



Norges miljø- og  
biovitenskapelige  
universitet

**Masteroppgave 2024**

RealTek

**30 stp**

## **Nedbørslaster på grønne ekstensive tak over vintersesongen**

Precipitation loads on green extensive roofs during  
the winter season

**Louise Fiskum Ranum**

Byggeteknikk og arkitektur

# Forord

Denne masteroppgaven markerer avslutningen på fem fine og lærerike år ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet. Det har vært en glede å gjøre et dypdykk i et så dagsaktuelt tema som grønne tak representerer, hvor kunnskap og kompetanse fra flere fag opp gjennom studietiden har kommet til nytte.

Jeg ønsker å rette en stor takk til min hovedveileder Iver Frimannslund for verdifull veiledning og gode råd fra første dag. Jeg setter pris på at jeg fikk muligheten til å skrive denne oppgaven, og engasjementet og tålmodigheten som har preget veiledningsmøtene har gjort arbeidet med den lystbetont.

Avslutningsvis ønsker jeg å takke kakebakelaget blant avgangskullet på byggeteknikk og arkitektur. Uten gode diskusjoner og en ny, søt delikatesse servert hver fredag, vet jeg ikke om dette prosjektet hadde latt seg gjøre.

*Louise Fiskum Ranum*

*Ås, Mai 2024*

# Sammendrag

Grønne tak har i takt med økende utfordringer knyttet til overvann i tettbebygde strøk, blitt et etablert tiltak for lokal håndtering av overvann. Takets evne til å forsinke avrenning, og redusere avrenningsintensitet og mengden vann som renner av taket, bidrar til å avlaste et allerede underdimensjonert vann- og avløpssystem i urbane bymiljøer.

Når bærekonstruksjoner dimensjoneres for en grønn takoppbygging i dag, legger *NS3840 – Grønne tak* til grunn last fra de grønne takelementene med full vannmetning, i permanent tilstand. I realiteten opptrer vannlast i grønne tak variabelt med nedbør og takets strømningshastighet. Dagens dimensjoneringspraksis betraktes derfor som konservativ.

I denne studien er vannlast og snølast på to grønne ekstensive tak analysert. Datagrunnlaget analysen baserer seg på, består av vektmålinger fra registrert over en periode fra 2018-2024. Med utgangspunkt i vektmålingene er det utviklet metoder for å estimere andelen vannlast og snølast på takene over totalt 6 vintersesonger.

Resultatene fra studien indikerer at vannlasten opptrer som en variabel last opp mot maksimal vannlagringskapasitet over vinteren. Videre faller vannlastnivået over vinteren sjeldent under vannlastnivået ved inngangen til vinteren. Med utgangspunkt i dette funnet, utføres to beregningseksempler som kvantifiserer grad av overdimensjonering med dagens dimensjoneringspraksis. I eksemplene beregnes vannlasten som en permanent last med egenlasten til det grønne taket.

Største vannlast for sesongen inntreffer som regel etter sesongens største snølast, i forbindelse med snøsmelting. Videre viser analysen at største påfølgende vannlast etter sesongens største snølast, inntreffer minst én dag etter. Største snølast og største vannlast for sesongene inntreffer ved ingen omstendighet samtidig, verken når sesongens største nedbørslast, største snølast eller største vannlast inntreffer. Med utgangspunkt i største estimerte vannlast samtidig som største snølast inntreffer, foreslås det en alternativ metode hvor vannlasten dimensjoneres som en variabel last.

# Abstract

As a result of increasing challenges related to stormwater in urban areas, green roofs have become an established measure for local stormwater management. The roof's ability to delay runoff, as well as reduce runoff intensity and the amount of water flowing off the roof, helps reduce the impact on the existing under designed water and sewage system in urban city environments.

When structural elements are designed to resist the load from a green roof structure today, NS3840 - Green Roofs assumes loads from the green roof elements with full water saturation, in a permanent state. Realistically the water loads in green roofs vary with precipitation and the roof's flow rate. Today's design practice is therefore considered conservative.

In this study, water load and snow load on two extensive green roofs have been analysed. The analysis is based on a data foundation that consists of weight measurements registered between 2018-2024. Based on the weight measurements, methods have been developed to estimate the proportion of water load and snow load on the roofs for a total of 6 winter seasons.

The results of the study indicate that the water load acts as a variable load towards maximum water storage capacity throughout the winter. Furthermore, the water load level seldom falls below the water load level in the entering of winter. Based on this finding, two calculation examples are performed to quantify the degree of additional capacity when compared to current design practices. In the examples, the water load is calculated as a permanent, dead load.

The highest seasonal water load usually occurs after the highest snow load of the season, as snowmelt. Furthermore, the analysis shows that the subsequent largest water load occurring after the season's highest snow load, occurs at least one day later. The largest snow load and the largest water load representing the seasons do under no circumstance occur simultaneously, neither in the event of the season's highest precipitation load, highest snow load, nor largest water load. Based on the largest estimated water load occurring simultaneously with the largest snow load, an alternative dimensioning method is proposed where the water load is designed as a variable load.

|  |            |
|--|------------|
| <b>Figurliste .....</b>  | <b>vii</b> |
| <b>Tabelliste .....</b>  | <b>ix</b>  |
| <b>Formelliste.....</b>  | <b>x</b>   |
| <b>Bideliste.....</b>  | <b>xi</b>  |
| <br>   |            |
| <b>1 Introduksjon .....</b>  | <b>1</b>   |
| 1.1 Bakgrunn .....   | 3          |
| 1.2 Problemstilling og forskningsspørsmål.....   | 6          |
| 1.3 Avgrensninger og begrensninger .....   | 7          |
| 1.4 Struktur på oppgaven.....  | 8          |
| <b>2 Teori.....</b>  | <b>9</b>   |
| 2.1 Innledende om grønne tak .....   | 9          |
| 2.1.1 Ulike typer grønne tak.....  | 9          |
| 2.1.2 Prinsipiell oppbygning av et grønt tak.....  | 10         |
| 2.1.3 Grønne ekstensive tak .....  | 10         |
| 2.1.4 Sedumtak .....   | 11         |
| 2.1.5 Overvannsdiskonerende funksjoner.....  | 11         |
| 2.1.6 Vannmetning i grønne tak .....   | 12         |
| 2.2 Konstruksjonssikkerhet og prosjektering av ekstensive grønne tak.....                          | 15         |
| 2.2.1 Innledende om dimensjoneringsregler for konstruksjoner .....                                 | 15         |
| 2.2.2 Standarder for dimensjonering av grønne tak .....  | 15         |
| 2.2.3 Konstruksjonssikkerhet ved partialfaktormetoden .....  | 16         |
| 2.2.4 Statistisk definisjon for bestemmelse av karakteristiske laster .....                        | 17         |
| 2.2.5 Partialfaktorer og kombinasjonsverdier .....   | 17         |
| 2.2.6 Lastkombinasjoner .....  | 18         |
| 2.2.7 Prosjektering av grønne ekstensive tak etter dagens standard.....                            | 19         |
| 2.2.8 Prosjektering av grønne tak på eksisterende konstruksjoner bygget etter eldre regelverk...21 |            |
| 2.4 Trevirkets hygroskopiske egenskaper.....   | 23         |
| 2.6 Tyngdetetthet for snø.....   | 25         |
| <b>3 Forsøksanlegg .....</b>   | <b>26</b>  |
| 3.1 Grønne takmoduler ved Planteskolen i Ås.....   | 26         |
| 3.3 Oppbygning av forsøktakene.....  | 28         |
| 3.4 Fuktlagring i de grønne takelementene.....   | 33         |
| 3.6 Målte parametere og måleverktøy .....  | 35         |
| 3.6.1 Vekt .....   | 35         |
| 3.6.2 Lufttemperatur .....   | 37         |
| 3.6.3 Nedbør.....  | 37         |
| 3.7 NVE Sildre .....   | 38         |
| 3.8 Spesielle hendelser.....   | 39         |
| 3.9 Klima .....  | 41         |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 3.9.1    | Klimadata for Ås.....   | 41        |
| 3.9.2    | Snødybdeobservasjoner og karakteristisk snølast.....                              | 42        |
| 3.9.3    | Forventet klimaendring.....   | 42        |
| <b>4</b> | <b>Metode.....</b>  | <b>44</b> |
| 4.1      | Databehandling.....   | 46        |
| 4.1.1    | Datafiltrering og avvikende verdier.....  | 46        |
| 4.2      | Metode for estimering av takmodulenes egenvekt og nedbørslast.....                | 47        |
| 4.2.1    | Validering av egenlast.....   | 48        |
| 4.3      | Metode for estimering av snølast på de grønne takene.....                         | 49        |
| 4.3.1    | Validering av resultat.....   | 49        |
| 4.4      | Metode for estimering av vannlast på de grønne takene.....                        | 55        |
| 4.5      | Metode for kvantifisering av samtidighet mellom maksimal snølast og vannlast..... | 56        |
| 4.6      | Beregningseksempel – dimensjonerende lastsituasjon ved ny grønn takoppbygging..   | 57        |
| 4.7      | Bruk av KI-verktøy.....   | 59        |
| <b>5</b> | <b>Resultater.....</b>  | <b>62</b> |
| 5.1      | Takmodulenes egenvekt og nedbørslast.....   | 62        |
| 5.1.1    | Takmodulenes egenvekt.....  | 62        |
| 5.1.2    | Takmodulenes nedbørslast.....   | 62        |
| 5.1.3    | Verifisering av takmodulenes egenvekt og nedbør.....                              | 66        |
| 5.2      | Estimert snølast på de grønne takene.....   | 71        |
| 5.2.1    | Snølast på referansetak (kg).....   | 71        |
| 5.2.2    | Snødybde- og densitetsmålinger.....   | 73        |
| 5.2.3    | Validering av estimert snølast på de grønne takene.....                           | 74        |
| 5.3      | Last fra vannmetning over vintersesong.....                                       | 76        |
| 5.3.1    | Estimert vannlast (kN/m <sup>2</sup> ) på tak 1 og tak 3.....                     | 76        |
| 5.3.2    | Vannlast ved inngang til vinter.....  | 80        |
| 5.3.3    | Vintersesong med største estimerte vannlast på tak 1 – 2023 til 2024.....         | 81        |
| 5.3.4    | Vintersesong med største estimerte vannlast på tak 3 – 2022 til 2023.....         | 85        |
| 5.3.5    | Samtidighet mellom snølast og vannlast.....                                       | 89        |
| 5.3.6    | Vannlast ved maksimal snølast.....  | 91        |
| 5.4      | Beregningseksempel: dimensjonerende lastsituasjon ved ny grønn takoppbygging....  | 92        |
| 5.4.1    | Lett takkonstruksjon i massivtre.....   | 92        |
| 5.4.2    | Tung takkonstruksjon i armert plasstøpt betong.....                               | 95        |
| <b>6</b> | <b>Diskusjon.....</b>   | <b>98</b> |
| 6.1      | Datagrunnlag.....   | 98        |
| 6.2      | Takmodulenes egenvekt og nedbørslast.....   | 100       |
| 6.3      | Estimert snølast på de grønne takene.....   | 102       |
| 6.3.1    | Validering av estimert snølast på de grønne takene.....                           | 103       |
| 6.4      | Vannlast på de grønne takene.....   | 106       |
| 6.4.1    | Forskningsspørsmål 1.....   | 106       |
| 6.4.2    | Forskningsspørsmål 2.....   | 109       |
| 6.4.3    | Forskningsspørsmål 3.....   | 110       |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 6.5       | Overførbarhet.....  | 113        |
| <b>7</b>  | <b>Konklusjon.....</b>  | <b>115</b> |
| 7.1       | Forskningsspørsmål 1.....   | 116        |
| 7.2       | Forskningsspørsmål 2.....   | 118        |
| 7.3       | Forskningsspørsmål 3.....   | 119        |
| <b>8</b>  | <b>Veien videre.....</b>  | <b>120</b> |
| <b>9</b>  | <b>Litteraturhenvisning.....</b>  | <b>121</b> |
| <b>10</b> | <b>Vedlegg .....</b>  | <b>124</b> |
| A         | Fullstendige resultater fra analyse, fremstilt grafisk.....                                 | 124        |
| B         | Volumberegning av snø på tak 2 og tak 3.....  | 133        |
| C         | Kodescript anvendt i Python for produksjon av datasettene som er anvendt for videre analyse | 136        |

# Figurliste

|   |    |
|---|----|
| <b>Figur 1</b> Prinsipiell oppbygning av et grønt tak (Thodesen et al., 2018).....  | 10 |
| <b>Figur 2</b> Tørr tilstand $\rho_{tørr}$ (Jensen et al., 2024).....   | 12 |
| <b>Figur 3</b> Stabil fukttilstand $\rho_i$ , porer internt i massen fylt med vann(Jensen et al., 2024).....  | 12 |
| <b>Figur 4</b> Full vannmettet tilstand $\rho_{wk}$ (magasinerings)(Jensen et al., 2024).....   | 12 |
| <b>Figur 5</b> Gjennomtrukket tilstand, taket holder på en større mengde vann enn metningspunktet tilsier(Noreng et al., 2012) .....  | 14 |
| <b>Figur 6</b> Oppbygning av en takkonstruksjon med grønt tak (Jensen et al., 2024).....  | 19 |
| <b>Figur 7</b> Kategorisering av de forskjellige lastene takkonstruksjonen utsettes for (Jensen et al., 2024) .....   | 19 |
| <b>Figur 8</b> Luftfuktighetsdiagram, beskriver sammenheng mellom vandampinnhold, temperatur og damptrykk (Byggforsk, 2018).....  | 23 |
| <b>Figur 9</b> Sorpsjonskurve for furu med densitet 500kg/m <sup>3</sup> {Byggforsk, 2018 #40}.....   | 24 |
| <b>Figur 10</b> Forsøktakene ved NMBU, tak 1 til venstre, tak 2 i midten og tak 3 til høyre(Øyre & Trommald, 2018).....   | 27 |
| <b>Figur 11</b> Sett fra nord ligger tak 1 lengst bort, tak 2 i midten og tak 3 nærmest(Øyre & Trommald, 2018) 27   | 27 |
| <b>Figur 12</b> Takenes utvendige og innvendige mål. Illustrasjon L.F. Ranum .....  | 28 |
| <b>Figur 13</b> Forsøktakene som en del av et 200m <sup>2</sup> stort tak. Illustrasjon L.F. Ranum .....  | 28 |
| <b>Figur 14</b> Takene anlagt på seks søylefundament (Øyre & Trommald, 2018) .....  | 29 |
| <b>Figur 15</b> Oppbygning av de grønne ekstensive forsøktakene ved NMBU(Øyre & Trommald, 2018).....  | 30 |
| <b>Figur 16</b> Oppbygning av fallisolasjonen på forsøktakene (Øyre & Trommald, 2018) .....   | 30 |
| <b>Figur 17</b> Filtduk mellom LECA og sedummatter(Øyre & Trommald, 2018) .....   | 30 |
| <b>Figur 18</b> Veiecelle av typen «LPX Compression Mini-disc 5000kg» fra PT Ltd(Øyre & Trommald, 2018)....   | 36 |
| <b>Figur 19</b> Veiecelle anlagt på søylefundament med takkonstruksjon .....  | 36 |
| <b>Figur 20</b> Tegning med mål av vinkeljern og flattjern montert på veiecellen(Øyre & Trommald, 2018) .....   | 36 |
| <b>Figur 21</b> Målt snødybde i Ås 1919 - 2019(Cryo.met, 2024) .....  | 42 |
| <b>Figur 22</b> De forskjellige lastene inkludert i registrert vekt fra forsøktakene. Illustrasjon L.F. Ranum .....   | 44 |
| <b>Figur 23</b> Dybdemålingspunkter på tak 3. Illustrasjon: L. F. Ranum.....  | 50 |
| <b>Figur 24</b> Dybdemålingspunkter på tak 2. Illustrasjon: L. F. Ranum.....  | 50 |
| <b>Figur 25</b> Dybdemåling på tak 3. Volum av snø blir beregnet ut fra volum snø på taket opp til starter på fallisolasjon (gul boks) og høyden på snøen ved samme punkt (rød boks). Illustrasjon: L. F. Ranum ..... | 54 |
| <b>Figur 26</b> Eksempel på bruk av KI ved Chat GPT - 4.0 for å utvikle en kode.....  | 60 |
| <b>Figur 27</b> Utklipp av en verdi for «Nedbør (kg/m <sup>2</sup> )» generert av koden utviklet i Figur 26 .....   | 61 |
| <b>Figur 28</b> Utklipp av en verdi for «Regnlast (kg/m <sup>2</sup> )» generert av koden utviklet i Figur 27 .....   | 61 |
| <b>Figur 29</b> Total nedbørslast i kN/m <sup>2</sup> over målte vintersesonger for tak 1.....  | 63 |
| <b>Figur 30</b> Total nedbørslast i kN/m <sup>2</sup> over målte vintersesonger for tak 3.....  | 64 |
| <b>Figur 31</b> Nabopunkter for verifisering av egenvekt tak 1.....   | 66 |
| <b>Figur 32</b> Nabopunkter for verifisering av egenvekt tak 2.....   | 66 |



|  |    |
|--|----|
| <b>Figur 33</b> Nabopunkter for verifisering av egenvekt tak 3.....  | 66 |
| <b>Figur 34</b> Nedbør i en 14-dagers periode før registrert egenvekt tak 1(Klimasevicesenter, 2024).....                        | 67 |
| <b>Figur 35</b> Døgnmiddeltemperatur målt i en 14-dagers periode før registrert egenvekt tak 1<br>(Klimasevicesenter, 2024)..... | 67 |
| <b>Figur 36</b> Nedbør i en 14-dagers periode før registrert egenvekt tak 2(Klimasevicesenter, 2024).....                        | 68 |
| <b>Figur 37</b> Døgnmiddeltemperatur målt i en 14-dagers periode før registrert egenvekt tak<br>2(Klimasevicesenter, 2024).....  | 68 |
| <b>Figur 38</b> Nedbør i en 14-dagers periode før registrert egenvekt tak 3(Klimasevicesenter, 2024).....                        | 68 |
| <b>Figur 39</b> Døgnmiddeltemperatur målt i en 14-dagers periode før registrert egenvekt tak<br>3(Klimasevicesenter, 2024).....  | 69 |
| <b>Figur 40</b> Estimert nedbør (kg) for alle tre tak 2018.....  | 69 |
| <b>Figur 41</b> Estimert nedbør (kg) for alle tre tak 2019.....  | 70 |
| <b>Figur 42</b> Estimert snølast (kg) på referansetak 2 for alle målte vintersesonger.....                                       | 71 |
| <b>Figur 43</b> Estimert vannlast (kN/m <sup>2</sup> ) over målte vintersesonger for tak 1.....                                  | 76 |
| <b>Figur 44</b> Estimert vannlast (kN/m <sup>2</sup> ) over målte vintersesonger for tak 3.....                                  | 77 |
| <b>Figur 45</b> Vekt registrert på alle tre tak i 2020 og 2021.....  | 78 |
| <b>Figur 46</b> Total nedbørslast, vannlast og snølast (kN/m <sup>2</sup> ) for tak 1 vintersesong 2023-2024.....                | 82 |
| <b>Figur 47</b> Total nedbørslast, vannlast og snølast (kN/m <sup>2</sup> ) for tak 3 vintersesong 2023-2024.....                | 82 |
| <b>Figur 48</b> Lufttemperatur vintersesong 2023-2024.....   | 83 |
| <b>Figur 49</b> Døgnnedbør vintersesong 2023-2024.....   | 83 |
| <b>Figur 50</b> Total nedbørslast, vannlast og snølast (kN/m <sup>2</sup> ) for tak 1 vintersesong 2022-2023.....                | 86 |
| <b>Figur 51</b> Total nedbørslast, vannlast og snølast (kN/m <sup>2</sup> ) for tak 3 vintersesong 2022-2023.....                | 86 |
| <b>Figur 52</b> Lufttemperatur vintersesong 2022-2023.....   | 87 |
| <b>Figur 53</b> Døgnnedbør vintersesong 2022-2023.....   | 87 |

# Tabelliste

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabell 1</b> Utvikling av karakteristisk snølast på mark for Oslo i perioden 1928 og frem til i dag .....   | 21 |
| <b>Tabell 2</b> Tyngdetetthet for ulike typer snø (Standard Norge, 2019) .....   | 25 |
| <b>Tabell 3</b> Materialenes byggehøyde, vekt i tørr og vannmettet tilstand på de grønne takene.....   | 31 |
| <b>Tabell 4</b> Materialenes byggehøyde og vekt i tørr tilstand på referansetaket .....  | 32 |
| <b>Tabell 5</b> Måleparametrene med tilhørende ID-nummer, målepunkt, enhet, frekvens og periode.....   | 38 |
| <b>Tabell 6</b> Spesielle hendelser og erfaringer som kan innvirke på registrert måledata .....  | 39 |
| <b>Tabell 7</b> Månedsnormaler for nedbør og temperatur i Ås 1991-2020.....  | 41 |
| <b>Tabell 8</b> Prosjekterte og registrerte egenlaste til takene.....  | 62 |
| <b>Tabell 9</b> Største estimerte nedbørsvekt i kN/m <sup>2</sup> per vintersesong for tak 1.....  | 63 |
| <b>Tabell 10</b> Største estimerte nedbørsvekt i kN/m <sup>2</sup> per vintersesong for tak 3.....   | 65 |
| <b>Tabell 11</b> Største estimerte snølast per vintersesong .....  | 72 |
| <b>Tabell 12</b> Resultater fra snødybdemåling på tak 2 og tak 3 i januar 2024 .....   | 73 |
| <b>Tabell 13</b> Resultater fra densitetsmåling fra mark i januar 2024.....  | 73 |
| <b>Tabell 14</b> Estimert snølast på tak beregnet etter volum av snø og snødensitet 21.01 sammenlignet med vekt av snø estimert etter metode 4.3. .... | 74 |
| <b>Tabell 15</b> Estimert snølast på tak beregnet etter volum av snø og snødensitet 23.01 sammenlignet med vekt av snø estimert etter metode 4.3. .... | 75 |
| <b>Tabell 16</b> Estimert maksimal vannlast per vintersesong for tak 1 .....   | 77 |
| <b>Tabell 17</b> Estimert maksimal vannlast per vintersesong for tak 3 .....   | 79 |
| <b>Tabell 18</b> Vannlastnivå på tak 1 og tak 3 ved inngang til vinter .....   | 80 |
| <b>Tabell 19</b> Dato for sesongenes maksimale vannlast i forhold til maksimale snølast.....   | 89 |
| <b>Tabell 20</b> Tidsforskjell mellom største snølast og påfølgende største vannlast .....   | 90 |
| <b>Tabell 21</b> Vannlast ved tidspunkt for sesongens maksimale snølast .....  | 91 |

