerevarende regn og nedbør."</i> Karakter og omfang af registrerede svigt: <i>"Det er fondens vurdering, at det er overvejende sandsynligt, at årsagen til de registrerede periodevise vandindtrængninger skyldes et eller flere huller i tagpapmembranen, som er skjult under den "grønne" tagbelægning."</i>
-------------------	---

Skovbrynet (fortsat)

Tekniske tegninger:



Kilde: Udlånt af Frederiksen & Knudsen Arkitekter A/S PAR, Østerbrogade 52, 2100 København Ø

Korsgadehallen



Kilde: Google Maps [<https://maps.google.com>]



Kilde: Google Maps [<https://maps.google.com>]

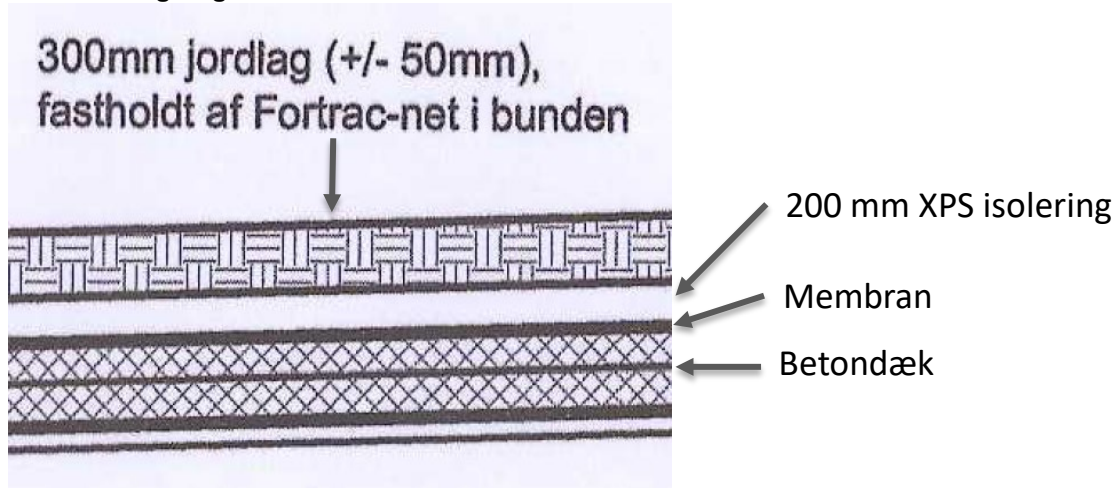
Adresse	Korsgade 29, 2200 København
Opført	2006
Bygningsbrug	Sportshal
Konstruktion af grønt tag	2012
Grønt tag areal	1200 m ²
Type af grønt tag	Intensive, omvendt tag
Opbygning af tagkonstruktion	Bærende konstruktion: betondæk Grønt tag: membran, 200 mm XPS isolering, 200-350 mm jordlag (med Fortrac-net i bunden)
Beplantninger	Græs

Korsgadehallen (fortsat)

Erfaringer	Skader Fugt: Det er oplyst, at der har været massive udfordringer med indtrængning af vand, når det regner meget. Dette har ført til flere vandskader i hallen, herunder at gulvet er blevet skiftet 3 gange. I sidste omgang blev det valgt at skifte fra trægulv til et gummi-gulv med en form for hulrum under gulvet samt øget ventilation for at affugte bedre i hallen. Svigtet skyldes en dårlig konstruktionsløsning, hvor man har anvendt Fundablokke i den grønne tagkonstruktion. Dette har ført til, at der var vandrette flader, hvor vandet har kunnet samle sig og med tiden har kunnet trænge ind igennem den bærende konstruktion. På grund af det komplekse design af det grønne tag og vandets evne til at løbe gennem konstruktionerne har det været vanskeligt at lokalisere, hvor indtrængningerne fandt sted. Det er oplyst, at udbedringen er foregået ved at prøve sig frem ved lave åbninger i det grønne tag ned til membranen. Dette blev gjort fordi de involverede parter åbenbart ikke havde nogen ide om, hvor skaden skulle findes. Man har forsøgt at udføre løsninger, hvor vandet blot ledes væk. Dette har til en vis grad virket, men er en utilfredsstillende nødløsning, som måske ikke virker på længere sigt. Man har siden hen fjernet et antal af de installerede Fundablokke fra tagkonstruktionen. Det er oplyst, at udfordringen med indtrængning af vand generelt er udbedret. Der er dog stadig udfordringer med vand, der til tider løber ned af vægge, hvilket giver anledning til bekymring. Brand: Det er oplyst, at der har været 2-3 brande på det grønne tag, hvilket skyldes, at der har været problemer med det installerede sprinkleranlæg, som ikke har virket efter hensigten og har ledt til at vegetationen er tørret ud. Anlægget er angiveligt blevet repareret flere gange, og der er på nuværende tidspunkt usikkerhed om, hvorvidt anlægget virker eller om det overhovedet stadig er der. Det oplyses, at der i forbindelse med drift og vedligehold af det grønne tag har været mangel på vidensdeling. Positive resultater: Det grønne tag har været et rigtig godt grønt område til socialt brug, såsom afholdelse af teaterforestillinger og koncerter.
-------------------	--