# Formelliste

|   |    |
|---|----|
| <b>Formel 1</b> Maksimal vannlagringskapasitet.....                   | 13 |
| <b>Formel 2</b> Massetetthet.....                                     | 13 |
| <b>Formel 3</b> Dimensjonerende last ved partialfaktormetoden.....    | 16 |
| <b>Formel 4</b> Generell formel for dimensjonerende lastvirkning..... | 18 |
| <b>Formel 5</b> Valg av karakteristisk dominerende variabel last..... | 20 |
| <b>Formel 6</b> Lastsituasjon ved kombinasjon 1.....                  | 20 |
| <b>Formel 7</b> Lastsituasjon ved kombinasjon 2.....                  | 20 |
| <b>Formel 8</b> Total nedbørsvekt på tak j ved tidspunkt i.....       | 47 |
| <b>Formel 9</b> Vekt av snø på grønt tak ved tidspunkt i.....         | 49 |
| <b>Formel 10</b> Volum av snøprøve i.....                             | 52 |
| <b>Formel 11</b> Vekt av snøprøve i.....                              | 53 |
| <b>Formel 12</b> Vannlast ved tidspunkt i på tak j.....               | 55 |
| <b>Formel 13</b> Normalisert last konvertert til Newton.....          | 55 |
| <b>Formel 14</b> Karakteristisk snølast på tak.....                   | 58 |

# Bildeliste

|  |    |
|--|----|
| <b>Bilde 1</b> Dybdemåling på mark 21.januar 2024. Foto: I. Frimannslund .....   | 51 |
| <b>Bilde 2</b> Snø på tak 2 og 3 21.januar 2024. Snøen dekker hele parapeten og henger tilsynelatende fra kanten av den. Foto: I. Frimannslund ..... | 51 |
| <b>Bilde 3</b> Veiing av snøprøve 23.januar 2024. Foto: L. F. Ranum .....  | 51 |
| <b>Bilde 4</b> Snøprøvetakning med sylinderformet rør 23.januar 2024. Foto: L. F. Ranum.....   | 51 |
| <b>Bilde 5</b> Snø på tak 3 23. januar 2024. Foto: L. F. Ranum.....  | 52 |
| <b>Bilde 6</b> Snø på tak 2 23. januar 2024. Foto: L. F. Ranum.....  | 52 |



# 1 Introduksjon

Det nordiske klimaet byr på utfordrende forhold for bygningsmassen vår. Variasjonen av maritimt tempererte, kontinentale og polare områder legger grunnlag for store klimatiske forskjeller i og mellom de nordiske landene, men også lokalt og ned mot én kilometers avstand mellom ulike mikroklimaer (Thodesen et al., 2018). Ved planlegging av bygninger i dag må det i tillegg tas hensyn til årstidenes største påkjenninger. Om vinteren opptrer tunge snølaste på takkonstruksjonen. Over vår- og høstsesongen gir regn, i kombinasjon med vind, store variasjoner i fuktpåvirkning av bygningens klimaskall og omgivelser (Andenæs, 2021).

Som en ekstra dimensjon har klimaendringer preget verdensbildet siden midten av 1900-tallet og frem til i dag. Utslipp av karbondioksid fra menneskelig aktivitet siden industrialiseringen på 1850-tallet begrunnes som hovedårsak til at en større andel av solens energi forblir i jordens atmosfære. Generelt leder dette til at gjennomsnittstemperaturen på jorden øker (NASA, 2024). For det nordiske klimaet innebærer oppvarmingen et mildere klima og mer ekstrem nedbør i form av økt mengde og intensitet (Hanssen-Bauer et al., 2016). Nedbørshendelsenes korte varighet og avgrensede lokasjon gjør de utfordrende å predikere og registrere ved eksisterende målestasjoner (Benestad & Haugen, 2007).

I takt med nyere tids urbanisering har man i byer og mindre tettsteder opplevd utfordringer knyttet til overvann. Utbygging av infrastruktur til vann og avløp har ikke fulgt samme utvikling som befolkningsveksten. I kombinasjon med fortetning av terreng og bruk av mindre permeable materialer infiltreres ikke vannet via grunnen, men renner minste motstands vei langs overflaten på gateplan (Broekhuizen et al., 2019). Ved større regnværhendelser samler overvannet seg på steder det vanligvis ikke pleier og skaper oversvømmelser. Dette forårsaker skader på bygningsmasse og annen infrastruktur for flere milliarder kroner årlig, kun i Norge ((2021–2022)).

Som et tiltak for å redusere avrenningen fra overvann, etablerte interesseorganisasjonen Norsk Vann tretrinnsstrategien for håndtering av overvann i 2008. Fra 1. januar 2024 ble denne strategien lovfestet i plan- og bygningsloven, og det innebærer at enhver byggesak er underlagt kommunens jurisdiksjon hva gjelder håndtering av overvann ((2021–2022)).

Lokal overvannsdiskonering (LOD) inngår som en del av tretrinnsstrategiens første trinn, og går ut på å fange opp, rense og infiltrere nedbør der den først faller (Paus, 2018). Blå-grønn infrastruktur integrert i og rundt bygningen kan bidra til å sikre dette, og blå-grønne tak anses å være én slik løsning. Blå-grønne tak har som hovedfunksjon å redusere og forsinke nedbør fra å renne videre ned fra taket, og belaste kommunalt vann- og avløpsnett. Forskning støtter oppunder bruk av blå-grønne tak som verktøy for overvannshåndtering (Thodesen et al., 2018). Avhengig av takets oppbygning og type klimasone har forsøk vist at det kan holde tilbake opptil 80% av nedbøren over ett år (Noreng et al., 2012).

Ved etablering av et blå-grønt tak og fordrøying av overvann ved nedbørshendelser, vil takets bærende konstruksjon bli utsatt for en lastøkning i form av en permanent egenlast og variable nedbørslaster. Det finnes mye forskning på blå-grønne taks fordrøyende egenskaper, mindre rundt hvordan de variable lastene i egenskap av snølast og vannlast varierer over året, og i samtidighet. Denne studien forsøker å bidra med innsikt for å tette dette kunnskapsgapet.

## 1.1 Bakgrunn

Ved prosjektering av blå-grønne tak på nye og eksisterende bygninger i dag, forutsettes det at bærekonstruksjonen skal tåle vekten av alle takmaterialer inkludert drenerende sjikt og vekstmedium. Vekten av det drenerende sjiktet og vekstmediumet beregnes med full vannmetning etter data oppgitt fra leverandør, og lasten dimensjoneres som en permanent egenlast (Standard Norge, 2015). Dette kommer i tillegg til stedsspesifikke laster for lokasjonen, som snølast og vindlast, og nyttelast. I en tenkt situasjon hvor 50-årslasten for snø inntreffer, vil bærekonstruksjonen følgelig være dimensjonert både for vekt fra fullstendig vannmettet blå-grønt tak og største dimensjonerende variable last for den mest ugunstige lastsituasjonen. (Standard Norge, 2019)

Vannlast i det grønne taket kan i realiteten betraktes som en variabel last, da den blant annet vil variere med klima og strømningshastigheten til taket. Da vannlast på grønne ekstensive tak som regel ikke vil være den dominerende variable lasten, sammenlignet med snølast og nyttelast, legger standarden i dag opp til en relativt konservativ beregning av lastsituasjonen på taket. Dette påvirker lastverifikasjoner i både bruddgrense(ULS)-, bruksgrense(SLS) og ulykkestilstand(ALS), med økt utnyttelsesgrad (Jensen et al., 2024).

Med utgangspunkt i to ekstensive grå tak bestående av et drenerende lag knuste lettklinker og vannmetning ved start på 55% av tørrvekt, har SINTEF utført kontrollerte forsøk for å måle avrenningsintensitet til takene. Resultatene viser at begge takene evner å yte samme reduksjon i avrenningsintensitet ved gjentatte intense regnskyll, etter 24 timers opphold mellom regnskyllene. Dette indikerer at vannmetning i det fordrøyende laget kan reduseres relativt raskt etter et regnskyll, gitt temperatur over 0°Celsius. (Noreng et al., 2012)

Formålet med et blå-grønt tak er å redusere og forsinke avrenningsvolum- og intensitet fra nedbør, ikke å lagre fuktighet over lengre tid. Det er av interesse å undersøke i hvilken grad man ved å dimensjonere for full vannmetning i permanent tilstand, i tillegg til variable laster, overdimensjonerer bærekonstruksjonen ved etablering av blå-grønne tak. Dette gir potensielt flere uheldige effekter:

- Økt materialforbruk ved behov for større dimensjoner på bærende elementer og forsterkende tiltak i nye og eksisterende bygninger



- Færre eksisterende bygninger oppnår tilfredsstillende bæreevne ved kontroll. Dersom byggherre velger vekk løsning med blå-grønt tak kan dette ha ringvirkende negativ effekt i form av mer avrenning til kommunalt avløpsnett

Dersom det viser seg at lastsituasjonen ved etablering av grønne tak kan dimensjoneres mer nøyaktig og reel, vil dette kunne gi direkte positive effekter i form av:

- etablering av flere grønne tak for overvannshåndtering da flere eksisterende bygg vil ha tilfredsstillende bæreevne uten stabiliserende tiltak
- redusert materialforbruk ved behov for mindre dimensjoner sammenlignet med under dagens dimensjoneringspraksis

Indirekte vil disse effektene bidra positivt til samfunn og miljø med:

- økt håndtering av overvann som potensielt reduserer kostnadene grunnet flomskader ved intense nedbørshendelser
- mindre CO<sub>2</sub>-utslipp i forbindelse med produksjon av materialer knyttet til prosjektet
- mer vegetasjon i bymiljøer har en positiv effekt på menneskene som omgir seg med den (Han et al., 2022)

Det nylige lovfestede kravet om håndtering av overvann i byggesak, signaliserer at etablering av blå-grønne tak i og rundt de større byene vil fortsette i samme takt, om ikke øke, i tiden fremover. I Oslo Kommune har de kartlagt og konkludert med at omtrent halvparten av alle takflater over 250 m<sup>2</sup> har en takvinkel som egner seg for grønne tak. (Ellingsen, 2021) Videre er det anslått et investeringsbehov på 332 milliarder for det norske vann- og avløpsnett over de neste 20 årene (Nitter, 2021). Lokal overvannsdiskonering (LOD) i form av grønne tak har i lengre tid vært, og vil i tiden som kommer, være et aktuelt tiltak for å bremse effektene av dette vedlikeholdsetterslepet.

I denne masterstudien undersøkes nivå av vannlast i kombinasjon med snølast for to ekstensive grønne takmoduler over flere vintersesonger. Forsøktakene er lokalisert ved Norges miljø- og

biovitenskapelige universitet i Ås, Akershus. Målingene er gjort over en periode på 6,5 år siden høsten 2018 og pågår fremdeles når denne studien skrives våren 2024.

## 1.2 Problemstilling og forskningsspørsmål

Tatt i betraktning dagens praksis for dimensjonering av bærekonstruksjonen til grønne ekstensive tak og potensialet for en mer reel tilnærming til lastsituasjonen takene utsettes for, er det av interesse å undersøke vannlast over vinteren grundigere. Følgende utfordring danner grunnlag for forskningsspørsmålene:

Det eksisterer et kunnskapsgap på grad av vannlast i ekstensive grønne tak over vintersesong.

Med dette utgangspunktet forsøker studien videre å styrke innsikt i følgende forskningsspørsmål:

1. I hvilket omfang opptrer vannlast på grønne ekstensive tak i løpet av vintersesongen?
2. Gir grad av samtidighet mellom vannlast og snølast grunnlag for en reduksjon av karakteristisk vannlast?
3. Overdimensjoneres takkonstruksjoner med grønne ekstensive tak i dag?

Formålet med denne studien er å undersøke hvorvidt bærekonstruksjonen til grønne ekstensive tak overdimensjoneres når det legges til grunn full vannmetning for takelementene i permanent tilstand. Evalueringen av forskningsspørsmålene bygger på eksperimentelle data fra to grønne ekstensive takmoduler og ett referansetak. Ved analyse av last fra vannmetning i de grønne takene over flere vintersesonger, vurderes muligheten for reduksjon av last fra vannmetning i grønne ekstensive tak i dimensjoneringsammenheng.

Forskningsbidraget i denne studien er å øke kunnskap rundt hvordan last fra fuktighet opptrer i grønne ekstensive tak over vinteren og danne grunnlag for videre forskning på fagfeltet.

## 1.3 Avgrensninger og begrensninger

Resultatene i denne masterstudien er gyldig for og begrenset av følgende forhold:

- Gjelder ekstensive grønne tak som definert i 2.1.3.
- Tidsperioden for datainnsamlingen på 6,5 år anses ikke å være tilstrekkelig representativ i en dimensjonerings situasjon. Kapittel 2.2.4 beskriver krav til bestemmelse av representative verdier og resultatene i denne studien vil kun indikasjoner.
- Vekt av snømengde på takmodulene er ikke direkte målt. Det innebærer en usikkerhet rundt estimert snølast og vannlast på de grønne takene.
- Takmodulene som resultatene bygger på er lokalisert i Ås, Akershus. Representativt klima er beskrevet i «Klimadata for Ås»

## 1.4 Struktur på oppgaven

- **Kapittel 1 Introduksjon** – Introduksjon av problemstilling og forskningsspørsmål, med begrensninger knyttet til resultatene
- **Kapittel 2 Teori** – Beskriver relevant teori om grønne tak, konstruksjonssikkerhet og prosjektering, klima og valgt databehandlingsprogram
- **Kapittel 3 Forsøksanlegg** – Beskriver oppbygning til forsøksstakene med relevante måleinstrumenter, NVE Sildre og klimadata for Ås
- **Kapittel 4 Metode** – Redegjør for metodene som er anvendt for å klargjøre datagrunnlaget fra forsøksstakene, finne takenes reelle egenlast, estimere snølast og vannlast, og vurdere snølastens og vannlastens samtidighet
- **Kapittel 5 Resultater** – Presentasjon av resultater fra eksperimentelle data
- **Kapittel 6 Diskusjon**– Analyse og diskusjon av resultater, med to forslag til reduksjon av last fra vannmetning av de grønne takene i dimensjoneringssammenheng
- **Kapittel 7 Konklusjon**– Konkluderer rundt forskningsspørsmålene presentert i kapittel 1
- **Kapittel 8 Veien videre** – Avsluttende ord og veien videre

## 2 Teori

### 2.1 Innledende om grønne tak

Grønne tak er i nordisk sammenheng ansett å være et tiltak for lokal overvannsdiskonering (LOD). Tidligere ble de i form av torvtak betraktet som aktuelle mye av hensyn til estetikk, rekreasjon og eldre byggeskikk. I takt med hyppigere og mer intense nedbørshendelser har hovedformålet med etablering av grønne tak til dels endret seg. Andre positive effekter med grønne tak er at de kan være CO<sub>2</sub>- og støvbindende (Rowe, 2011), legge til rette for biologisk mangfold (Nagase & Dunnett, 2013), forbedre akustikken for området rundt (Galbrun & Scerri, 2017) og fungere beskyttende for takmembranen (Björk, 2004).

Avgjørelsen om en bygning skal ha et grønt tak for overvannshåndtering er enten et resultat av offentlig regulering eller et ønske fra byggherre. (Andenæs, 2021) I tillegg vil bæreevnen til konstruksjonen ofte være en påvirkende faktor ved etablering av grønt tak på eksisterende bygning. (Skjeldrum, 2016)

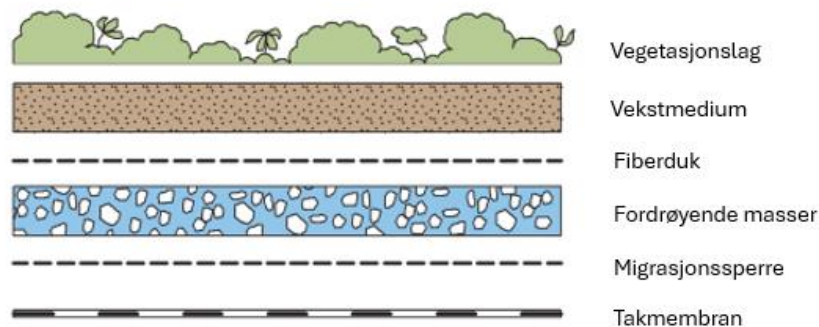
#### 2.1.1 Ulike typer grønne tak

Grønne tak kan deles inn i to kategorier avhengig av oppbygning og bruk; ekstensive, og intensive tak. Det finnes også en kombinasjon av disse to kategoriene som kalles semi-intensive tak.

Oppbygningen til et grønt tak består av et vegetasjonslag, et vekstmedium og et fordrøyende sjikt, hvor ekstensive tak har den laveste byggehøyden og intensive tak den største. Ekstensive tak har lavere tyngde og tillater hovedsakelig kun ferdsel for skjøtsel og vedlikehold. Semi-intensive og intensive grønne tak har større tyngde og tillater opphold og bruk i form av takhager med større trær, takterrasser og tilsvarende. Idet et fordrøyende lag i form av porøse masser eller plast-gitter/kopper inkluderes, kan taket klassifiseres som et blå-grønt tak.

## 2.1.2 Prinsipiell oppbygning av et grønt tak

Den prinsipielle oppbygningen til et grønt tak er illustrert i Figur 1. Over bærende konstruksjon og eventuell isolasjon er det etablert en vanntett takmembran. For å unngå at røtter fra plantene perforerer takmembranen er det lagt en migreringssperre. Over migreringssperren ligger et fordrøyende lag i form av porøse masser eller opplegg for vannlagring i ulike bokser. De porøse massene skal være grove materialer uten finstoff, som skal sikre oksygen og vann til vekstmediene. Dette kan eksempelvis være naturstein, LECA-kuler, glasopor eller lavastein. Videre er det anlagt et separerende lag i form av en fiberduk, som skal hindre finere masser i å blande seg med de porøse massene og hindre drenering. Øverst består konstruksjonen av det grønne taket med et vekstmedium som plantene trives i og et vegetasjonslag (Noreng et al., 2012; Thodesen et al., 2018).



*Figur 1 Prinsipiell oppbygning av et grønt tak (Thodesen et al., 2018)*

## 2.1.3 Grønne ekstensive tak

Ekstensivt grønt tak defineres av NS-EN 3840:2015 Grønne tak som grønt tak med vekstmedium under 100mm tykt (Standard Norge, 2015). De anlegges som oftest på kompakte, flate tak med takvinkel under 6°. I tørr tilstand har taket (vekstmedium og vegetasjonslag) en egenvekt på 35-50 kg/m<sup>2</sup> og i vannmettet tilstand opptil 130 kg/m<sup>2</sup>, avhengig av typen planter vegetasjonslaget består av (Braskerud, 2016). Dersom vegetasjonslaget utelukkende består av sedum, omtales taket som et sedumtak.

## 2.1.4 Sedumtak

Sedum er en samlebetegnelse på planter fra bergknappfamilien. Dette er en sukkulent planteart, i betydning at den er vannlagrende. Den samler vann i stengel, blad og rot, og åpner kun spalteåpningene sine om natten, når fordampningen til omgivelsene er lav. Dette gjør sedum robust, den overlever i tørre forhold på tynt vekstmedium, og krever lite vedlikehold på mellom 1-3 ganger i løpet av ett år (Aarnes, 2018).

## 2.1.5 Overvannsdiskonerende funksjoner

Med et overvannsdiskonerende formål har grønne tak tre funksjoner; å forsinke avrenning, å redusere avrenningsintensitet fra takflaten og å redusere mengden avrenning til gateplan. (Noreng et al., 2012)

Takets evne til å forsinke avrenning avhenger av oppbygningen til konstruksjonen og grad av detensjon. Detensjon beskriver den ekstra tiden det tar for vannet å renne gjennom et ekstra lag i takkonstruksjonen. Forsinkelsen regnes som den tiden det tar fra nedbørshendelsen inntreffer, til avrenning fra taket starter.

Avrenningsintensiteten avhenger av flere faktorer; vegetasjonslagets kapasitet til å lagre vann, de fordrøyende lagenes detensjonsevne og kapasitet til å lagre vann, og initiell vannmetningsgrad er noen.

Retensjon, reduksjon av mengden avrenning, vil avhenge av vegetasjonslagets transpirasjonsegenskaper og det grønne takets evapotranspirasjonsegenskaper. Transpirasjon beskriver fordamping av fuktighet fra plantene til omgivelsene. Evapotranspirasjon beskriver fordamping av fuktighet til omgivelsene fra hele overflaten, inkludert plantene.

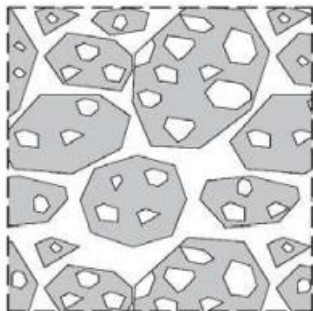
Både transpirasjon og evapotranspirasjon er sterkt avhengig av klimaindekser. En studie beskrevet i SINTEF sin Klima 2050-rapport (Sivertsen et al., 2023) viser klar korrelasjon mellom grad av retensjon og mengde snø, temperatur, antall nedbørsdager, mengde nedbør, vekstsesong og tørrperiode. Grønne tak i områder med mindre snø og nedbør, høyere temperaturer, færre nedbørsdager, lengre vekstsesong og kortere tørkeperioder vil ha mer transpirasjon og evapotranspirasjon, og dermed mer retensjon.