Korsgadehallen (fortsat)

Tekniske tegninger:



Kilde: Udlånt af BBP Arkitekter A/S, Bredgade 25, E, 1260 København K

Edison Park



Kilde: Google Maps [<https://maps.google.com>]

Adresse	Soklen 2-14, Fatningen 1-17 og Fatningen 2-20. 2730 Herlev.
Opført	2013
Bygningsbrug	Almennyttige boliger
Konstruktion af grønt tag	2013
Grønt tag areal	1250 m ²
Type af grønt tag	Ekstensivt, retvendt
Opbygning af tagkonstruktion	Bærende konstruktion: betondæk Grønt tag: 220 mm betondæk, 450 mm isolering (gennemsnitlig tykkelse), tagpap, sedum tag.
Beplantninger	Sedum

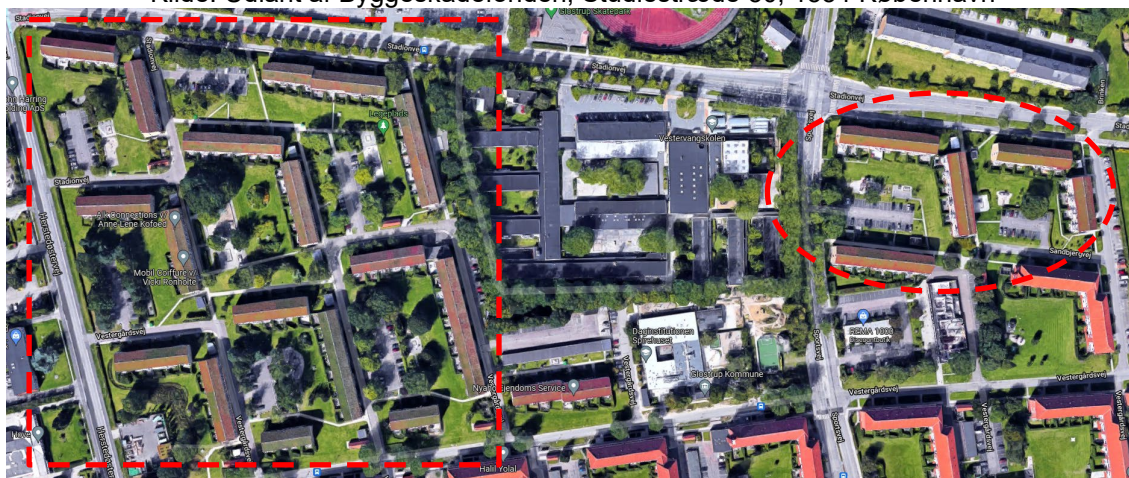
Edison Park (fortsat)

Erfaringer	Skader: Der har været flere utætheder i tagkonstruktionen i en blok, som er udbedret af entreprenøren. Utæthederne var ved gennem-brydninger, hvor der var lavet dårlige samlinger. Det er oplyst, at det har været besværligt at finde utæthederne for entreprenøren. På grund af, at vandets kan løbe vandret inde i det grønne tag, har det været vanskeligt at lokalisere, hvor van-det trængte ind. Ejendomsadministrationen oplyser, at de mener entreprenøren udførte trykprøvninger for at finde utæthederne. Afledning af regnvand: Det er oplyst, at ejendomsadministrationen mener, at regnvand bliver tilbageholdt som angivet af producenten Vedligehold: Det er oplyst, at ejendomsadministrationen vurderer, at driften af den grønne tagkonstruktion ikke er dyrere end konventio-nelle sorte tage. Der laves løbende eftersyn af afløb for at sikre, at de virker, og der er gartner gennemgang en gang år-ligt.
-------------------	--

Glostrup Vestergård, Glostrup Ejendomsselskab



Kilde: Udlånt af Byggeskadebogen, Studiestræde 50, 1554 København



Kilde: Google Maps [<https://maps.google.com>]