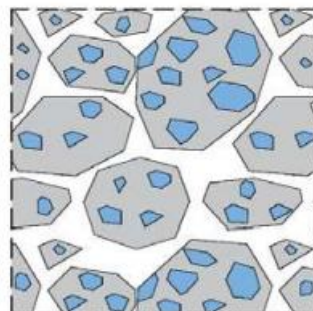
Studier av grønne ekstensive tak over vinteren viser at retensjonen til grønne tak reduseres dersom det oppstår frost i ett eller flere av sjiktene. Dette kommer av at infiltrasjonsevnen til materialene reduseres, slik at mindre fuktighet kan lagres i porevolumet. Dersom grønne tak går gjennom flere fryse- og tinesykluser i løpet av vinteren, vil dette også kunne gi en redusert infiltrasjonsevne da det oppstår et islag oppå jorden (Noreng et al., 2012).

### 2.1.6 Vannmetning i grønne tak

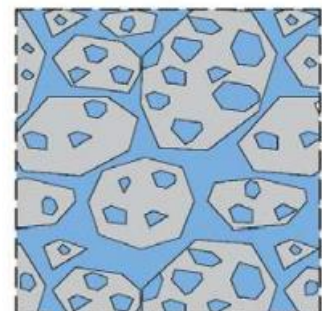
Vannlagringskapasiteten til et materiale, eller i en sammensetning av ulike materialer, vil avhenge av hvor mye vann som kan lagres i materialene ved full vannmetning. Figur 4 illustrerer et materiale med full vannmetning, hvor både porene internt i materialet og alt tilgjengelig volum rundt er fylt med vann. Figur 2 og Figur 3 viser materialet i henholdsvis tørr og stabil fukttilstand.



**Figur 2** Tørr tilstand  $\rho_{tørr}$  (Jensen et al., 2024)



**Figur 3** Stabil fukttilstand  $\rho_s$ , porer internt i massen fylt med vann (Jensen et al., 2024)



**Figur 4** Full vannmettet tilstand  $\rho_{wk}$  (magasinering) (Jensen et al., 2024)

Vannlagringskapasiteten tilsvarer differansen mellom massetettheten til materialet i tørr og fullstendig vannmettet tilstand, i forhold til massetettheten til vann:

**Formel 1** Maksimal vannlagringskapasitet

$$WK_{\max} = \frac{\rho_{\text{wk}} - \rho_{\text{tørr}}}{\rho_{\text{vann}}} \times 100\%$$

$WK_{\max}$  = vannlagringskapasitet til materialet

$\rho_{\text{wk}}$  = massetettheten til materialet i full vannmetning

$\rho_{\text{tørr}}$  = massetetthet til materialet i tørr tilstand

$\rho_{\text{vann}}$  = massetetthet til vann på 1000 kg/m<sup>3</sup>

Massetettheten  $\rho$  til et materiale tilsvarer forholdet mellom prøvens masse og volum, uttrykt i formel 2:

**Formel 2** Massetetthet

$$\rho_i = \frac{m_i}{V_i}$$

$\rho_i$  = massetetthet til materialprøve  $i$

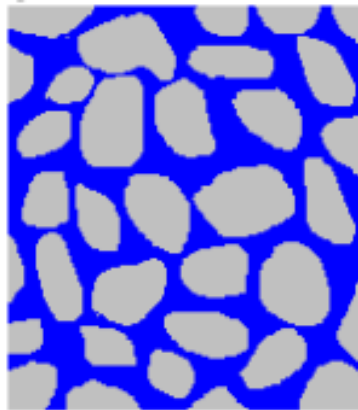
$m_i$  = masse til materialprøve  $i$

$V_i$  = volum til materialprøve  $i$

Ved starten av en nedbørshendelse vil nedbør først treffe vegetasjonslaget og infiltreres videre ned i vekstmediet. Vannet vil lagres her frem til metningspunktet for vekstmediet inntreffer. For et grønt tak kan takets metningspunkt defineres som den mengden vann taket kan holde på, etter at fritt vann er drenert ut. Fritt vann vil dreneres grunnet gravitasjonskrefter. Resterende

vann holdes igjen ved hjelp av kapillære krefter, overflatespenning mellom vannmolekylene og poreoverflaten i materialet. Forskjellen mellom vekstmediets metningspunkt og det initelle vanninnholdet ved nedbørshendelsens start, kalles primærkapasiteten til det grønne taket.

Ved intense nedbørshendelser hvor det grønne taket ikke har kapasitet til å drenere vekk like store vannmengder tilsvarende nedbørsintensiteten, vil vekstmediet fylles med fritt vann. Denne tilstanden omtales som «gjennomtrukket» (Figur 5). Mengden fritt vann kalles sekundærkapasiteten til det grønne taket og opptrer midlertidig frem til nedbøren avtar og det frie vannet dreneres vekk (Noreng et al., 2012).



**Figur 5** Gjennomtrukket tilstand, taket holder på en større mengde vann enn metningspunktet tilsier (Noreng et al., 2012)

## 2.2 Konstruksjonssikkerhet og prosjektering av ekstensive grønne tak

### 2.2.1 Innledende om dimensjoneringsregler for konstruksjoner

For å sikre bærende konstruksjoners funksjoner under normalt bruk og redusere risikoen for sammenbrudd med potensielt alvorlige, livstruende konsekvenser, skal de dimensjoneres etter bestemte prosedyrer og regler. Dimensjoneringsreglene tar utgangspunkt i lastene konstruksjonen blir utsatt for over sin tiltenkte levetid og materialenes egenskaper i form av fasthet og holdbarhet.

*NS-EN 1990:2002 Eurokode 0 – Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner og NS-EN 1991:2002 Eurokode 1* inkludert nasjonale tillegg legges til grunn ved prosjektering av bærekonstruksjoner i dag.

### 2.2.2 Standarder for dimensjonering av grønne tak

Ved prosjektering av grønne ekstensive tak i Norge, legges *NS 3840:2015 Grønne tak* til grunn. Den omfatter planlegging, prosjektering, utførelse, skjøtsel og drift av taktypen, og omtales som en tverrfaglig standard. Under kapittel 4 *Planlegging og prosjektering*, og delkapittel 4.3.3 *Laster, egenvekt, måling og deklarerer* under «Generelt» står følgende om vekt av takmaterialer over bærekonstruksjon:

*«Vekt av alle takmaterialer over bærekonstruksjon skal regnes som egenvekt. Eventuelle vannmagasinerende sjikt eller vekstmedium skal beregnes med full vannmetning.*

*Leverandøren av eventuelle sjikt har ansvaret for å dokumentere materialenes egenvekter i vannmettet tilstand.»* (Standard Norge, 2015)

Den tyske organisasjonen *Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau*, forkortet FLL og oversatt til «*Research Society for Landscape Development and Landscape Construction*», har utviklet en av verdens mest brukte standarder for grønne tak. Under kapittel 7 og delkapittel 7.6 *Load assumptions* står følgende om vekt av takmaterialer over bærekonstruksjon:

«The structure with all its layers at maximum water capacity, including the areal load from vegetation is to be classified as part of the permanent effect. The load from the water stored under the ponding process is also to be considered. (FLL et al., 2018)»

I april 2024 ble det publisert en veileder av SINTEF på bestilling fra Oslo kommune. Veilederen tar for seg kartlegging og beregning av bæreevne for eksisterende takkonstruksjon med ny grønn takoppbygging. Den legger til grunn NS3840 og forutsetter også dimensjonerende lastøkningen i full vannmettet tilstand for taket, men påpeker at denne avviker konservativt fra reelle laster (Jensen et al., 2024).

### 2.2.3 Konstruksjonssikkerhet ved partialfaktormetoden

Ved prosjektering etter norsk standard i dag, anvendes partialfaktormetoden for å finne dimensjonerende lastsituasjon. Partialfaktormetoden benytter sikkerhetsfaktorer (partialfaktorer) for å ta hensyn til ugunstige avvik mellom lastens relevante representative verdi og faktisk last. Det samme gjelder for materialenes kapasitet. Sikkerhetsfaktorene er uttrykt ved  $\gamma$  og multipliseres med den tilhørende relevante representative verdi for lasten (Standard Norge, 2016).

**Formel 3** Dimensjonerende last ved partialfaktormetoden

$$F_d = \gamma_f \times F_{rep}$$

hvor

$$F_{rep} = \psi \times F_k$$

$F_d$  = dimensjonerende last

$\gamma_f$  = partialfaktor

$F_{rep}$  = relevant representativ last

$\psi = 1,0$  eller  $\psi_0, \psi_1$  eller  $\psi_2$  avhengig av type last og omfang

$F_k = \text{karakteristisk last}$

Psi,  $\psi$ , er en reduksjonsfaktor som anvendes med variable laster og som tar hensyn til sannsynligheten for at den variable lasten oppstår samtidig med de andre variable lastene.

Et viktig grunnlag partialfaktormetoden bygger på er konseptet om karakteristiske laster. Dette er verdier som representerer lastene på konstruksjonen, og er basert på klare statistiske definisjoner.

#### 2.2.4 Statistisk definisjon for bestemmelse av karakteristiske laster

Laster kan, ved verifikasjon av global likevekt, deles opp i to kategorier, med følgende statistiske definisjoner ved bestemmelse av karakteristisk verdi:

- **Permanente laster (G)** - Lasten ventes å virke gjennom en gitt referanseperiode der variasjonen er ubetydelig over tid eller der endringen alltid beveger seg monotont, i samme retning, frem til den når en grenseverdi.  
*Definert som 50%-fraktilen eller middelvei av lasten.*
- **Variable laster (Q)** - En last der tidsvariasjonen verken er ubetydelig eller monoton.  
*Definert som 98%-fraktilen av fordelingen av årlige maksimalverdier for Q.*

For tidsavhengige, variable laster som snø og vind, representere den karakteristiske verdien en last som overskrides med en sannsynlighet på 2% hvert år eller med returperiode på 50 år i snitt(Standard Norge, 2019).

#### 2.2.5 Partialfaktorer og kombinasjonsverdier

Fra tabell NA.A1.2(A) i NS-EN 1990:2002 NA:2016 hentes tilhørende partialfaktorer ved verifikasjon av vedvarende og forbigående dimensjonerende situasjoner i global likevekt (EQU):

$\gamma_{Gj,sup,1} = 1,20$  for ugunstige permanente laster i kombinasjon 1

$\gamma_{Gj,sup,2} = 1,35$  for ugunstige permanente laster i kombinasjon 2

$\gamma_{Q,1} = 1,50$  for dominerende variabel last

$\gamma_{Q,i} = 1,50$  for øvrige variable laster

Fra tabell NA.A1.1 i NS-EN 1990:2002 NA:2016 hentes  $\psi_0$ -faktorer, kombinasjonsverdier for variable snø- og vindlaster:

$\psi_{0,snølast} = 0,7$

$\psi_{0,vindlast} = 0,6$

## 2.2.6 Lastkombinasjoner

De dimensjonerende verdiene for lastvirkning på en konstruksjon bestemmes ved å kombinere de lastverdiene som forventes å kunne opptre samtidig. Ved verifikasjon av en bærende takkonstruksjon i global likevekt (EQU), kan lastvirkningene generelt fremstilles på følgende form i henhold til ligning (6.9b) i NS-EN 1990:2002:

**Formel 4** Generell formel for dimensjonerende lastvirkning

$$E_d = E\{\gamma_{G,j}G_{k,j}; \gamma_P P; \gamma_{Q,1}Q_{k,1}; \gamma_{Q,i}\psi_{0,i}Q_{k,i}\} \quad j \geq 1; i > 1$$

$E = \text{lastvirkning}$

$\gamma_{G,j} = \text{partialfaktor for permanent påvirkning } j$

$G_{k,j} = \text{karakteristisk verdi for en permanent påvirkning } j$

$\gamma_P = \text{partialfaktor for forspenningslaster}$

$P = \text{relevant representativ last for en forspenningslast}$

$\gamma_{Q,1}$  = partialfaktor for dominerende variabel påvirkning

$Q_{k,1}$  = karakteristisk verdi for den dominerende variable påvirkningen

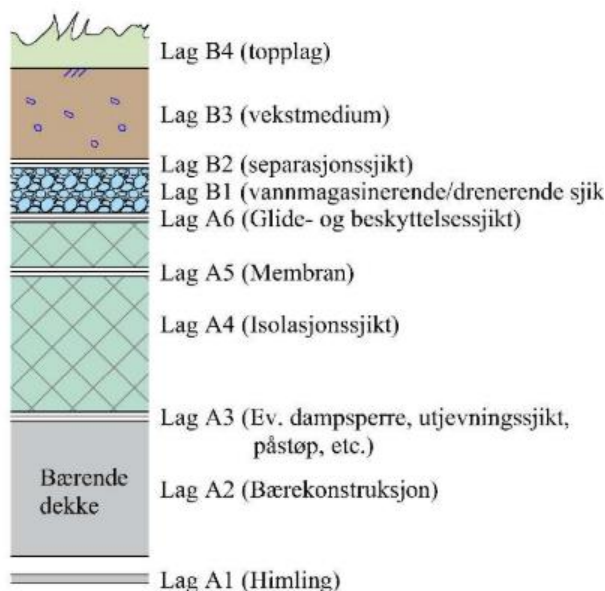
$\gamma_{Q,i}$  = partialfaktor for variabel påvirkning  $i$

$\psi_{0,i}$  = faktor for kombinasjonsverdi for den variable påvirkningen  $i$

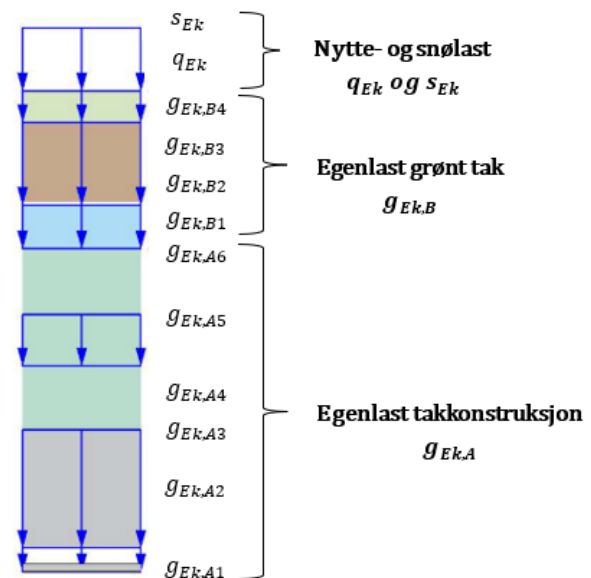
$Q_{k,i}$  = karakteristisk verdi for den ikke-dominerende variable påvirkningen  $i$

## 2.2.7 Prosjektering av grønne ekstensive tak etter dagens standard

Ved prosjektering av grønne tak skal takkonstruksjonen dimensjoneres for lastene illustrert i Figur 7; egenlast fra takkonstruksjonen, egenlast fra det grønne taket og steds- og bruksspesifikke nytte- og snølaster for bygningen. Egenlasten for det grønne taket skal beregnes med utgangspunkt i full vannmetning for alle B-lagene, som er illustrert i Figur 6. Både egenlasten for takkonstruksjonen og det grønne taket beregnes som en permanent last. Nytte- og snølastene beregnes som en variabel last (Jensen et al., 2024; Standard Norge, 2015).



**Figur 6** Oppbygning av en takkonstruksjon med grønt tak (Jensen et al, 2024)



**Figur 7** Kategorisering av de forskjellige lastene takkonstruksjonen utsettes for (Jensen et al, 2024)



Når dimensjonerende lastsituasjon for takkonstruksjonen skal beregnes, velges den største variable lasten av karakteristisk nyttelast og karakteristisk snølast som variabel last  $q_{EK,1}$ , i henhold til formel 5:

**Formel 5** Valg av karakteristisk dominerende variabel last

$$q_{EK,1} = \text{maks}\{q_{EK} \text{ eller } s_{EK}\}$$

Videre vil den mest ugunstige lasten av  $p_{Ed,1}$  og  $p_{Ed,2}$  være dimensjonerende for takkonstruksjonen. Lastkombinasjonene er uttrykt i formel 6 og formel 7 nedenfor:

**Formel 6** Lastsituasjon ved kombinasjon 1

$$p_{Ed,1} = [\gamma_g \times g_{EK,A} + \gamma_g \times g_{EK,B}] + [\gamma_q \times \psi_{0,1} \times q_{EK,1}]$$

**Formel 7** Lastsituasjon ved kombinasjon 2

$$p_{Ed,2} = [\xi \times \gamma_g \times g_{EK,A} + \xi \times \gamma_g \times g_{EK,B}] + [\gamma_q \times q_{EK,1}]$$

$p_{Ed,1}$  = dimensjonerende last ved kombinasjon 1

$p_{Ed,2}$  = dimensjonerende last ved kombinasjon 2

$\gamma_g$  = partialfaktor for permanent last ved kombinasjon 1

$\xi \times \gamma_g$  = redusert partialfaktor for permanent last ved kombinasjon 2

$g_{EK,A}$  = egenlast fra takkonstruksjon iht Figur 7

$g_{EK,B}$  = egenlast fra grønt tak iht Figur 7

$\psi_{0,1}$  = kombinasjonsverdi for største variable last ved kombinasjon 1

$\gamma_q$  = partialfaktor for variabel last ved begge kombinasjoner

## 2.2.8 Prosjektering av grønne tak på eksisterende konstruksjoner bygget etter eldre regelverk

Når det skal etableres en ny grønn takoppbygning på eksisterende konstruksjoner i dag, utløses også krav om tilfredsstillende bæreevne for dagens karakteristiske laster. Avhengig av byggeåret og hvilke byggeregler konstruksjonen ble bygget etter, innebærer dette ofte en økt karakteristisk snølast og nyttelast som takkonstruksjonen må tåle. Tabell 1 lister opp utviklingen av karakteristisk snølast i Oslo for perioden 1928 og frem til i dag (Jensen et al., 2024).

**Tabell 1** Utvikling av karakteristisk snølast på mark for Oslo i perioden 1928 og frem til i dag

| Byggeår, gjeldende snølaststandard og karakteristisk snølast, $s_k$ <sup>1)</sup> , på mark |                      |                     |                      |                         |                      |                      |   |                      |
|---|----------------------|---------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|---|----------------------|
| 2003 -  |                      | 1990 - 2002         |                      | 1979 - 1990             | 1969 - 1979          | 1949 - 1969          | 1928 - 1949                                 | Før 1928             |
| NS-EN 1991-1-3  |                      | NS 3479 (utg. 3)    |                      | NS 3479 (utg. 2 i 1981) | NS 3052              | Byggeforskrift       | Lokale reguleringer eller forskrift av 1928 | -                    |
| $H_g$ <sup>2)</sup>   | $s_k$                | $H_g$ <sup>2)</sup> | $s_k$                | $s_k$                   | $s_k$                | $s_k$                | $s_k$                                       | $s_k$                |
| [moh.]  | [kN/m <sup>2</sup> ] | [moh.]              | [kN/m <sup>2</sup> ] | [kN/m <sup>2</sup> ]    | [kN/m <sup>2</sup> ] | [kN/m <sup>2</sup> ] | [kN/m <sup>2</sup> ]                        | [kN/m <sup>2</sup> ] |
| 0 - 150   | 3,5                  | 0-75                | 1,5                  |                         |                      |                      |   |                      |
| 151 - 250   | 4,5                  | 75-200              | 2,5                  | 2,5                     | 2,0 <sup>3)</sup>    | 1,5                  | 1,0   | -                    |
| 251 - 350   | 5,5                  | > 200               | 3,5                  |                         |                      |                      |   |                      |
| > 350   | 6,5                  |                     |                      |                         |                      |                      |   |                      |

<sup>1)</sup>  $s_k$  = Karakteristisk snølast [kN/m<sup>2</sup>] på mark iht. gjeldende snølaststandard ved angitt årstall

<sup>2)</sup>  $H_g$  = Høydegrense [moh.] for oppgitte karakteristiske snølaster på mark

<sup>3)</sup> Byggeforskriften i 1969 angir generell snølast på mark lik 150 kg/m<sup>2</sup> som en grunnverdi. Standarden NS 3052 angir at det for enkelte kommuner er gitt spesielle grunnverdier. Dette er tilfellet for eksempel for Oslo, der det er oppgitt 200 kg/m<sup>2</sup>.

Flere av de eldste murgårdene i Oslo, bygget mellom 1840-1910, tilfredsstiller eksempelvis ikke dagens krav til snølast på tak. (Munden, 2022)

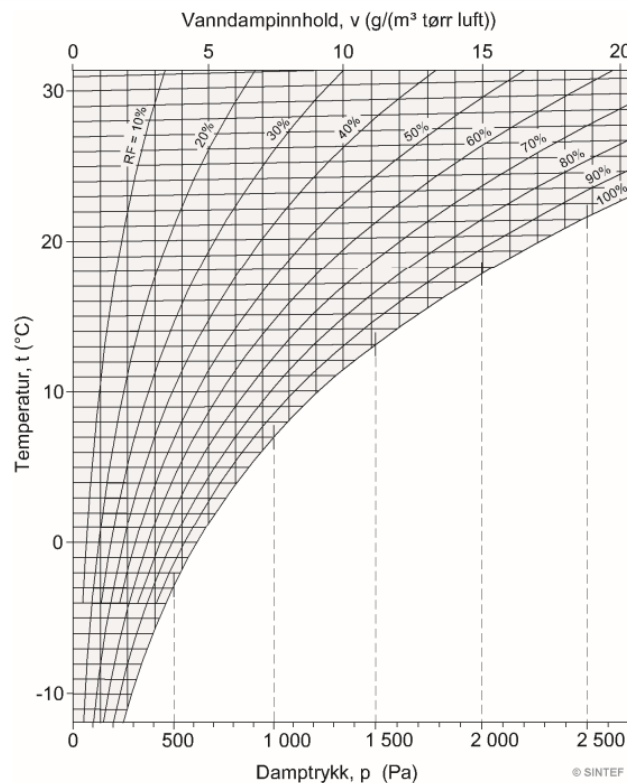
Karakteristisk nyttelast på tak i kategori I/A1 (Forsamlingsareal på tak – Gulv) har siden 1994 økt fra 1,0 kN/m<sup>2</sup> til 2,0 kN/m<sup>2</sup> i dag.