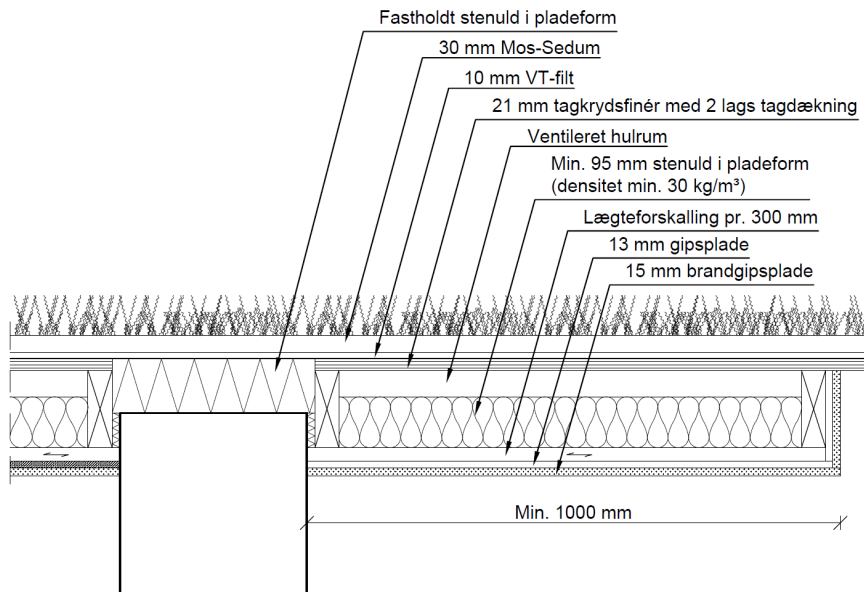
Adresse	Sandbjergvej 11-13, Sportsvej 12-18, Vestergårdsvej 22-78, Stadionvej 61-79 og Stadionvej 87-141. 2600 Glostrup.
Opført	1963-65
Bygningsbrug	Almennyttige boliger
Konstruktion af grønt tag	2015-16
Grønt tag areal	14.000 m ²
Type af grønt tag	Ekstensivt, koldt tag
Opbygning af tag konstruktion	Bærende konstruktion: Tagspær Grønt tag: 15 mm brandgips, 13 mm gips, lægteforskalling pr. 300 mm, 45x125 mm tagspær med 95 mm stenuld (30 mm ventileret hulrum over mineraluld), 21 mm tagkrydsfiner, 2 lag tagpap, 10 mm VT-filt, vækstlag (vandholdende tekstilfibre), 30 mm Xeroflor Mos-sedum
Beplantninger	Tre forskellige slags stenurt

Glostrup Vestergård, Glostrup Ejendomsselskab (fortsat)

Erfaringer	Skader: Det er oplyst, at der har været en lille vandskade ved et ovenlysvindue, hvilket skyldtes forkert inddækning. Derudover er der ikke observeret nogle fugtskader ift. den grønne tagkonstruktion. Andre udfordringer: Det er oplyst, at det er kommet bag på mange beboere og ejendomsadministrationen, at der er en del gener der følger med tagene. Der har været udfordringer med, at mos har 'overtaget' dele af taget. Det gør det åbenbart ekstra interessant for fuglene at sidde og pille i Sedum taget og smide mos ned, hvilket resulterer i mos på altaner, i haver osv. Særligt i 2021 blev store mængder mos smidt ned af fuglene. Måger har indtaget tagene og lavet reder flere forskellige steder. Derudover har der været udfordringer med springhaler (sorte insekter [90]), som har generet enkelte steder. Disse springhaler er bekæmpet med udsatte rovmider. Vedligehold: Det er oplyst, at ejendomsadministrationen har en ide om, at det er lidt dyrere at vedligeholde et grønt tag end et konventionelt sort tag. Det skyldes, at der er udgifter til gødning, eftersåning, ekstra rensning af tagrender, ekstra vedligehold på opsamlingsbokse på nedløbene mv. Der er ekstra tømning/vedligehold af opsamlingsboksene på nedløbene. Dertil oplyses det, at tagrenderne ofte er fyldte med mos mm. efter store regnskyl, og at en del af dette skylles ud via tagnedløbet, hvilket giver anledning til ekstra rensningsarbejde. Afledning af regnvand: Det er oplyst, at ejendomsadministrationen mener, at regnvand bliver tilbageholdt som angivet af producenten.
-------------------	--

Glostrup Vestergård, Glostrup Ejendomsselskab (fortsat)

Tekniske tegninger:



Kilde: Udlånt af Domina AS Rådgivende Ingeniører, Ved Vesterport 6, 3 sal, 1612 København

Grønne tage

Status på viden og erfaringer om grønne tage

Nærværende rapport er baseret på et litteraturstudie samt indhentning af viden fra branchen for at vurdere de grønne tage i et dansk klima og for at afklare fordele og ulemper samt vurdere grønne tage i et bæredygtighedsperspektiv, herunder levetid, vedligehold, miljøbelastning og totaløkonomi. Dette sker ved at give eksempler på, hvilke typer der er egnede som grønne tage, herunder angivelse af diverse opmærksomhedspunkter under udførelse og projektering set i et dansk klima. Projektet giver et billede af, hvor varieret udvalget af grønne tag-systemer (opbygninger) reelt er. Herudover beskrives betydende egenskaber for grønne tage. Projektet kan virke som et grundlag for udarbejdelse af regler og anvisninger for etablering af grønne tage.