I tillegg skal takkonstruksjonen tåle last fra det grønne takets egenvekt med full vannmetning, beregnet som en permanent last. (Jensen et al., 2024)

## 2.4 Trevirkets hygroskopiske egenskaper

Trevirke har hygroskopiske egenskaper i form av at treverkets fuktighet tilpasser seg den relative luftfuktigheten (RF) og temperaturen til omgivelsene. Trevirke vil til enhver tid forsøke å oppnå en likevektsfuktighet (LVF) med omgivelsene, en prosess som går over lengre tid (Byggforsk, 2018).

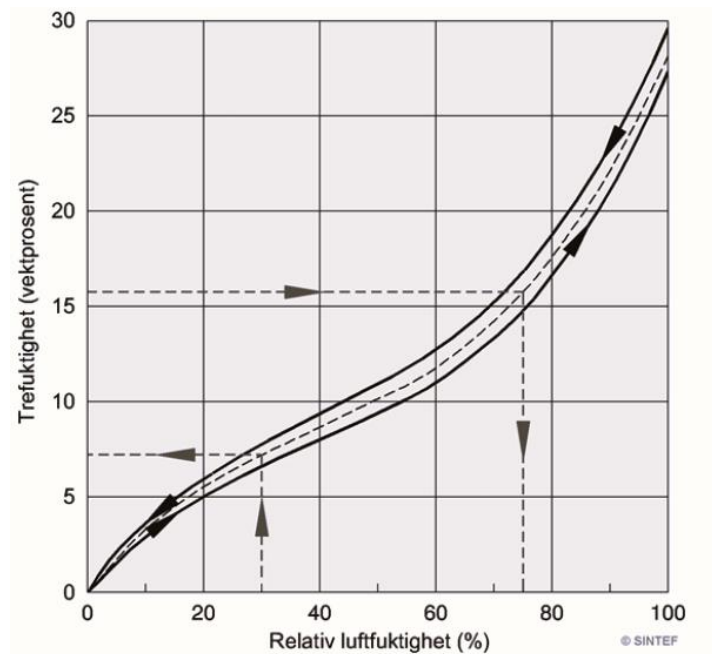
Relativ luftfuktighet (RF) beskriver luftens evne til å holde på fuktighet ved en spesifikk temperatur. Luft evner å holde på mer fuktighet, ved økende temperatur. RF beskriver den prosentvise andelen fuktighet i luften, i forhold til hvor mye fuktighet luften kan holde på ved den aktuelle temperaturen. Figur 8 illustrerer et luftfuktighetsdiagram som viser sammenhengen mellom temperatur, RF, vanndampinnhold og damptrykk. Ved eksempelvis 10°C vil luft kunne holde på maksimalt 9 g/m<sup>3</sup> fuktighet. Da ligger den relative luftfuktigheten på 100%.



**Figur 8** Luftfuktighetsdiagram, beskriver sammenheng mellom vanndampinnhold, temperatur og damptrykk (Byggforsk, 2018)

Den relative luftfuktigheten til uteluften vil som regel være lavest om våren og høyest om høsten og vinteren. Døgnmiddelen varierer mellom 50% og 90% RF.

Sorpsjonskurver kan brukes for å illustrere fuktighetsinnhold i trevirke avhengig av omgivelsenes RF og om trevirket er i en absorpsjons- eller desorpsjonsprosess. Figur 9 viser sorpsjonskurvene for furu med densitet 500 kg/m<sup>3</sup>. Ved en RF på 30% vil fuktigheten ligge på omtrent 7,5%. Ved en RF på 75% vil fuktigheten ligge på omtrent 16%.



**Figur 9** Sorpsjonskurve for furu med densitet 500kg/m<sup>3</sup> (Byggforsk, 2018)

## 2.6 Tyngdetetthet for snø

Snø har ulik tyngdetetthet avhengig av form og størrelse på snøkrystallene. Disse egenskapene vil variere med hvor lenge snøen har ligget, hvor våt den er og generelt lokale og topografiske forhold der snøen har falt. Eurokode 1 definerer gjennomsnittlig tyngdetetthet på snø iht. tabell E.1.

*Tabell 2 Tyngdetetthet for ulike typer snø (Standard Norge, 2019)*

| Snøtype   | Tyngdetetthet<br>[kN/m <sup>3</sup> ] |
|---|---------------------------------------|
| Nysnø   | 1,0                                   |
| Fast snø (flere timer eller dager sin snøfall)      | 2,0                                   |
| Gammel snø (flere uker eller måneder etter snøfall) | 2,5 - 3,5                             |
| Våt snø   | 4,0                                   |

## 3 Forsøksanlegg

### 3.1 Grønne takmoduler ved Planteskolen i Ås

Datasettene som danner grunnlag for resultatene i denne masterstudien er hentet fra tre forsøksstak etablert ved Planteskolen på NMBU i Ås, Akershus. To av takene er konstruert som grønne, ekstensive tak, og den siste modulen er et svart referansetak. De er ikke oppvarmet fra undersiden og skiller seg derfor fra normalsituasjonen hvor grønne tak blir anlagt på oppvarmet konstruksjon.

Forsøksanlegget ble etablert høsten 2018 og er et samarbeid mellom NMBU, Norges Vassdrags- og Energidirektorat (NVE), Bergknapp AS og LECA AS. Etableringsavtalen mellom partene beskriver takmodulene som et «forsøks- og demonstrasjonsanlegg for grønne tak som tiltak for å redusere overvannsflokk som resultat av intensiv nedbør». Per utgangen av 2022 ble forsøksanlegget ansett for å være et av de best instrumenterte, ved siden av Høvringen renseanlegg i Trondheim og Vega Scene i Oslo.

Det er gjennomført målinger ved forsøksstakene på Ås i perioden 2018-2024 med planlagt fortsettelse frem til 2027. Det er skrevet flere masteroppgaver med varierte problemstillinger om forsøksstakene, og i 2023 ble det publisert en 5-års rapport som oppsummerer driftserfaringer og måleresultater (Nilsen et al., 2023).



**Figur 10** Forsøktakene ved NMBU, tak 1 til venstre, tak 2 i midten og tak 3 til høyre (Øyre & Trommald, 2018)

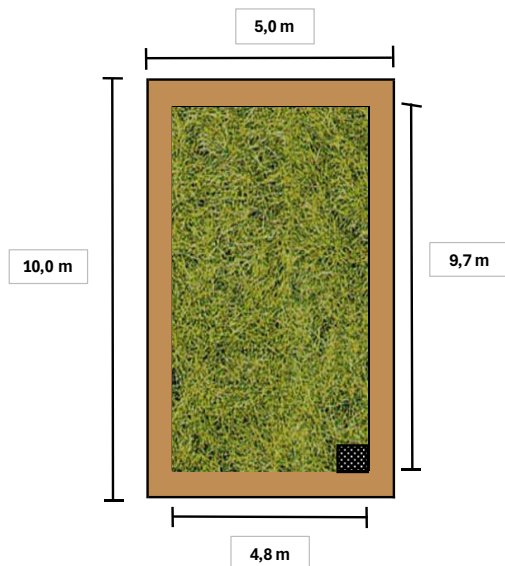


**Figur 11** Sett fra nord ligger tak 1 lengst bort, tak 2 i midten og tak 3 nærmest (Øyre & Trommald, 2018)

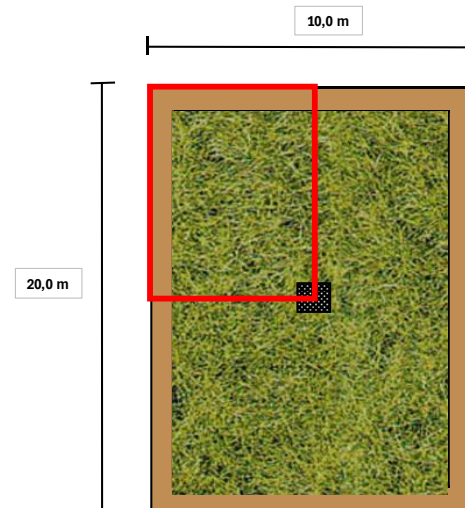


### 3.3 Oppbygning av forsøktakene

Takene har et areal på 50 m<sup>2</sup> etter utvendige mål og 46,6 m<sup>2</sup> etter innvendige takmål (Figur 12)(Bassøe, 2020). De er konstruert som kompakte tak med fall mot sluk til hjørne, og kan gjenspeile et tak tilsvarende 200 m<sup>2</sup> (Figur 13). Takene har en bærekonstruksjon av trykkimpregnert limtre og hvert tak er anlagt på 6 søylefundamenter (Figur 14). Alle tabeller er laget med utgangspunkt en masteroppgave om oppbygningen av takene(Øyre & Trommald, 2018).



**Figur 12** Takenes utvendige og innvendige mål.  
Illustrasjon L.F. Ranum



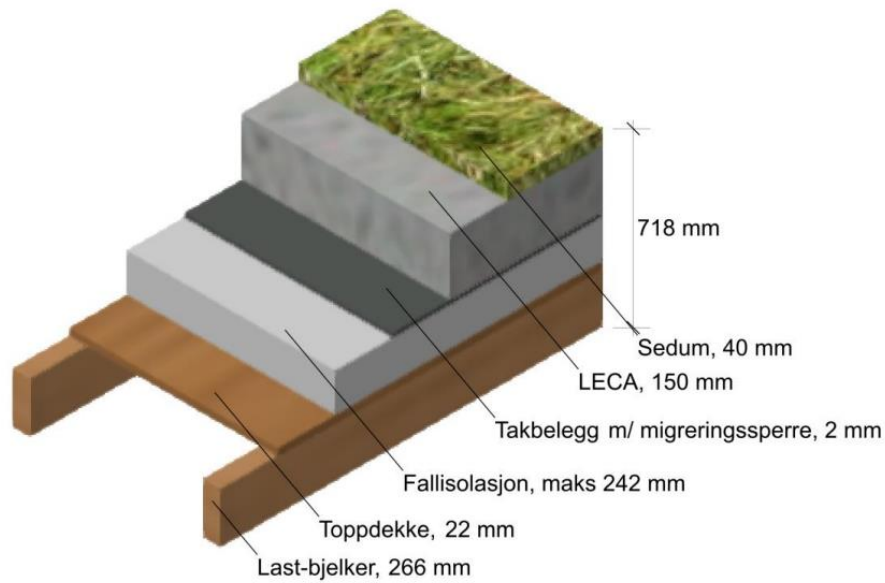
**Figur 13** Forsøktakene som en del av et 200m<sup>2</sup> stort tak. Illustrasjon L.F. Ranum



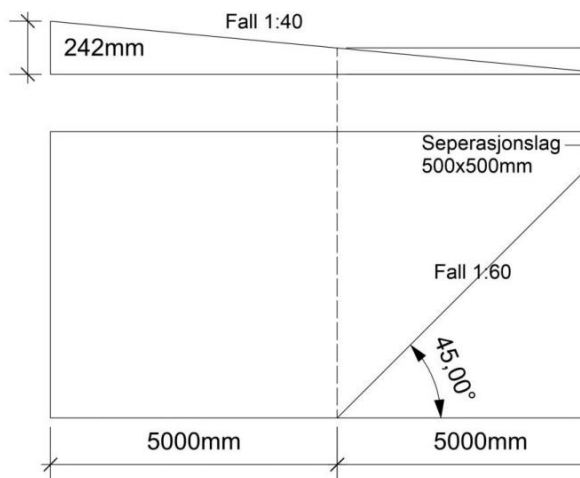
**Figur 14** Takene anlagt på seks søylefundament (Øyre & Trommald, 2018)

De to grønne forsøktakene har oppbygning som illustrert i Figur 15. Det er lagt sponplater som dekke på bærekonstruksjonen. Videre er det lagt fuktbestandig isolasjon med største høyde 242 mm. Den er konstruert med fall på 1:40, tilsvarende 2,5 mm/m, over lengden til taket og 1:60, tilsvarende 1,67mm/m, 45 grader fra hjørnet på sluket og til midten av takets langside. Se Figur 16.

Over fallisolasjonen er det lagt en 2 mm kombinert takmembran og migreringssperre fra PROTAN BP. Til innvendig side av parapet ble det brukt en membran av typen PROTAN BPX. Som magasinerende lag er det lagt 150 mm finknust LECA i graderingsstørrelse 0-6 mm. For å hindre finere masser fra å blande seg med det magasinerende laget er det lagt en filtduk mellom finknust LECA og grønt tak (Figur 17). Øverst er det anlagt 49,5 m<sup>2</sup> med sedummatter som kombinert vegetasjonslag og vekstmedium, med høyde 40 mm.



**Figur 15** Oppbygning av de grønne ekstensive forsøktakene ved NMBU (Øyre & Trommald, 2018)



**Figur 16** Oppbygning av fallisolasjonen på forsøktakene (Øyre & Trommald, 2018)



**Figur 17** Filtduk mellom LECA og sedummatter (Øyre & Trommald, 2018)

Parapetens takmembran er ikke avsluttet 150 mm over ferdig grønt tak for deler av taket, som anbefales i standard og byggforskeren (SINTEF Byggforsk, 2013). Dette begrunnes med at man ikke ønsket at parapetens høyde skulle overstige 2 meter fra terreng, isolasjonens høyde i forhold til parapet lengst fra sluk, og at det ikke er en risikokonstruksjon med tanke på fukt.

(Øyre & Trommald, 2018) Tabell 3 gir en oversikt over materialoppbygning, høyde og vekt til materialene i de grønne takene.

**Tabell 3** Materialenes byggehøyde, vekt i tørr og vannmettet tilstand på de grønne takene

| Materiale              | Høyde [mm] | Funksjon                        | Mengde              | Tørr tilstand [kg/m <sup>2</sup> ] | Vannlagringskapasitet [kg/m <sup>2</sup> ] | Vannmettet tilstand [kg/m <sup>2</sup> ] |
|------------------------|------------|---------------------------------|---------------------|------------------------------------|--|--|
| Sedum                  | 40         | Vegetasjonsdekke og vekstmedium | 49,5 m <sup>2</sup> | 25                                 | 25   | 50                                       |
| LECA 0-6 mm            | 150        | Drenerende sjikt                | 7,96 m <sup>3</sup> | 80                                 | 75   | 155                                      |
| Protan BP og BPX       | 2          | Takmembran                      | 60 m <sup>2</sup>   | 2,1                                | -  | 2,1                                      |
| Vartdal Styropor XPS   | ≥ 242      | Fallisolasjon                   | 7 m <sup>3</sup>    | 2,4                                | -  | 2,4                                      |
| Forestia spongulv      | 22         | Dekke                           | 50 m <sup>2</sup>   | 16,1                               | -  | 16,1                                     |
| Trykkimpregnert limtre | 266        | Bærende element                 | 3,2 m <sup>3</sup>  | 28                                 | -  | 28                                       |
| <b>Totalt</b>          |            |                                 |                     | 153,6                              | 100  | 253,6                                    |

Egenvekten til takkonstruksjonen med grønt tak i tørr tilstand er beregnet til å være 7680 kg. De grønne takelementene har en last på 1,03 kN/m<sup>2</sup> i tørr tilstand og 2,01 N/m<sup>2</sup> i full vannmettet tilstand.

Det svarte referansetaket har oppbygning lik som de to grønne takene opp til og med takmembran.

Tabell 4 gir en oversikt over materialoppbygning, høyde og vekt til materialene til referansetaket.

**Tabell 4** Materialenes byggehøyde og vekt i tørr tilstand på referansetaket

| <b>Materiale</b>              | <b>Høyde<br/>[mm]</b> | <b>Funksjon</b> | <b>Mengde</b>      | <b>Tørr tilstand<br/>[kg/m<sup>2</sup>]</b> |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------|--------------------|---|
| <b>Protan BP og BPX</b>       | 2                     | Takmembran      | 60 m <sup>2</sup>  | 2,1   |
| <b>Vartdal Styropor XPS</b>   | ≥ 242                 | Fallisolasjon   | 7 m <sup>3</sup>   | 2,4   |
| <b>Forestia spongulv</b>      | 22                    | Dekke           | 50 m <sup>2</sup>  | 16,1  |
| <b>Trykkimpregnert limtre</b> | 266                   | Bærende element | 3,2 m <sup>3</sup> | 28  |
| <b>Totalt</b>                 |                       |                 |                    | 48,6  |

Egenvekten til referansetaket i tørr tilstand er beregnet til å være 2430 kg eller 0,48 kN/m<sup>2</sup>.

### 3.4 Fuktlagring i de grønne takelementene

Som listet opp i Tabell 3 vil vannlasten ved et fullstendig vannmettet grønt tak tilsvare til sammen 100 av totalt 205 kg/m<sup>2</sup>. 25 kg/m<sup>2</sup> vil lagres i sedummattene og 75 kg/m<sup>2</sup> i det finknuste LECA-sjiktet. Dette tilsvarer en vannlast på 0,981 kN/m<sup>2</sup> ved vannmetning. Fuktigheten kan lagres enten som vann ved temperaturer over 0°C, eller fryse til i elementene ved minusgrader.

Egenlasten til de grønne takelementene (sedummatter og LECA) i vannmettet tilstand tilsvarer 205 kg/m<sup>2</sup> eller 2,01 kN/m<sup>2</sup> (Tabell 3). Maks egenlast fra vann på 100 kg/m<sup>2</sup> utgjør dermed 48,8% av total egenlast for det grønne taket i vannmettet tilstand.

Det er ikke nevnt noe om fuktlagring i filtduk anlagt mellom LECA og sedummatter i masterstudiene som omhandler oppbygging av forsøksanlegget. I FDV-dokumentasjon fra leverandør oppgis det at vekt på ferdig utlagt *sedumsystem* tilsvarer omtrent 50 kg/m<sup>2</sup> i vannmettet tilstand og det indikerer at fuktlagring i filtduken er inkludert i dette anslaget (Øyre & Trommald, 2018).



## 3.6 Målte parametere og måleverktøy

I denne studien har målinger av følgende parametere blitt anvendt for analyse: vekt, lufttemperatur og nedbør. Vekt og lufttemperatur er målt ved forsøksanlegget. Nedbør for samme periode er hentet ut fra Meteorologisk Institutt sin målestasjon ved Søråsjordet i Ås, omtrent 1 km fra forsøksanleggets posisjon.

### 3.6.1 Vekt

I kontaktpunktet mellom toppen av hvert søylefundament og bærebjelke er det anlagt kompresjonslastceller av typen LPX Compression Mini-disc 5000kg fra PT Ltd (Figur 18 og Figur 19). Lasten på cellene fra takmodulene opptrer som en punktlast og registreres i kilo. Totallasten utgjør summen av vekten fra seks lastceller per takmodul (Figur 14). Tidsintervall for registrering er hvert 10. minutt.

For å redusere sannsynlighet for deformasjon i betongen fra veiecellens punktlast, som videre kan påvirke måling, er det er støpt inn 120 mm lange og minimum 12 mm høye flattjern i overflaten av søylene. For å unngå lignende problem mellom veiecelle og bærebjelken er det montert vinkeljern med 8 mm tykkelse og lengde på mellom 300-500 mm på bærebjelken.



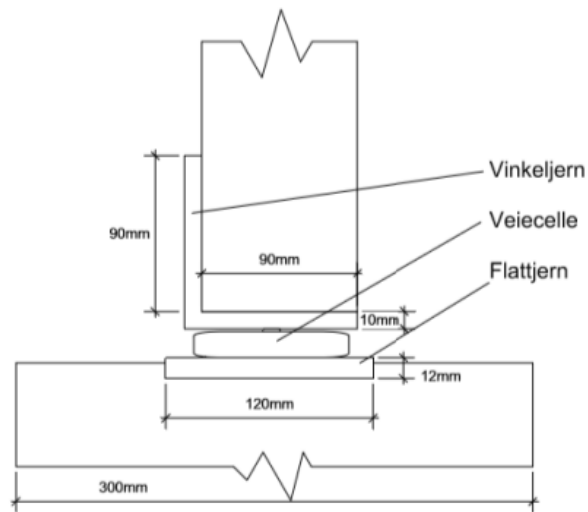


**Figur 18** Veiecelle av typen «LPX Compression Mini-disc 5000kg» fra PT Ltd (Øyre & Trommald, 2018)



**Figur 19** Veiecelle anlagt på søylefundament med takkonstruksjon

(Øyre & Trommald, 2018)



**Figur 20** Tegning med mål av vinkeljern og flattjern montert på veiecellen (Øyre & Trommald, 2018)

### 3.6.2 Lufttemperatur

En kombinert temperatur- og fuktighetsmåler av typen «Campell CS-215» er etablert i to meter avstand fra tak 2 på nordøstlig side. Temperaturmåleren har et driftsområde på mellom -40 til 70°C, med en nøyaktighet på  $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$  ved 25°C. Temperaturen registreres hvert 10.minutt. Det er også montert instrumenter for måling av overflatetemperatur i de grønne takene, mellom henholdsvis LECA og membran, og LECA og sedum. Disse er ikke anvendt i denne analysen da verdier for lufttemperatur er vurdert som tilstrekkelig.

### 3.6.3 Nedbør

Det er etablert en nedbørmåler av typen «Pluvio<sup>2</sup>» ved forsøkastakene. Denne måleren indikerer til enkelte tider urealistisk høye og negativt akkumulerte nedbørsverdier. Da behovet for nedbørdata kun begrenser seg til døgnakkumulert nedbør i denne studien, er det istedenfor benyttet verdier fra Meteorologisk Institutt sin målestasjon ved Søråsjordet i Ås.

### 3.7 NVE Sildre

Registrerte data fra førsøkstakene overføres til NVE Sildre, Norges Vassdrags og Energidirektorats nettside for presentasjon av hydrologiske data fra utvalgte lokasjoner i Norge. Tabell 5 gir en oversikt over måledata med tilhørende serienummer og over hvilken tidsperiode de er hentet ut fra.

*Tabell 5 Måleparametrene med tilhørende ID-nummer, målepunkt, enhet, frekvens og periode*

| <b>Parameter</b>      | <b>ID NVE Sildre</b>  | <b>Målepunkt</b> | <b>Enhet</b> | <b>Frekvens</b> | <b>Periode</b>          |
|-----------------------|-----------------------|------------------|--------------|-----------------|-------------------------|
| <b>Vekt</b>           | 5.10.0.4050.21        | Tak 1            | kg           | 10 minutter     | 10.07.2018 - 15.04.2024 |
|                       | 5.10.0.4050.22        | Tak 2            |              |                 | 11.07.2018 - 15.04.2024 |
|                       | 5.10.0.4050.23        | Tak 3            |              |                 | 30.08.2018 - 15.04.2024 |
| <b>Lufttemperatur</b> | 5.10.0.17.1           | Værstasjon       | °C           | 10 minutter     | 10.07.2018 - 15.04.2024 |
| <b>Nedbør</b>         | SN17850 - seklima.met | Værstasjon       | mm           | Døgn            | 10.07.2018 - 15.04.2024 |

### 3.8 Spesielle hendelser

Forsøktakene har siden etablering i 2018 vært gjenstand for forsøk som kan ha påvirket relevante målinger for denne studien. I tillegg er det erfart diverse forhold som kan ha en innvirkning på måledataen. Tabell 6 gir en oversikt over hendelser og forhold som kan ha hatt unaturlig innvirkning på måleresultatene. Oversikten er laget med utgangspunkt i tidligere masteroppgaver om taket og erfaringsrapporten om forsøksanlegget for perioden 2018-2022(Nilsen et al., 2023).

*Tabell 6 Spesielle hendelser og erfaringer som kan innvirke på registrert måledata*

| Hendelse/driftserfaring   | Tidsrom          | Kommentar  |
|---|------------------|--|
| Tre fyllingsforsøk på tak 3   | 29.09-09.11.2019 | Etablert vannspeil på tak 3  |
| Sedumvegetasjon fortrent av mose  | Utgangen av 2022 | Forventes ikke å ha påvirket takets hydrologiske egenskaper i vesentlig grad |
| Sammenføyninger av hjørnene på takene har begynt å gå opp   | 2020             | Utbedret av Bergknapp  |
| Fukt i treverk på undersiden av slukene   | -                | Usikkert om det skylles lekkasje fra tak                                     |
| Løv på referansetakket må fjernes manuelt   | -                | Dette er mest relevant over høsten, mindre aktuelt over vintersesongen       |
| Perioder med feil på enkelte veieceller grunnet dårlig kontakt til skrutilkobling på digitalt interface | -                | Kan tenkes at har påvirket vektregistrering på kort og lang sikt             |
| Uforklart temperaturpåvirkning på veiecellene   | -                | Kan tenkes at har påvirket vektregistrering på kort og lang sikt             |



## 3.9 Klima

### 3.9.1 Klimadata for Ås

Ås har ifølge Köppens klimaklassifisering i et varmtemperert klima, et C-klima. Vintrene karakteriseres som relativt milde med laveste middeltemperatur for kaldeste måned på -2,9°C. Somrene karakteriseres som relativt varme, med høyeste middeltemperatur for varmeste måned på 16,8°C. Klimanormalene er beregnet av MET, basert på klimadata fra perioden 1991-2020. Årsmiddeltemperaturen ligger på 6,2°C (Bjørnsen, 2021).

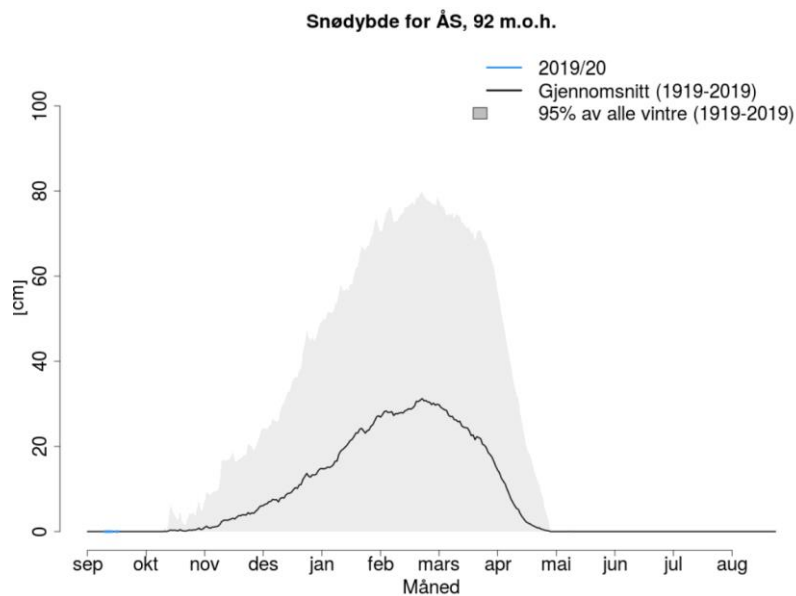
Årsmiddelnedbøren er for samme periode beregnet til 891,9 mm. Tabell 7 gir en oversikt over månedsnormaler for nedbør og temperatur i Ås målt i perioden 1991-2020.

*Tabell 7 Månedsnormaler for nedbør og temperatur i Ås 1991-2020*

| Måned | Middelnedbør [mm] | Middeltemperatur [°C] |
|-------|-------------------|-----------------------|
|       | 1991 - 2020       | 1991 - 2020           |
| Jan   | 65,5              | -2,9                  |
| Feb   | 49,8              | -2,5                  |
| Mar   | 44,7              | 0,6                   |
| Apr   | 49,6              | 5,5                   |
| Mai   | 62,1              | 10,7                  |
| Jun   | 76,9              | 14,5                  |
| Jul   | 82,1              | 16,8                  |
| Aug   | 96,3              | 15,7                  |
| Sep   | 89,8              | 11,5                  |
| Okt   | 104,5             | 6,1                   |
| Nov   | 99,1              | 1,8                   |
| Des   | 71,5              | -1,9                  |

### 3.9.2 Snødybdeobservasjoner og karakteristisk snølast

Ved Søråsjordet i Ås er det, med unntak av en periode mellom 1989 og 2014, målt snødybde siden år 1919. Figur 21 indikerer en gjennomsnittlig snødybde for vintrene målt mellom 1919 og 2019 på omtrent 30 cm. Videre angir den et 95%-konfidensintervall for snødybde opptil 80 cm. Maksimal snødybde opptrer som regel i siste halvdel av februar.



Figur 21 Målt snødybde i Ås 1919 - 2019 (Cryo.met, 2024)

For bygningskonstruksjoner i Ås er den karakteristiske snølasten satt til 3,5 kN/m<sup>2</sup>, etter gjeldende byggestandard. (Standard Norge, 2019)

### 3.9.3 Forventet klimaendring

I rapporten «Klima i Norge 2100» har Meteorologisk Institutt på bestilling fra Miljødirektoratet estimert medianverdier for forventede klimaendringer i Norge frem mot 2100. Beregningene er gjort med utgangspunkt i økende klimagassutslipp og med klimanormaler målt i perioden 1971-2000 som referansepunkter. (Hanssen-Bauer et al., 2016)

Det er forventet en gjennomsnittlig økning på 4,5°C av årstemperaturene, med et spenn på 3,3°C til 6,6°C avhengig av lokasjon. Det er observert en større økning i minimumstemperaturene heller enn middeltemperaturene, og en større økning om våren enn om vinteren.

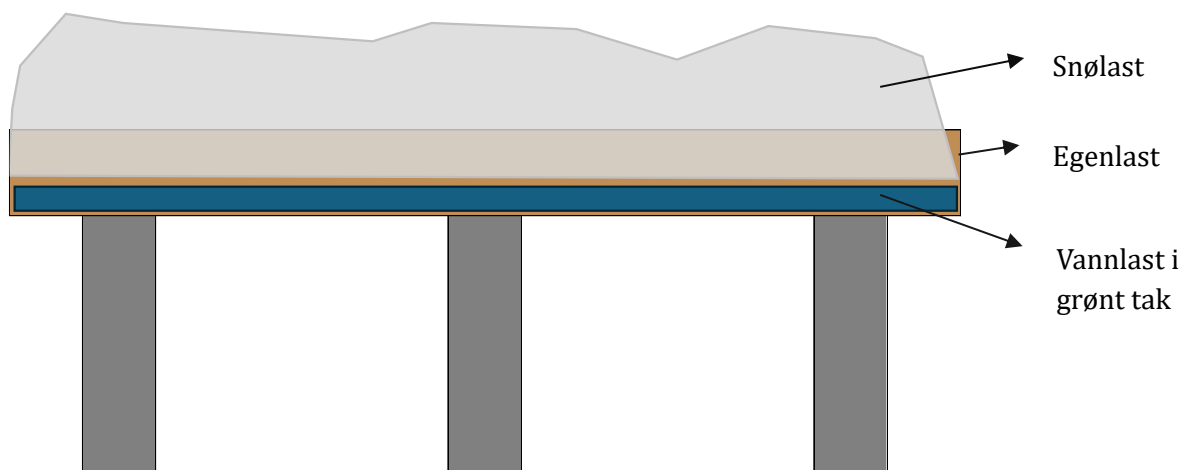
Av årsnedbør er det forventet en gjennomsnittlig økning på 18%, med et spenn på mellom 7% til 23% avhengig av lokasjon. Dette kommer blant annet av hyppigere og mer intense styrtregneepisoder. Det forventes en betydelig reduksjon i snømengde og lengde på snøsesong, med størst reduksjon for lavtliggende strøk. Som et resultat av økende temperatur vil det også forekomme flere smelteperioder. Likevel vil det enkelte år fortsatt kunne falle betydelige mengder snø



## 4 Metode

For å kunne besvare forskningsspørsmålene i denne studien er det av interesse å finne vannlast på de grønne takene over vintersesongene. På den måten kan man i henhold til forskningsspørsmål 1 vurdere hvilke nivåer av vannlast som opptrer, når de opptrer og forholdet mellom vannlast og snølast. Videre kan man undersøke samtidigheten mellom største vannlast og største snølast, i henhold til forskningsspørsmål 2. Avslutningsvis kan man kvantifisere besvarelsen av forskningsspørsmål 3, med utgangspunkt i en representativ vannlast på forsøkestakene.

Vektdataen fra forsøkestakene går over totalt seks vintersesonger og inkluderer til sammen egenvekten til takkonstruksjonen, vann lagret i takelementene, og snø(Figur 22). En vintersesong er definert som perioden fra desember til februar. Da det kan falle snø både før og etter disse månedene, undersøkes forskningsspørsmålene basert på perioden oktober til april.



**Figur 22** De forskjellige lastene inkludert i registrert vekt fra forsøkestakene. Illustrasjon L.F. Ranum

I videre delkapitler beskrives metodene som er benyttet for å klargjøre datagrunnlaget, estimere den reelle egenvekten til takene og estimere snølast oppå takene, for på den måten å estimere vannlast.

## 4.1 Databehandling

Analyse og fremstilling av data i denne studien er gjennomført med programmeringsspråket Python som verktøy. Python ble til å begynne med valgt som databehandlingsverktøy for å kunne samkjøre eventuelle resultater med en eksisterende modell i samme språk. Denne studien tok en annen vending, men Python egner seg likevel fullverdig til de relativt enkle regneoperasjonene som utføres på store mengder data. Med diverse importerte biblioteker er også alle grafer fremstilt ved hjelp av Python. Kodene som er utviklet og anvendt ligger vedlagt i vedlegg.

### 4.1.1 Datafiltrering og avvikende verdier

Datagrunnlaget for vektregistreringene fra forsøktakene lastet ned fra NVE Sildre inneholdt flere feilregistreringer og avvikende verdier. Nedenfor nevnes alle operasjoner som ble utført for å klargjøre datamaterialet for videre analyse.

- For å filtrere avvikende verdier, ble punkter som forstyrret lokale maksimum og minimum ekskludert fra datasettet manuelt. Punktene ble valgt ut ved hjelp av grafisk fremstilling av datasettene.
- Frem til 2. desember 2020 synes vektverdiene for tak 3 å være unaturlig fremskjøvet med omtrent to måneder. Alle vektverdier for tak 3 frem til denne datoen er koordinert med tak 1 sine vektverdier, med utgangspunkt i tidspunktet for maksimumsvekt på tak 1 i 2019. Tidspunktet for maksimumsvekten på tak 1 er 9. februar 2020. Tidspunkt for den tilsynelatende samme maksimumsvekten er forskjøvet til 31. mars 2020. Vektverdier for tak 3 frem til 2. desember 2020 er flyttet bakover i tid tilsvarende perioden mellom 9. februar 2020 og 31. mars 2020. Resultatet er verifisert ved å sammenligne vektvariasjon på tak 3 med tak 1, og vektøkning fra snø på de grønne takene mot vektøkning fra snø på referansetak.
- Det fremkommer mye støy i vektdata fra tak 3 i oppstartsperioden. Data for perioden frem til 1. september 2018 er derfor ekskludert fra datagrunnlaget.

## 4.2 Metode for estimering av takmodulenes egenvekt og nedbørslast

Vekten registrert fra takene inkluderer vekt av bærekonstruksjonen og takelementene, og fuktighet i form av vann som lagres i takelementene og som snø oppå taket. For å anslå vekten av vann og snø som lagres på det grønne taket, er det av interesse å anslå egenvekten til takene i tørr tilstand.

I masterstudien om prosjektering og oppbygging av forsøksanlegget beregnes egenvekten på takmodulene til henholdsvis 7680 kg for de grønne takene og 2430 kg for referansetaket (Øyre & Trommald, 2018). Likevel viser vektmålingene en variasjon fra disse verdiene og også mellom de to grønne takene. Årsaken ligger potensielt i forskjell mellom prosjektering og utførelse, eller registreringsfeil ved en eller flere veieceller. For å anslå reel egenvekt av takene har verdien for minste registrerte vekt over hele måleperioden blitt hentet ut for hvert av forsøktakene. Den vil representere takets vekt i den tørreste og letteste tilstanden det har hatt, og vil bli anvendt videre for å finne nedbørslasten på taket.

For å finne nedbørslast har minste registrerte vekt for det respektive taket blir subtrahert fra hver registrert vektverdi for taket, uttrykt i formel 8:

**Formel 8** Total nedbørsvekt på tak  $j$  ved tidspunkt  $i$

$$W_{nedbør,i,j} = W_{totalt,i,j} - W_{egenvekt,j}$$

$W_{nedbør,i,j}$  = vekt av nedbør ved tidspunkt  $i$  for tak  $j$  (kg)

$W_{totalt,i,j}$  = vekt registrert ved tidspunkt  $i$  for tak  $j$  (kg)

$W_{egenvekt,j}$  = minste registrerte vekt for tak  $j$  (kg)

Den resterende verdien  $W_{nedbør,i,j}$  tilsvarer total nedbørslast på taket ved tidspunkt  $i$ , altså summen av vannlast og snølast på de grønne takene. Referansetaket lagrer i teorien ingen

vannlast, kun eventuell snølast.  $W_{nedbør,i,j}$ -verdiene for referansetaket representerer derfor kun snølast.  $i$  indikerer registreringstidspunktet til vektverdien. Over hele måleperioden er vekten på hvert tak registrert hvert 10.minutt og datasettene for hvert tak utgjør omtrent 304.000 punkter.

Den største nedbørslasten for hver sesong for hvert tak blir hentet ut for videre analyse.

#### 4.2.1 Validering av egenlast

Anslåtte verdier for takmodulenes egenlast er validert ved hjelp av tre metoder:

- Analyse av 20 omkringliggende naboverdier og grad av variasjon rundt verdi. Bakgrunnen for dette er å kunne vurdere om laveste registrerte verdi på taket er en avvikende verdi.
- Analyse av tidspunkt for registrert verdi. Det er eksempelvis ikke fornuftig om minste verdi blir registrert på våren når snøen smelter eller sen høst når det regner mye.
- 
- Analyse av temperatur og mengden nedbør som har falt i en periode på 14 dager før tidspunkt for målt verdi. Det vil eksempelvis ikke være fornuftig om laveste registrerte verdi ble registrert etter en periode med større mengder nedbør og lave temperaturer som indikerer mindre evapotranspirasjon fra takene.

## 4.3 Metode for estimering av snølast på de grønne takene

Det finnes ingen instrumenter for måling av snølast eller snødybde på de grønne takene i dag. For å estimere last fra snø på de grønne takene, er last fra snø på det svarte referansetaket brukt som utgangspunkt. Referansetaket lagrer teoretisk sett ingen fuktighet utover snø, som blir liggende frem til smelting.

Snølast på referansetaket representeres av  $W_{nedbør,i,j}$ -verdiene utledet i kapittel 4.2. Snølast på de grønne takene settes lik snølasten på referansetaket, uttrykt i formel 9.

**Formel 9** Vekt av snø på grønt tak ved tidspunkt  $i$

$$W_{snø,i,grønne\ tak} = W_{nedbør,i,referansetak}$$

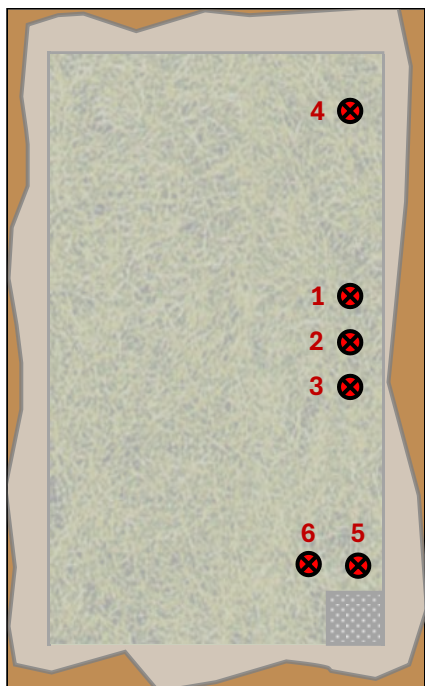
$W_{snø,i,grønt\ tak}$  = vekt av snølast ved tidspunkt  $i$  på grønne tak (kg)

$W_{snø,i,referansetak}$  = vekt av snølast ved tidspunkt  $i$  på referansetak (kg)

### 4.3.1 Validering av resultat

For å få en indikasjon på samsvar mellom snølastverdiene fra referansetaket og snølast på de grønne takene, er det gjennomført to densitets- og snødybdemålinger av snøen på og rundt de grønne takene. Målingene ble utført i slutten januar 2024, den ene kort tid etter et større snøfall den 21. januar og den siste etter et par dager med varmegrader, den 23. januar.

Snødybdemålingene ble gjennomført på tak 3 og referansetaket. Ved hjelp av en skredsøkerstang ble snødybden målt for opptil 6 punkter på hvert av takene, som illustrert i Figur 23 og Figur 24. Dybden ble målt fra sedumsmatte/membran og opp til toppen av snødekket.



**Figur 23** Dybdemålingspunkter på tak 3. Illustrasjon:  
L. F. Ranum



**Figur 24** Dybdemålingspunkter på tak 2. Illustrasjon:  
L. F. Ranum

For å estimere snødensiteten ble snødybden på mark for to områder ved siden av takene målt. Dybden ble målt fra mark og opp til toppen av snødekket. For hver av de to målingene ble det ved hjelp av en hul plastsylander med diameter lik 4,7 cm hentet ut en snøprøve med tilsvarende lik høyde. Snøprøvene ble tømt over i en plastpose og videre over i en bolle på en vekt. Prøvene tatt 21.januar ble transportert til et kontor på NMBU og målt der, mens prøvene tatt 23.januar ble målt på samme lokasjon som forsøksanlegget.



**Bilde 1** Dybdemåling på mark 21.januar 2024. Foto: I. Frimannslund



**Bilde 2** Snø på tak 2 og 3 21.januar 2024. Snøen dekker hele parapeten og henger tilsynelatende fra kanten av den. Foto: I. Frimannslund



**Bilde 3** Veiling av snøprøve 23.januar 2024. Foto: L. F. Ranum



**Bilde 4** Snøprøvetakning med sylinderformet rør 23.januar 2024. Foto: L. F. Ranum





**Bilde 5** Snø på tak 3 23. januar 2024. Foto: L. F. Ranum



**Bilde 6** Snø på tak 2 23. januar 2024. Foto: L. F. Ranum

For å beregne snødensitet ble vekten av snøprøven dividert på volumet av snøprøven, i henhold til Formel 2.

Volumet av snøprøven ble beregnet ved å multiplisere arealet av sylinderen med målt dybde for prøven, uttrykt ved formel 10.

**Formel 10** Volum av snøprøve i

$$V_{snø,i} = A_{sylindere} \times d_{snø,i}$$

$V_{snø,i}$  = volum av snø ved måling i ( $m^3$ )

$A_{sylindere}$  = areal av sylindere lik 0,001735  $m^2$

$d_{snø,i}$  = snødybde ved måling i (m)

For å kunne sammenligne om vekt fra snølast på de grønne takene tilsvarer vekt fra snølasten på referansetaket, har volum av snøen på hvert av takene blitt beregnet med utgangspunkt i

dybdemålingen gjennomført ved starten av fallisolasjonen og volum av takelementene, se Figur 25. Gul trekant illustrerer volumet av snøen opp til høyeste punkt på fallisolasjonen, der det er gjennomført en dybdemåling. Den sorte streken illustrerer en målestang. Den røde boksen illustrerer volumet av snøen fra høyeste punkt på fallisolasjonen og opp til parapet, samt snø oppå parapet for måling gjennomført 21.januar.

Det er gjort en antakelse om at målt høyde på snøen er lik over hele taket. Dette stemmer ikke helt, da snøhøyden varierer noe over taket. De fem andre målepunktene ble ikke anvendt videre. Beregnet snøvolum har blitt multiplisert med snødensitet målt samme dag for å finne vekten på det aktuelle taket, uttrykt ved formel 11.

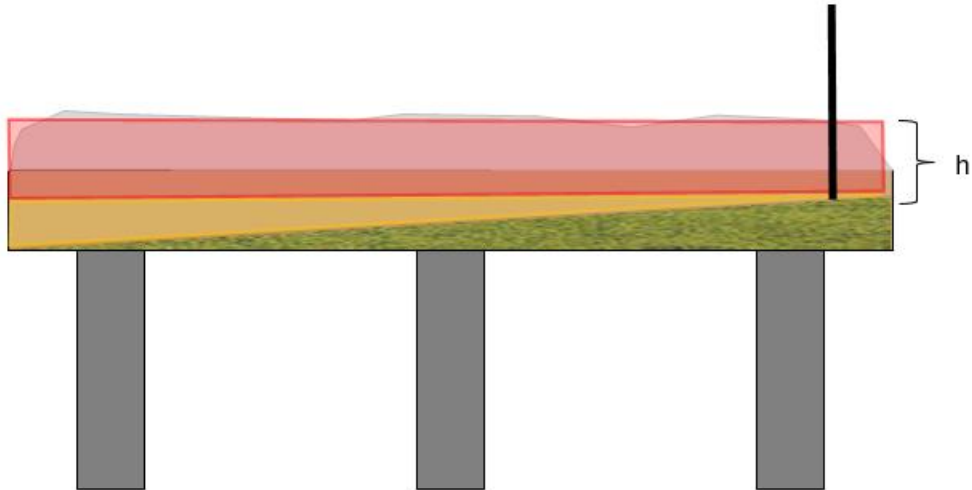
**Formel 11** Vekt av snøprøve i

$$W_{snø,i} = V_{snø,i} \times \rho_i$$

$W_{snø,i}$  = vekt av snø ved måling i (kg)

$V_{snø,i}$  = volum av snø på tak ved måling i ( $m^3$ )

$\rho_i$  = tyngdetettheten til snøen ved måling i ( $\frac{kg}{m^3}$ )



**Figur 25** Dybdemåling på tak 3. Volum av snø blir beregnet ut fra volum snø på taket opp til starter på fallisolasjon (gul boks) og høyden på snøen ved samme punkt (rød boks). Illustrasjon: L. F. Ranum

Deretter har vekt på referansetaket blitt sammenlignet med vekt på tak 3, og vekt for referansetaket blitt sammenlignet med registrert vekt ved det aktuelle tidspunktet for måling. Dette kan gi en indikasjon på hvor godt lasten av snø på referansetaket samsvarer med lasten av snø på det grønne taket, og hvor godt estimatet stemmer opp mot vektregistreringen i NVE Sildre på dette tidspunktet.

## 4.4 Metode for estimering av vannlast på de grønne takene

For de grønne takene består estimert nedbørslast, som beskrevet i kapittel 4.2, av last fra henholdsvis snø oppå taket og vannlast i taket. For å estimere vannlast har snølast ved tidspunkt  $i$ , estimert som beskrevet i kapittel 4.3, blitt subtrahert fra verdiene for nedbørslast for hvert tak. Formel 12 uttrykker metoden.

**Formel 12** Vannlast ved tidspunkt  $i$  på tak  $j$

$$W_{\text{vannlast},i,j} = W_{\text{nedbør},i,j} - W_{\text{snølast},i,\text{grønt tak}}$$

$W_{\text{vannlast},i,j}$  = vekt fra vannlast ved tidspunkt  $i$  for tak  $j$  (kg)

$W_{\text{nedbør},i,j}$  = vekt fra nedbør ved tidspunkt  $i$  for tak  $j$  (kg)

$W_{\text{snølast},i,\text{grønt tak}}$  = vekt fra snølast ved tidspunkt  $i$  på grønt tak (kg)

Videre er vektverdiene for nedbør, snølast og vannlast normalisert på takflatens areal og konvertert til Newton, uttrykt ved formel 13:

**Formel 13** Normalisert last konvertert til Newton

$$\sigma_j = \frac{W_j}{A_{\text{takflate}}} \times \left( \frac{\text{g}}{1000} \right)$$

$\sigma_j$  = lasttype  $j$  uttrykt i Newton ( $\frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$ )

$W_j$  = vekt (kg) fra lasttype  $j$

$A_{\text{takflate}}$  = takflatens areal lik 46,6 m<sup>2</sup>

$g$  = gravitasjonskonstant lik 9,81  $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

## 4.5 Metode for kvantifisering av samtidighet mellom maksimal snølast og vannlast

I dag dimensjoneres takkonstruksjoner med grønne tak for last fra maksimal vannmetning i taket samtidig med dimensjonerende snølast for bygningens lokasjon. For å danne seg et bilde av om dette i realiteten er tilfellet, er det interessant å kvantifisere når de største vann- og snølastene opptrer i forhold til hverandre. Det er også av interesse å finne ut hva forholdet mellom vannlast og snølast er når største snølast for sesongen inntreffer, og tilsvarende hva forholdet mellom snølast og vannlast er når største vannlast inntreffer. Tidspunkt for når største nedbørslast inntreffer kan variere fra de to førstnevnte, og fordelingen av snølastens og vannlastens andel av total nedbørslast undersøkes også. For å vurdere samtidigheten mellom snølast og vannlast, og forholdet mellom lastene, er følgende metoder benyttet:

- Kvantifisering av hvor lenge etter maksimal snølast, den påfølgende største vannlasten inntreffer. Tidsforskyvningen presenteres i dager.
- Kvantifisering av når maksimal vannlast for vintersesongen inntreffer i forhold til maksimal snølast og hva forholdet mellom snølast og vannlast er ved dette tidspunktet.
- Forholdet mellom vannlast og snølast ved tidspunkt for maksimal snølast, maksimal vannlast og maksimal nedbørslast for sesongen presenteres som en andel av total nedbørslast. Resultatene presenteres i følgende kapitler:
  - Forhold mellom snølast og vannlast ved ***maksimal total nedbørslast***: 5.1.2
  - Forhold mellom snølast og vannlast ved ***maksimal vannlast***: 5.3.1
  - Forhold mellom snølast og vannlast ved ***maksimal snølast***: 5.3.6

## 4.6 Beregningseksempel – dimensjonerende lastsituasjon ved ny grønn takoppbygging

Med utgangspunkt i resultatene fra forsøktakene ved NMBU, er dimensjonerende lastsituasjon i bruddgrensetilstand (ULS) beregnet for en eksisterende lett og en tung takkonstruksjon hvor det skal etableres ny grønn takoppbygging. De to eksemplene er hentet fra SINTEF sin nye veileder, med egenvekten til en lett takkonstruksjon i massivtre og en tung konstruksjon i armert plasstøpt betong. Vekten til de grønne takelementene er hentet fra forsøktakene i denne studien. Lastsituasjonene dimensjoneres for en konstruksjon lokalisert i Ås, Akershus, under 150 moh.

Eksemplene tar utgangspunkt i eksisterende konstruksjon bygget i 1994 og beregner potensiell reduksjon i dimensjonerende last sammenlignet med dagens dimensjoneringspraksis. Vannlasten beregnes sammen med egenvekten til takelementene, fremdeles som en permanent last, men redusert ned til lasten ved 56% av vannlagringskapasiteten på 0,981kN/m<sup>2</sup>. Dette er største estimerte vannlast ved inngangen til vinteren.

Beregningseksemplet tar for seg følgende tre dimensjonerende lastsituasjoner for hver av de to takkonstruksjonene:

- Dimensjonerende lastsituasjon i 1994, før etablering av grønn takoppbygging
- Dimensjonerende lastsituasjon i 2023, etter etablering av grønn takoppbygging, med dagens dimensjoneringspraksis iht. NS3840
- Dimensjonerende lastsituasjon i 2023, etter etablering av grønn takoppbygging, med 56% av utnyttet vannlagringskapasitet som permanent last

Både karakteristisk nyttelast og snølast som bærekonstruksjonen skal dimensjoneres for, har økt siden byggeåret 1994. I eksemplet legges det til grunn at taket er tilgjengelig som forsamlingsareal, med bestemte gangveier da sedumtak ikke egner seg til ferdsel. Nyttelast for denne typen anvendelse har siden 1994 økt fra 1,0 til 2,0 kN/m<sup>2</sup>.

Ås og Oslo har et relativt likt klima, og da karakteristisk snølast på mark er lik for lokasjon 0-150 moh i dag, antas det i dette eksemplet at karakteristisk snølast på mark for bygningen var 1,5 kN/m<sup>2</sup> i 1994 (Tabell 1). I dag ligger den på 3,5 kN/m<sup>2</sup>. Karakteristisk snølast på tak beregnes iht Eurokode 1 etter formel 14 og med følgende forutsetninger:

**Formel 14** Karakteristisk snølast på tak

$$s_{EK} = \mu \times C_e \times C_t \times s_k$$

$\mu = 0,8$  - formfaktor for et flatt tak

$C_e = 1,0$  - eksponeringskoeffisient for normal topografi

$C_t = 1,0$  - termisk koeffisient for varmegjennomgangskoeffisient under 1,0 W/m<sup>2</sup>K


$s_k$  = karakteristisk snølast på mark for bygningens lokasjon

## 4.7 Bruk av KI-verktøy

I denne masterstudien er kunstig intelligens anvendt i all hovedsak for å utvikle Python-kodene som utfører operasjonene beskrevet i metodekapittelet og fremstille resultatene grafisk. Chat GPT-4 er KI-verktøyet som er benyttet. For å kvalitetssikre resultatene generert av disse kodene, er det tatt stikkprøver av tilfeldige verdier i datasettene og gjennomført visuell kontroll av grafer. Utover deler av setninger i avsnittet «Abstract», er ikke benyttet KI for tekstredigering eller tekstproduksjon. Nedenfor er det gitt et eksempel på hvordan Chat GPT er benyttet for å utvikle en kode og et eksempel på hvordan resultatene koden genererer, er kvalitetssikret.

**You**

Jeg har to dataframes vektPer og regnvektPollen. Jeg ønsker å dividere alle verdiene i kolonnen Nedbør (kg) i vektPer på takflate. Takflate = 46,6. Jeg ønsker å gjøre det samme for kolonnen Regnlast (kg) i regnvektPollen

 **ChatGPT**

For å utføre disse operasjonene i Python med Pandas, kan du bruke følgende kode:

```
python Copy code

import pandas as pd

# Opprett dataframes
vektPer = pd.DataFrame({'Dato': ['2024-05-01', '2024-05-02', '2024-05-03'],
                        'Nedbør (kg)': [50, 60, 70],
                        'Takflate': [46.6, 46.6, 46.6]})

regnvektPollen = pd.DataFrame({'Dato': ['2024-05-01', '2024-05-02', '2024-05-03'],
                                'Regnlast (kg)': [30, 40, 50],
                                'Takflate': [46.6, 46.6, 46.6]})

# Dividere alle verdiene i kolonnen Nedbør (kg) i vektPer på takflate
vektPer['Nedbør (kg)'] = vektPer['Nedbør (kg)'] / vektPer['Takflate']

# Dividere alle verdiene i kolonnen Regnlast (kg) i regnvektPollen på takflate
regnvektPollen['Regnlast (kg)'] = regnvektPollen['Regnlast (kg)'] / regnvektPollen['Takflate']

print("Dataframe vektPer etter divisjon:")
print(vektPer)

print("\nDataframe regnvektPollen etter divisjon:")
print(regnvektPollen)
```

**You**

jeg har dataframesene fra før, kan du gi meg koden uten å printe



### ChatGPT

Selvfølgelig! Her er koden uten print-setningene:

```
python Copy code  
  
# Dividere alle verdiene i kolonnen Nedbør (kg) i vektPer på takflate  
vektPer['Nedbør (kg)'] = vektPer['Nedbør (kg)'] / vektPer['Takflate']  
  
# Dividere alle verdiene i kolonnen Regnlast (kg) i regnvektPollen på takflate  
regnvektPollen['Regnlast (kg)'] = regnvektPollen['Regnlast (kg)'] / regnvektPollen['T
```

*Figur 26 Eksempel på bruk av KI ved Chat GPT - 4.0 for å utvikle en kode*

I dette eksemplet ble følgende kode produsert:

```
# Dividere alle verdiene i kolonnen Nedbør (kg) i vektPer på takflate  
  
vektPer['Nedbør (kg)'] = vektPer['Nedbør (kg)'] / vektPer['Takflate']  
  
# Dividere alle verdiene i kolonnen Regnlast (kg) i regnvektPollen på takflate  
  
regnvektPollen['Regnlast (kg)'] = regnvektPollen['Regnlast (kg)'] / regnvektPollen['Takflate']
```

Videre ble følgende tilpasninger gjennomført i Python:

- en ny variabel «takflate» ble opprettet og satt lik innvendig takflate på takmodulene, 46,6
- vektPer['Takflate'] og regnvektPollen['Takflate'] ble erstattet med variabelen «takflate»
- vektPer['Nedbør (kg)'] og regnvektPollen['Regnlast (kg)'] ble endret til vektPer['Nedbør (kg/m<sup>2</sup>)'] og regnvektPollen['Regnlast (kg/m<sup>2</sup>)'] da dette skal bli en ny kolonne med registrert vekt normalisert på takflaten

Endelig kode som ble brukt videre på datagrunnlaget ser slik ut:

```
takflate = 46.6 #Areal av takene i m2
```

```
vektPollen['Nedbør (kg/m2)'] = vektPollen['Nedbør (kg)'] / takflate
```

```
regnvektPollen['Regnlast (kg/m2)'] = regnvektPollen['Regnlast (kg)'] / takflate
```

### Verifikasjon:

vektPer - DataFrame

| Index | Tidspunkt           | Vekt (kg) | Sesong      | Nedbør (kg) | Nedbør (kg/m2) |
|-------|---------------------|-----------|-------------|-------------|----------------|
| 24236 | 2018-12-26 22:30:00 | 4066.82   | Vinter 2018 | 1638.07     | 35.1518        |

*Figur 27* Utklipp av en verdi for «Nedbør (kg/m2)» generert av koden utviklet i Figur 26

Den 26.desember 2018 kl. 22:30:00 ble det registrert en nedbørsvekt, «Nedbør (kg)», på 1638,07 kg (Figur 27). Normalisert på takflaten tilsvarende 46,6 m<sup>2</sup> tilsvarer dette 35,1517 kg/m<sup>2</sup> per kontroll og samsvarer med resultatene koden gir under «Nedbør (kg/m2)».

regnvektPollen - DataFrame

| Index | Tidspunkt           | Vekt (kg) | Sesong    | Nedbør (kg) | Regnlast (kg) | Regnlast (kg/m2) |
|-------|---------------------|-----------|-----------|-------------|---------------|------------------|
| 10554 | 2018-09-21 19:10:00 | 10085.7   | Høst 2018 | 2510.11     | 2372.06       | 50.9026          |

*Figur 28* Utklipp av en verdi for «Regnlast (kg/m2)» generert av koden utviklet i Figur 27

Den 21.september 2018 kl. 19:10:00 ble det registrert en vannlast, «Regnlast (kg)», på 2372,06 kg (Figur 28). Normalisert på takflaten tilsvarende 46,6 m<sup>2</sup> tilsvarer dette 50,9026 kg/m<sup>2</sup> per kontroll og samsvarer med resultatene koden gir under «Regnlast kg/m2».

## 5 Resultater

### 5.1 Takmodulenes egenvekt og nedbørslast

#### 5.1.1 Takmodulenes egenvekt

*Tabell 8* Prosjekterte og registrerte egenlaster til takene

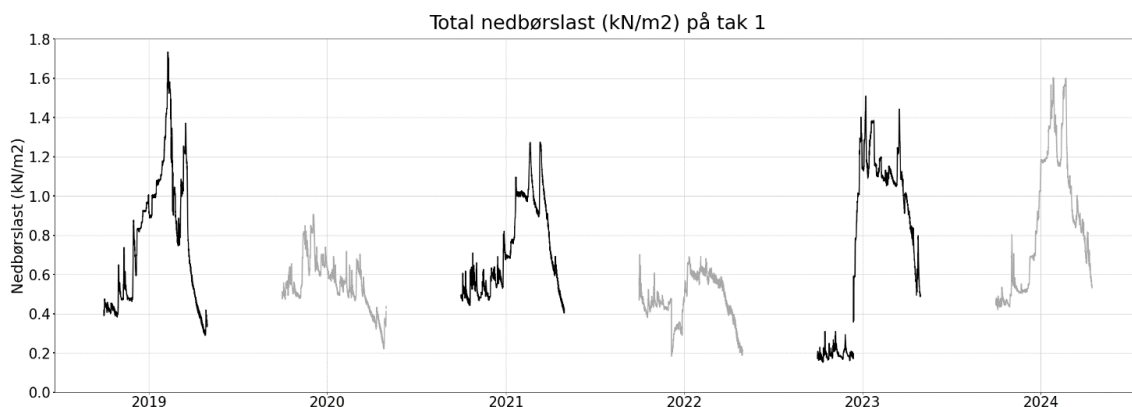
| Tak | Navn   | Type         | Prosjektert egenvekt (kg) | Minste registrerte egenvekt (kg) | Registrerings--tidspunkt |
|-----|--------|--------------|---------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| 1   | Pollen | Grønt tak    | 7680                      | 7575,6                           | 07.09.2022 11:00         |
| 2   | Per    | Referansetak | 2430                      | 2428,8                           | 03.05.2022 09:00         |
| 3   | Nektar | Grønt tak    | 7680                      | 8742,4                           | 17.06.2023 12:40         |

I Tabell 8 presenteres de laveste registrerte vektverdiene over måleperioden for hvert tak. Vekt på referansetaket og tak 1 er omtrent som prosjektert. Vekt på tak 3 avviker noe mer og veier over 1000kg mer enn prosjektert.

Laveste registrerte vektverdi for tak 1 er målt tidlig høst, tak 2 sen vår og tak 3 tidlig sommer.

#### 5.1.2 Takmodulenes nedbørslast

Nedbørslasten til hver av takene med sesongens største nedbørslast er illustrert og beskrevet nedenfor. Nedbørslast tilsvarer summen av vannlast og snølast på takene, og er resultatet av registrert vekt på takene fratrukket minste registrerte egenlast som presentert i 5.1.1 og utført med Formel 8.



**Figur 29** Total nedbørslast i kN/m<sup>2</sup> over målte vintersesonger for tak 1

Figur 29 viser seks tidsserier med nedbørslasten på tak 1 for hver sesong. Årstallet på x-aksen representerer årsskifte. Grafen før årsskifte viser nedbørslasten for oktober, november og desember måned og grafen etter årsskifte viser nedbørslasten for januar, februar, mars og april måned. Y-aksen viser normalisert nedbørslast i kN/m<sup>2</sup>.

Nedbørslasten for tak 1 har både et fall høsten 2021 og et hopp høsten 2022 som ikke kan forklares naturlig. Maksimal nedbørslast forventes å være større enn registrert høsten 2021 og mindre enn registrert høsten 2022. Maksimumsverdiene for disse to sesongene er derfor ikke anvendt i videre analyse.

**Tabell 9** Største estimerte nedbørsvikt i kN/m<sup>2</sup> per vintersesong for tak 1

| Vintersesong | Største registrerte nedbørsvikt – Tak 1 |                      |                      | Snølast           | Vannlast          | Tidspunkt  |
|--------------|---|----------------------|----------------------|-------------------|-------------------|------------|
|              | [kg]                                    | [kg/m <sup>2</sup> ] | [kN/m <sup>2</sup> ] | % av total nedbør | % av total nedbør |            |
| 2018-2019    | 8 237                                   | 176,8                | 1,73                 | 59,4 %            | 40,6%             | 09.02.2019 |
| 2019-2020    | 4 302                                   | 92,3                 | 0,91                 | 42,0 %            | 58,0%             | 04.12.2019 |
| 2020-2021    | 6 057                                   | 130,0                | 1,28                 | 32,2 %            | 67,8%             | 12.03.2021 |
| 2021-2022    | -                                       | -                    | -                    | -                 | -                 | -          |
| 2022-2023    | -                                       | -                    | -                    | -                 | -                 | -          |
| 2023-2024    | 7 611                                   | 163,3                | 1,60                 | 43,7%             | 56,3%             | 27.01.2024 |

Tabell 9 viser de største registrerte nedbørslastene for hver sesong på tak 1. Største nedbørslast inntraff vintersesongen 2018-2019 på 1,73 kN/m<sup>2</sup> i starten av februar. Andelen snølast varierer mellom 32,2-59,4% og andelen vannlast mellom 40,6-67,8% når sesongens største nedbørslast inntreffer på tak 1.



**Figur 30** Total nedbørslast i kN/m<sup>2</sup> over målte vintersesonger for tak 3

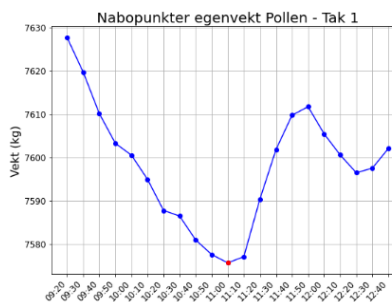
Figur 30 viser seks tidsserier med nedbørslasten for hver sesong for tak 3. Det mangler det data fra starten til oktober til begynnelsen av desember høsten 2020. Før mangelen på data oppstår, gjør registreringene et unaturlig hopp. I starten av januar 2021 gjenopptar likevel vektregistreringene et nivå likt før datastøyet og maksimal nedbørslast for denne sesongen er derfor inkludert i videre analyse.

**Tabell 10** Største estimerte nedbørsvekt i kN/m<sup>2</sup> per vintersesong for tak 3

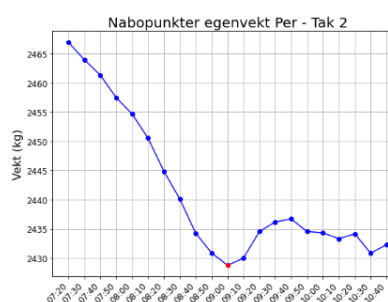
| Vintersesong     | Største registrerte nedbørsvekt - Tak 3 |                      |                      | Snølast           | Vannlast          | Tidspunkt  |
|------------------|---|----------------------|----------------------|-------------------|-------------------|------------|
|                  | [kg]                                    | [kg/m <sup>2</sup> ] | [kN/m <sup>2</sup> ] | % av total nedbør | % av total nedbør |            |
| <b>2018-2019</b> | 7 365                                   | 158,1                | 1,55                 | 66,4 %            | 33,6 %            | 09.02.2019 |
| <b>2019-2020</b> | 4 308                                   | 92,4                 | 0,91                 | 7,7 %             | 92,3 %            | 17.11.2019 |
| <b>2020-2021</b> | 5 590                                   | 120,0                | 1,18                 | 36,5 %            | 63,5 %            | 20.02.2021 |
| <b>2021-2022</b> | 5 092                                   | 109,3                | 1,07                 | 36,4 %            | 63,6 %            | 11.01.2022 |
| <b>2022-2023</b> | 6 523                                   | 140,0                | 1,37                 | 47,3 %            | 52,7 %            | 08.01.2023 |
| <b>2023-2024</b> | 7 417                                   | 159,2                | 1,56                 | 44,8 %            | 55,2 %            | 22.02.2024 |

**Tabell 10** viser de største registrerte nedbørslastene for hver sesong på tak 3. Største nedbørslast inntraff vintersesongen 2023-2024 på 1,56 kN/m<sup>2</sup> i starten av februar. Dette er 0,01 kN/m<sup>2</sup> mer enn sesongen 2018-2019 hvor største nedbørslast var 1,55 kN/m<sup>2</sup>, og hvor dette var sesongen for største nedbørslast registrert på tak 1. Andelen snølast ligger i intervallet 7,7-66,4% og andelen vannlast i intervallet 33,6-92,3% når sesongens største nedbørslast inntreffer.

### 5.1.3 Verifisering av takmodulenes egenvekt og nedbør



**Figur 31** Nabopunkter for verifisering av egenvekt tak 1



**Figur 32** Nabopunkter for verifisering av egenvekt tak 2



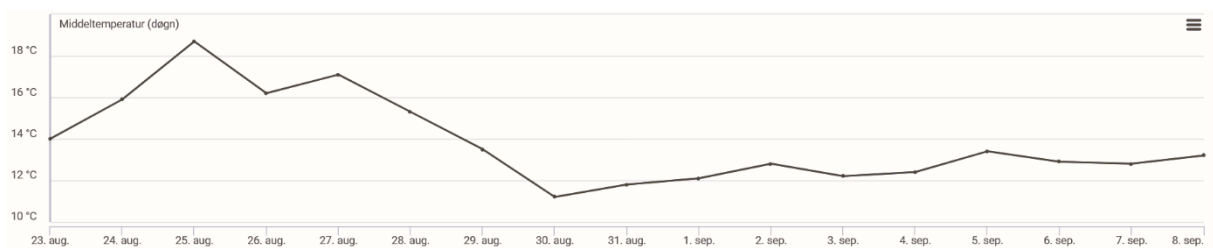
**Figur 33** Nabopunkter for verifisering av egenvekt tak 3

Figur 31, Figur 32 og Figur 33 illustrerer 20 omkringliggende nabopunkter til minste registrerte vekt for hvert tak, 10 nabopunkter før takets egenlast og 10 nabopunkter etter. Det respektive takets egenvekt er markert i rødt. Grafene til grønt tak 1 og referansetak 2 viser naturlig variasjon rundt minste registrerte last. Grafen til tak 3 viser en noe mer unaturlig utvikling akkurat rundt egenlasten, men innenfor en verdimengde på under 5kg. Grafene indikerer at de minste registrerte vektverdiene på takene med liten sannsynlighet er avvikende verdier og at de kan benyttes til videre analyse.

Nedbør og temperatur i en periode på 14 dager før registrert minstevekt, er presentert for hvert av takene i figurene under. Disse gir en indikasjon på tidspunkt for minste registrerte vekt inntraff etter en periode med mindre nedbør og varmere temperaturer.



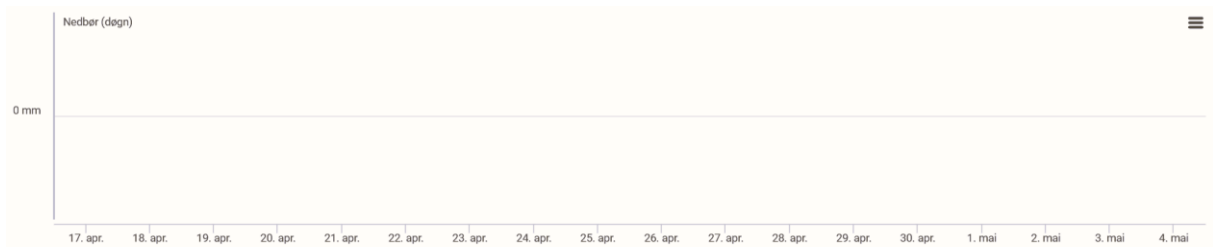
**Figur 34** Nedbør i en 14-dagers periode før registrert egenvekt tak 1 (Klimasevicesenter, 2024)



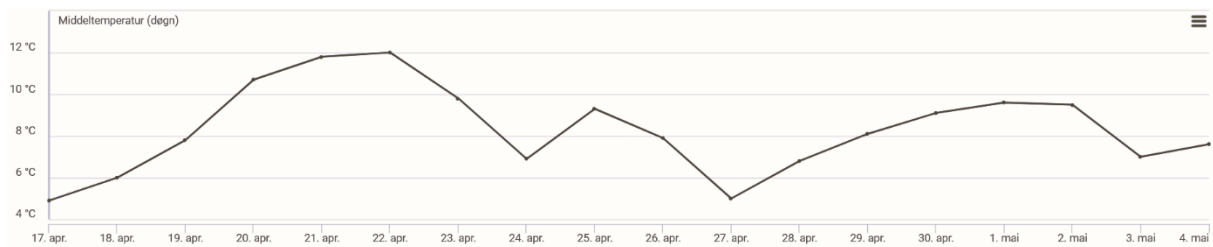
**Figur 35** Døgnmiddeltemperatur målt i en 14-dagers periode før registrert egenvekt tak 1 (Klimasevicesenter, 2024)

Figur 34 viser at det falt mindre mengder nedbør på opp mot 1,5 mm i dagene før 7. september, vektregistrering for tak 1. Temperaturen lå stabilt på mellom 12-14°C etter en periode med temperaturer opp mot 19°C (Figur 35). Tidspunkt for minste registrerte vekt er tidlig høst. Likevel kan mengden nedbør i forkant betraktes som minimal, i kombinasjon med jevn temperatur på rundt 13 °C. Egenlastverdien til tak 1 kan betraktes som gyldig.





**Figur 36** Nedbør i en 14-dagers periode før registrert egenvekt tak 2 (Klimasevicesenter, 2024)

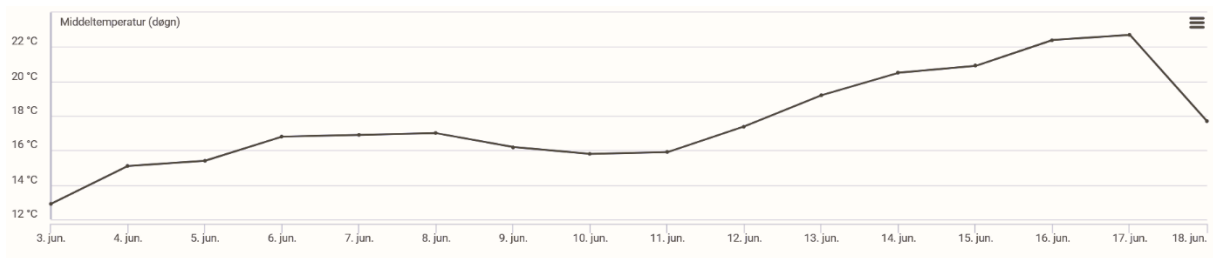


**Figur 37** Døgnmiddeltemperatur målt i en 14-dagers periode før registrert egenvekt tak 2 (Klimasevicesenter, 2024)

Figur 36 viser en periode på 14 dager uten nedbør frem mot 3. mai, vektregistrering for tak 2. Temperaturen varierte mellom 5-10°C etter en periode med temperaturer opp mot 12°C (figur Figur 37). Egenlasten på referansetaket kan betraktes som gyldig med bakgrunn i den lengre perioden uten nedbør.



**Figur 38** Nedbør i en 14-dagers periode før registrert egenvekt tak 3 (Klimasevicesenter, 2024)

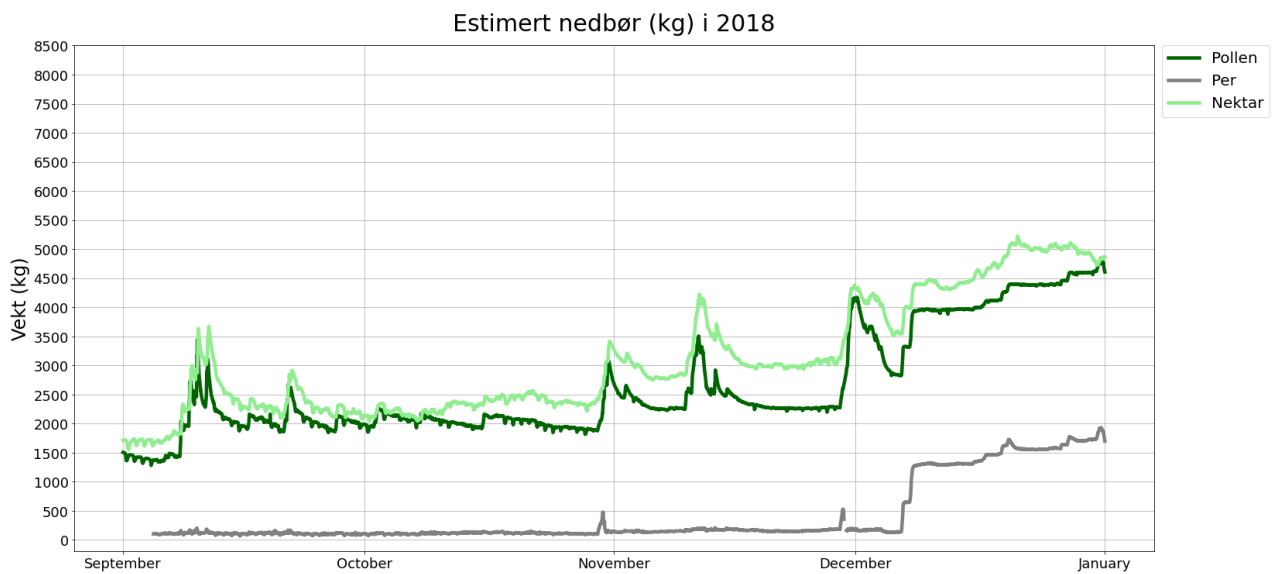


**Figur 39** Døgnmiddeltemperatur målt i en 14-dagers periode før registrert egenvekt tak 3 (Klimasevicesenter, 2024)

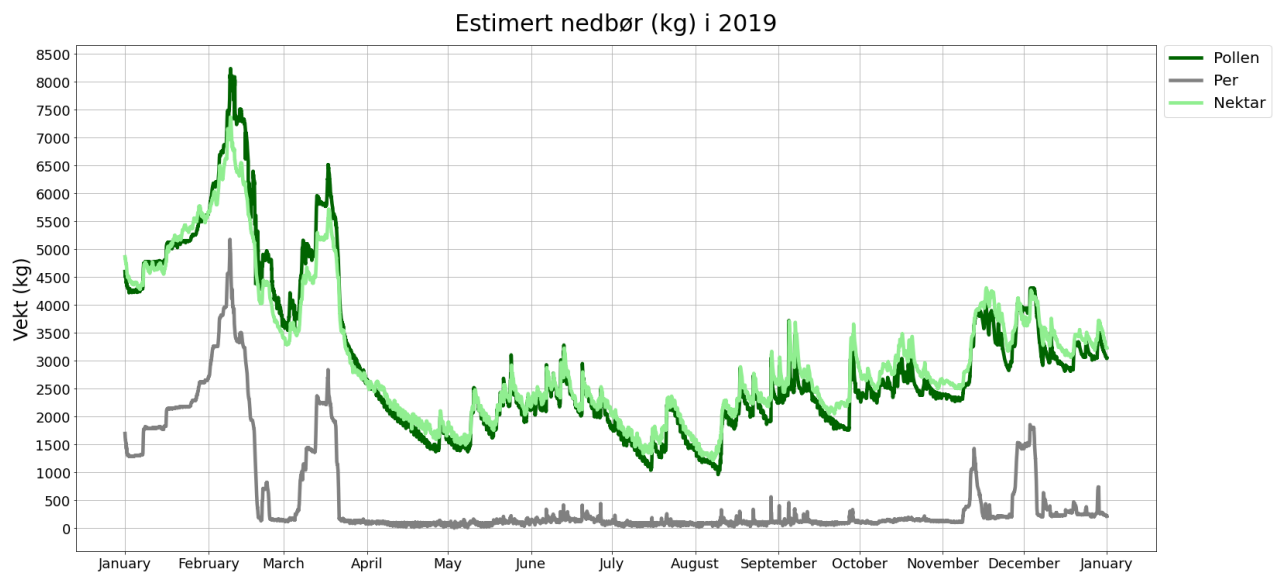
Figur 38 viser at det falt 1 mm nedbør dagen før 17.juni, vektregistrering for tak 3.

Temperaturen nådde sitt maksimum i perioden dagen for registrering på over 22 °C (Figur 39).

Egenlasten til tak 3 betraktes som gyldig med bakgrunn i dette.



**Figur 40** Estimert nedbør (kg) for alle tre tak 2018

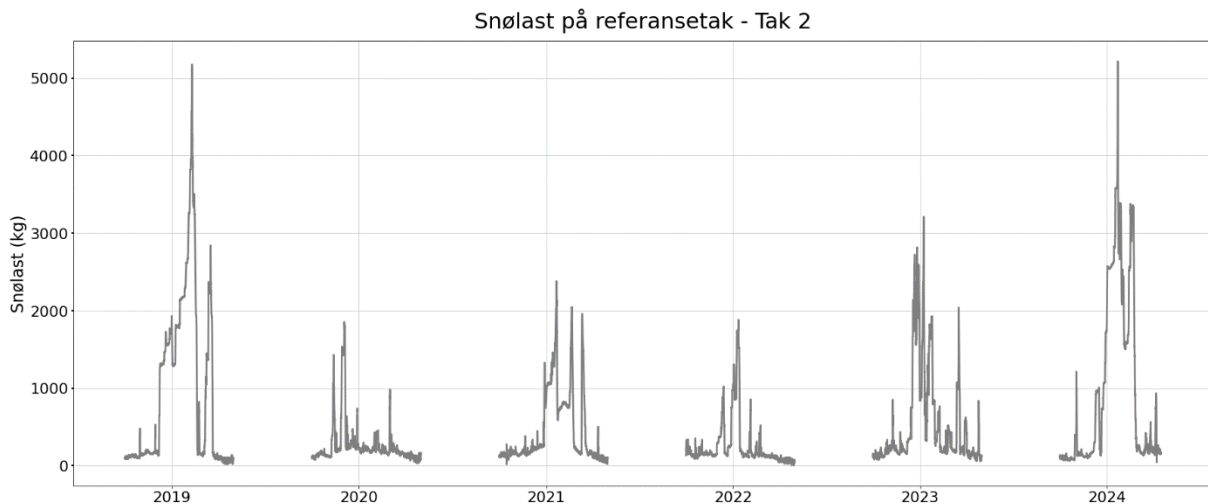


**Figur 41** Estimert nedbør (kg) for alle tre tak 2019

Figur 40 og Figur 41 viser nedbørslasten på alle tre tak, resultatet av registrerte vektverdier fratrukket egenlasten til takene, for de to første årene av måleperioden. Grafene for 2018 indikerer at tak 3 holder på noe mer fuktighet enn tak 1 frem mot årsskifte 2019. Fra starten av 2019 samsvarer mengden nedbør på hvert av de grønne takene relativt godt. Det gjør også samtidig mellom vektøkning på de grønne takene og referansetaket i forbindelse med snøfall. Vekten på referansetaket ligger stabilt nærmere 0 kg over sommerhalvåret, kun på påvirket av kortvarig regnfall i perioden. Alle grafene indikerer at fratrukket estimert egenlast samsvarer relativt godt med reel egenlast.

## 5.2 Estimert snølast på de grønne takene

### 5.2.1 Snølast på referansetak (kg)



*Figur 42 Estimert snølast (kg) på referansetak 2 for alle målte vintersesonger*

Figur 42 viser seks tidsserier med snølast på referansetak. Hver tidsserie representerer en vintersesong. Snølastverdiene er et resultat av vektverdiene registrert på referansetaket fratrukket egenlasten på referansetaket, som presentert i kapittel 5.1 og utført Formel 9. I perioden før vintersesong, hvor temperaturen er over  $0^{\circ}\text{C}$ , ligger samtlige grafer noe over 0  $\text{kN/m}^2$ , som indikerer en snølast. Dette tyder på fuktighet utover snølast, som lagres i referansetaket.

**Tabell 11** Største estimerte snølast per vintersesong

| Vintersesong | Største registrerte snølast |                      |                      | Tidspunkt  |
|--------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|------------|
|              | [kg]                        | [kg/m <sup>2</sup> ] | [kN/m <sup>2</sup> ] |            |
| 2018-2019    | 5 176                       | 111,1                | 1,09                 | 09.02.2019 |
| 2019-2020    | 1 853                       | 39,8                 | 0,39                 | 03.12.2019 |
| 2020-2021    | 2 381                       | 51,1                 | 0,50                 | 21.01.2021 |
| 2021-2022    | 1 881                       | 40,4                 | 0,40                 | 11.01.2022 |
| 2022-2023    | 3 212                       | 68,9                 | 0,68                 | 08.01.2023 |
| 2023-2024    | 5 216                       | 111,9                | 1,10                 | 22.01.2024 |

Tabell 11 inneholder maksimumsverdiene for snølast per sesong. Verdiene er hentet ut i kilo, normalisert på takenes areal og konvertert til Newton. Største snølast i måleperioden ble målt den 22. januar 2024 til 5216 kg. Det tilsvarer en flatelast på  $1,10 \frac{kN}{m^2}$ .

## 5.2.2 Snødybde- og densitetsmålinger

*Tabell 12 Resultater fra snødybdemåling på tak 2 og tak 3 i januar 2024*

| Snødybdemåling |              | Måling 21.01 |           | Måling 23.01 |           |
|----------------|--------------|--------------|-----------|--------------|-----------|
| Tak            | Type         | Dybde (m)    | Tidspunkt | Dybde (m)    | Tidspunkt |
| Tak 3          | Grønt tak    | 0,46         | 12:00     | 0,12         | 12:00     |
| Tak 2          | Referansetak | 0,42         | 12:00     | 0,13         | 12:00     |

Som beskrevet i 4.3.1 ble kun dybdemålingene gjort ved starten av fallisolasjonen til hver av takene anvendt til videre analyse. Disse tilsvarer punkt 4 i Figur 23 og 10 i Figur 24. Snødybdene som ble målt den 21. og 23. januar 2024 står oppført i tabellen over.

*Tabell 13 Resultater fra densitetsmåling fra mark i januar 2024*

| Densitetsmåling | Måling 21.01 |           |                               |           | Måling 23.01 |           |                               |           |
|-----------------|--------------|-----------|-------------------------------|-----------|--------------|-----------|-------------------------------|-----------|
| Lokasjon        | Dybde (m)    | Vekt (kg) | Densitet (kg/m <sup>3</sup> ) | Tidspunkt | Dybde (m)    | Vekt (kg) | Densitet (kg/m <sup>3</sup> ) | Tidspunkt |
| Mark 1          | 0,48         | 0,159     | 190,93                        | 12:00     | 0,37         | 0,145     | 225,88                        | 11:40     |
| Mark 2          | 0,50         | 0,164     | 189,05                        | 12:00     | 0,39         | 0,148     | 218,73                        | 11:40     |
| Gjennomsnitt    |              |           | <b>189,99</b>                 |           |              |           | <b>222,31</b>                 |           |

Snødensiteten målt hver av dagene står oppført i Tabell 13. Den viser en snødensitet på omtrent 190 kg/m<sup>3</sup> den 21. januar, rett etter et større snøfall. Etter to dager med varmere temperaturer opp mot 8 °C, økte snødensiteten til 222,3 kg/m<sup>3</sup> den 23. januar.

### 5.2.3 Validering av estimert snølast på de grønne takene

Tabell 14 viser resultatet av beregnet snøvekt på takene utfra snødensitets- og dybdemålinger gjennomført 21. januar 2024, mot registrert vekt på tak estimert etter metode beskrevet i 4.3.

**Tabell 14** Estimert snølast på tak beregnet etter volum av snø og snødensitet 21.01 sammenlignet med vekt av snø estimert etter metode 4.3.

| Måling 21.01                |                  |                                     |                                  |                                |                       |
|-----------------------------|------------------|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| <i>Tak</i>                  | <i>Dybde [m]</i> | <i>Volum av snø [m<sup>3</sup>]</i> | <i>Estimert vekt av snø [kg]</i> | <i>Registrert snøvekt [kg]</i> | <i>Differanse [%]</i> |
| <b>Tak 2 - referansetak</b> | 0,42             | 24,44                               | 4642,66                          | 3969,51                        | 16,96%                |
| <b>Tak 3 - grønt tak</b>    | 0,46             | 26,77                               | 5086,89                          | 3969,51                        | 28,15 %               |
| <b>Differanse (%)</b>       |                  |                                     | 9,57 %                           |                                |                       |

Basert på beregning av volumet av snøen på takene, avviker mengden snø på det grønne taket med 9,57 % i forhold til referansetaket. Den 21.januar 2024 lå det altså 6,71% mer snø på grønt tak 3. Snøvolumet inkluderer snø opp til høyeste punkt på fallisolasjonen, snø tilsvarende dybdemålingen den aktuelle dagen og snø på parapet den 21.januar.

Registrert snøvekt tilsvarer vekten av snø på taket estimert etter metoden beskrevet i 4.3. Ved samme tidspunkt dybde- og densitetsmålingene ble gjennomført, lå denne på 3969,51 kg. Da metoden i 4.3 innebærer at snølast på de grønne takene settes lik snølasten på referansetaket, står den samme vekten i cellen til tak 3.

Sammenlignet med vekten av snø på beregnet etter metode 4.3, avviker estimert vekt av snø på referansetaket ved volumberegning med 16,69%. På tak 3 avviker estimert vekt av snø med

28,15%. Det anvendes altså en *lavere* vekt i videre analyse, enn det den beregnes til med utgangspunkt i dybde- og densitetsmålingene gjennomført 21. januar.

Tabell 15 viser resultatet av beregnet snøvolum på takene utfra snødensitets- og dybdemålinger gjennomført 23. januar 2024 mot registrert vekt på tak estimert etter metode beskrevet i 4.3.

**Tabell 15** Estimert snølast på tak beregnet etter volum av snø og snødensitet 23.01 sammenlignet med vekt av snø estimert etter metode 4.3.

| <b>Måling 23.01</b>         |                  |                          |                                  |                                |                       |
|-----------------------------|------------------|--------------------------|----------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| <i>Tak</i>                  | <i>Dybde [m]</i> | <i>Volum av snø [m³]</i> | <i>Estimert vekt av snø [kg]</i> | <i>Registrert snøvekt [kg]</i> | <i>Differanse [%]</i> |
| <b>Tak 2 - referansetak</b> | 0,12             | 10,31                    | 2291,91                          | 2904,29                        | 21,09 %               |
| <b>Tak 3 - grønt tak</b>    | 0,13             | 9,53                     | 2118,52                          | 2904,29                        | 27,06 %               |
| <b>Differanse (%)</b>       |                  |                          | 7,57 %                           |                                |                       |

Basert på beregning av volumet av snøen på takene, avviker mengden snø på det grønne taket med 7,57 % i forhold til referansetaket. Den 23.januar 2024 lå det altså 7,57% mindre snø på grønt tak 3 enn metode i 4.3 tilsier. Snøvolumet inkluderer snø opp til høyeste punkt på fallisolasjonen og snø tilsvarende dybdemålingen den aktuelle dagen. Det lå ikke snø på parapet ved måling 23. januar 2024.

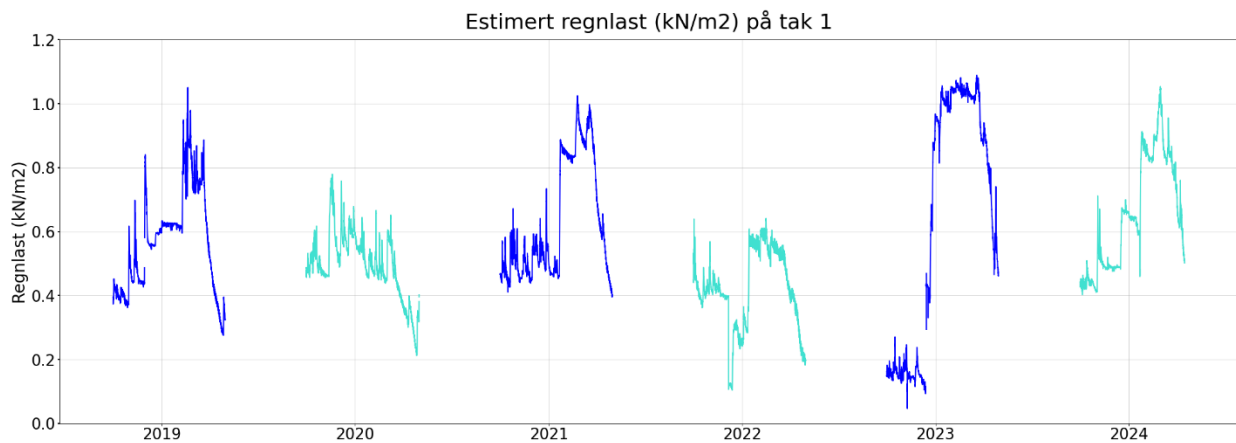
Registrert snøvekt tilsvarer vekten av snø på taket estimert etter metoden beskrevet i 4.3. Ved samme tidspunkt dybde- og densitetsmålingene ble gjennomført, lå denne på 2904,29 kg.

Sammenlignet med vekten av snø på beregnet etter metode 4.3, avviker estimert vekt av snø på referansetaket ved volumberegning med 21,09%. På tak 3 avviker estimert vekt av snø med 27,06%. Det anvendes altså en *høyere* vekt i videre analyse, enn det den beregnes til med utgangspunkt i dybde- og densitetsmålingene gjennomført 21. januar.



## 5.3 Last fra vannmetning over vintersesong

### 5.3.1 Estimert vannlast (kN/m<sup>2</sup>) på tak 1 og tak 3



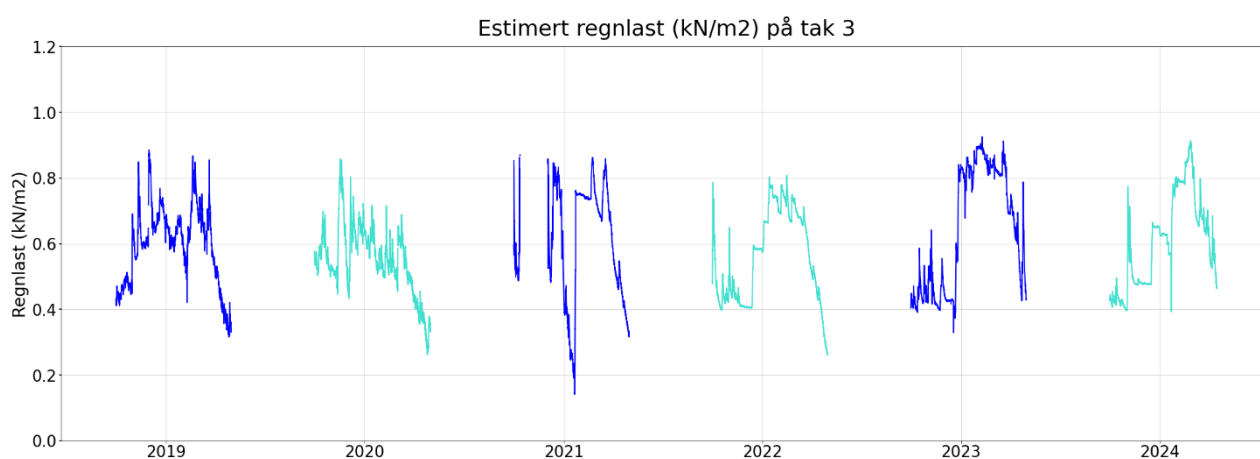
**Figur 43** Estimert vannlast (kN/m<sup>2</sup>) over målte vintersesonger for tak 1

Figur 43 illustrerer variasjonen av vannlast på tak 1 for alle de registrerte vintersesongene. Vannlasten er et resultat av total nedbørslast fratrukket estimert snølast, som beskrevet i 4.4 og med Formel 12. Det kraftige fallet i vannlast over vintersesongen 2021-2022 kan ikke forklares naturlig, og vannlast forventes å ligge på et høyere nivå etter dette punktet. Hoppet i verdier for vannlast over vintersesongen 2022-2023 kan ikke forklares naturlig, og vannlast forventes å ligge på et lavere nivå etter dette punktet. Estimert maksimal vannlastverdi for disse to sesongene er derfor ikke inkludert i resultatene.

**Tabell 16** Estimert maksimal vannlast per vintersesong for tak 1

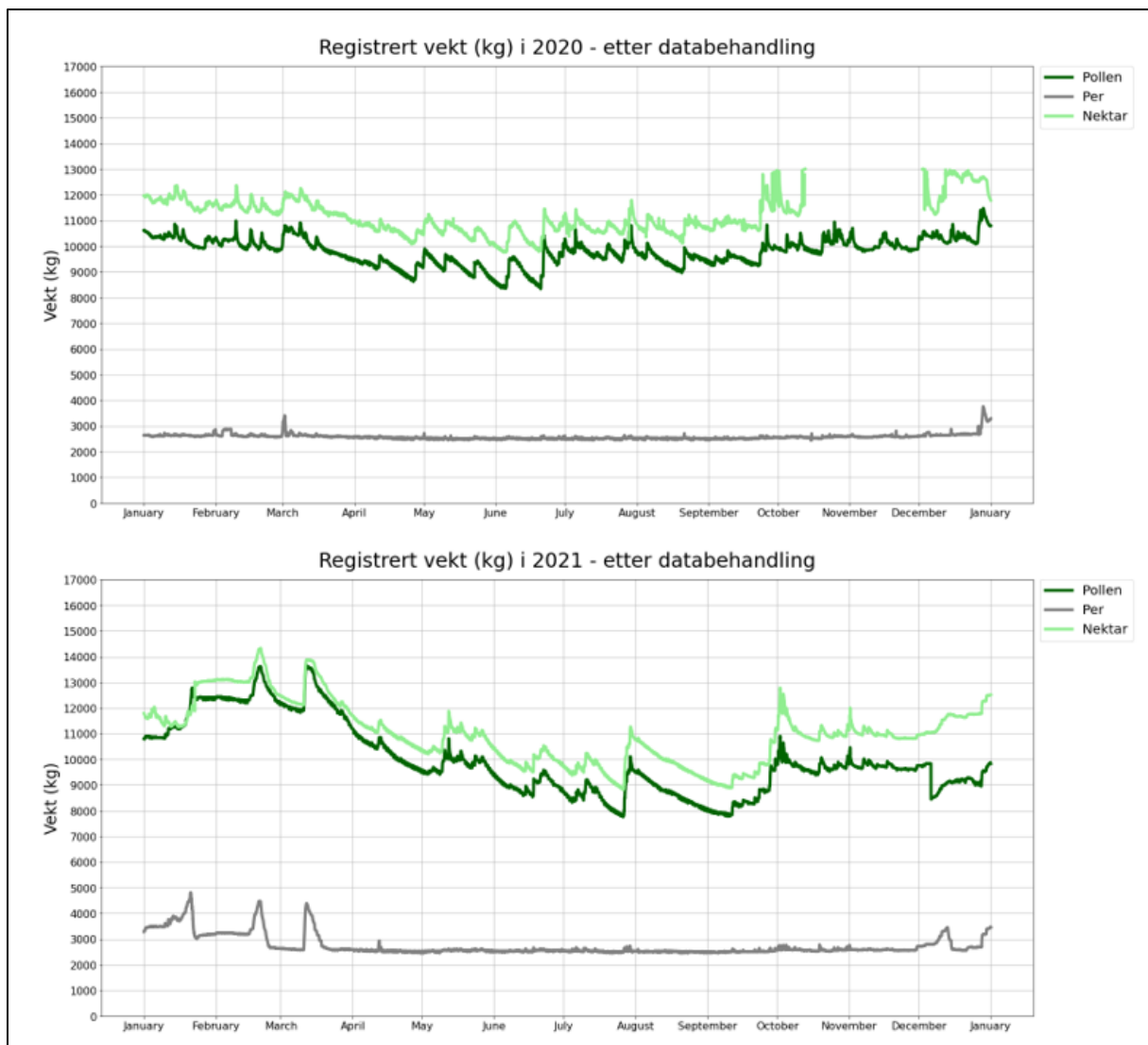
| Vintersesong | Tak 1 – estimert maksimal vannlast |                      |                      | Snølast ved maksimal vannlast |                   | Tidspunkt  |
|--------------|------------------------------------|----------------------|----------------------|-------------------------------|-------------------|------------|
|              | [kg]                               | [kg/m <sup>2</sup> ] | [kN/m <sup>2</sup> ] | [kN/m <sup>2</sup> ]          | % av total nedbør |            |
| 2018-2019    | 4 992                              | 107,1                | 1,05                 | 0,07                          | 6,2%              | 19.02.2019 |
| 2019-2020    | 3 704                              | 79,5                 | 0,78                 | 0,04                          | 4,9%              | 19.11.2019 |
| 2020-2021    | 4 870                              | 104,5                | 1,03                 | 0,06                          | 5,5%              | 24.02.2021 |
| 2021-2022    | -                                  | -                    | -                    | -                             | -                 | 15.02.2022 |
| 2022-2023    | -                                  | -                    | -                    | -                             | -                 | 20.03.2023 |
| 2023-2024    | 5 005                              | 107,4                | 1,05                 | 0,05                          | 4,5%              | 29.02.2024 |

Tabell 16 viser estimert maksimal vannlast for grønt tak 1, for hver målt vintersesong. Vannlast er last fra fuktighet lagret i sedummattene og LECAen. Den største estimerte vannlasten oppstod i slutten av februar 2024, på 1,05 (kN/m<sup>2</sup>). Snølastens andel av total nedbørslast når sesongens største vannlast inntreffer, ligger i intervallet 4,5-6,2%.



**Figur 44** Estimert vannlast (kN/m<sup>2</sup>) over målte vintersesonger for tak 3

Figur 44 illustrerer variasjonen av vannlast på tak 3 for alle de registrerte vintersesongene. I starten av vintersesongen 2020-2021 gjør vektregistreringene et unaturlig hopp i begynnelsen av oktober. Deretter mangler det data fra perioden rundt 15.oktober til 1.desember 2020. Likevel indikerer grafene i Figur 45 nedenfor, at vektverdiene for tak 3 justerer seg tilbake til et nivå tilsvarende før registreringsstøyet, fra og med siste del av januar. Dermed anvendes maksimumsregistreringer for denne perioden videre.



**Figur 45** Vekt registrert på alle tre tak i 2020 og 2021

**Tabell 17** Estimert maksimal vannlast per vintersesong for tak 3

| Vintersesong     | Tak 3 – estimert maksimal vannlast |                      |                      | Snølast ved maksimal regnlast |                   | Tidspunkt  |
|------------------|------------------------------------|----------------------|----------------------|-------------------------------|-------------------|------------|
|                  | [kg]                               | [kg/m <sup>2</sup> ] | [kN/m <sup>2</sup> ] | [kN/m <sup>2</sup> ]          | % av total nedbør |            |
| <b>2018-2019</b> | 4 207                              | 90,3                 | 0,89                 | 0,04                          | 4,3%              | 30.11.2018 |
| <b>2019-2020</b> | 4 078                              | 87,5                 | 0,86                 | 0,04                          | 4,5%              | 17.11.2019 |
| <b>2020-2021</b> | 4 095                              | 87,9                 | 0,86                 | 0,14                          | 14%               | 22.02.2021 |
| <b>2021-2022</b> | 3 835                              | 82,3                 | 0,81                 | 0,04                          | 4,7%              | 15.02.2022 |
| <b>2022-2023</b> | 4 398                              | 94,4                 | 0,93                 | 0,08                          | 8,0%              | 08.02.2023 |
| <b>2023-2024</b> | 4 341                              | 93,2                 | 0,91                 | 0,08                          | 8,0%              | 26.02.2024 |

Tabell 17 viser vintersesongenes estimerte maksimale vannlast for grønt tak 3. Den største vannlasten forekom over vintersesongen 2022-2023 i starten av februar, på 0,93 kN/m<sup>2</sup>. Snølastens andel av total nedbørslast når sesongens største vannlast inntreffer, ligger i intervallet 4,3-14,0%.

### 5.3.2 Vannlast ved inngang til vinter

Tabell 18 Vannlastnivå på tak 1 og tak 3 ved inngang til vinter

| Sesong    | TAK 1                                     |                            |                                     | TAK 3                                     |                            |                                     |
|-----------|---|----------------------------|-------------------------------------|---|----------------------------|-------------------------------------|
|           | Variasjon i november [kN/m <sup>2</sup> ] | % av vannlagringskapasitet | Lastnivå 01.12 [kN/m <sup>2</sup> ] | Variasjon i november [kN/m <sup>2</sup> ] | % av vannlagringskapasitet | Lastnivå 01.12 [kN/m <sup>2</sup> ] |
| 2018-2019 | 0,43-0,70                                 | 44-71%                     | 0,84                                | 0,55-0,85                                 | 56-87%                     | 0,88                                |
| 2019-2020 | 0,46-0,78                                 | 47-80%                     | 0,53                                | 0,46-0,86                                 | 47-88%                     | 0,48                                |
| 2020-2021 | 0,44-0,61                                 | 45-62%                     | 0,55                                | -   | -                          | -                                   |
| 2021-2022 | 0,39-0,57                                 | 40-58%                     | 0,40                                | 0,40-0,65                                 | 41-66%                     | 0,41                                |
| 2022-2023 | -   | -                          |                                     | 0,40-0,64                                 | 41-65%                     | 0,45                                |
| 2023-2024 | 0,41-0,71                                 | 42-72%                     | 0,49                                | 0,40-0,77                                 | 41-79%                     | 0,48                                |

Tabell 18 gir en oversikt over vannlastnivået i de grønne takene ved inngang til vinteren. Første kolonne for hvert tak gir variasjonen av vannlast over oktober måned. Den viser at vannlasten varierer fra 0,39 og opp til 0,78 [kN/m<sup>2</sup>] for tak 1 og fra 0,40 til 0,86 [kN/m<sup>2</sup>] for tak 3 i løpet av høstens siste måned november. Med utgangspunkt i takenes vannlagringskapasitet på 0,981 [kN/m<sup>2</sup>], er variasjonens andel av kapasiteten i prosent presentert i neste kolonne. Vannlastnivå ved inngang til første vintermåned presenteres i siste kolonne. For de fleste sesonger er omtrent 41-56% av takets vannlagringskapasitet på 0,981 kN/m<sup>2</sup> er utnyttet ved inngang til vinteren.

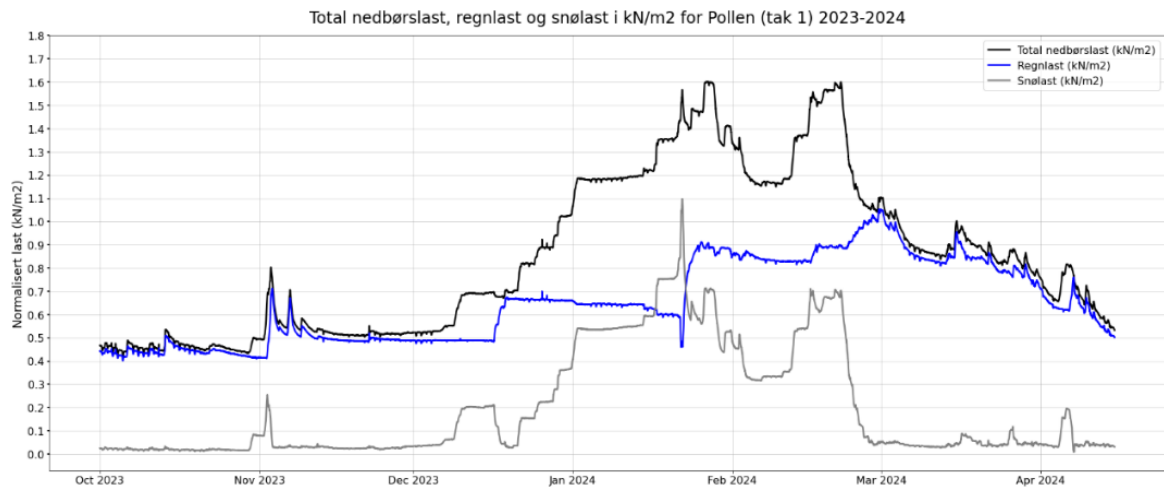
Vannlastnivå ved inngang til vintersesong 2018-2019 ligger relativt høyt for begge takene i forhold til i resten av sesongene. Vannlasten faller likevel betraktelig en uke ut i desember og stabiliserer seg på henholdsvis minst 0,5 og 0,65 [kN/m<sup>2</sup>] ut resten av vinteren. Dette gjelder for alle de andre sesongene og begge tak også; vannlasten synes ikke å falle under nivåene presentert under «Vannlastnivå 01.12 [kN/m<sup>2</sup>]» ut hele vintersesongen frem til mars måned. Denne lasten opptrer tilsynelatende som en permanent last over vinteren.

### 5.3.3 Vintersesong med største estimerte vannlast på tak 1 – 2023 til 2024

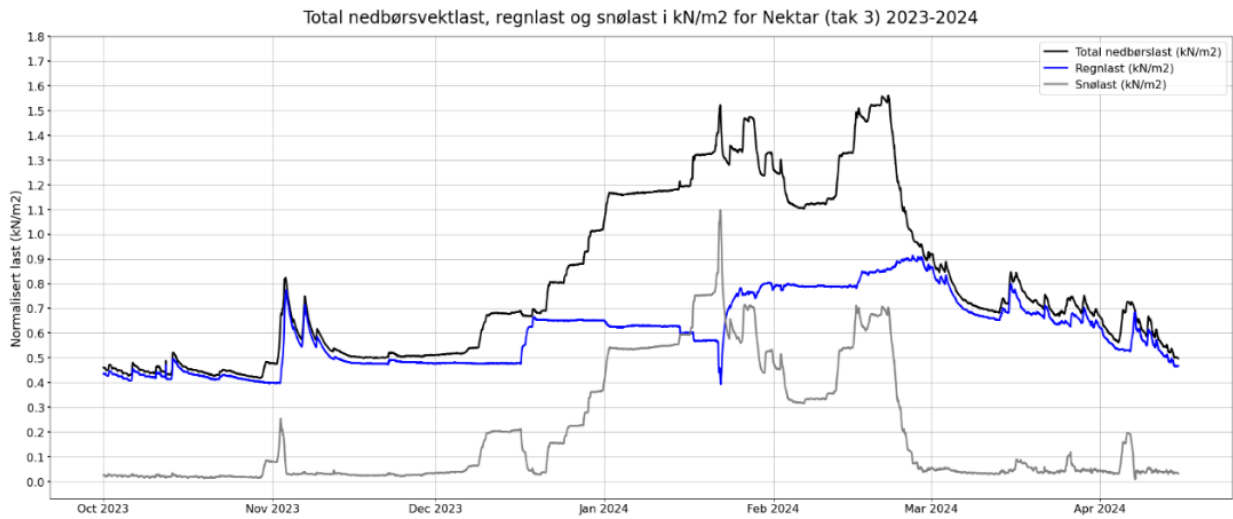
Figur 46, Figur 47, Figur 48 og Figur 49 presentert under skal sees i sammenheng. Figur 46 og Figur 47 viser en tidsserie fra perioden oktober 2023 til mai 2024 med total nedbørslast, snølast og vannlast for begge de grønne takene, tak 1 og tak 3. Høyeste estimerte vannlast for tak 1 forekommer i denne perioden. Det gjør også den største snølasten for hele prosjektets måleperiode.

Total nedbørslast består av snølast og vannlast i henhold til metode beskrevet i kapittel 4.2 og 4.4. Vannlast er resultatet av vektregistreringene fra hvert tak, fratrukket egenlasten til det respektive taket og snølasten på referansetakene ved samsvarende tidspunkt, beskrevet i kapittel 4.4.

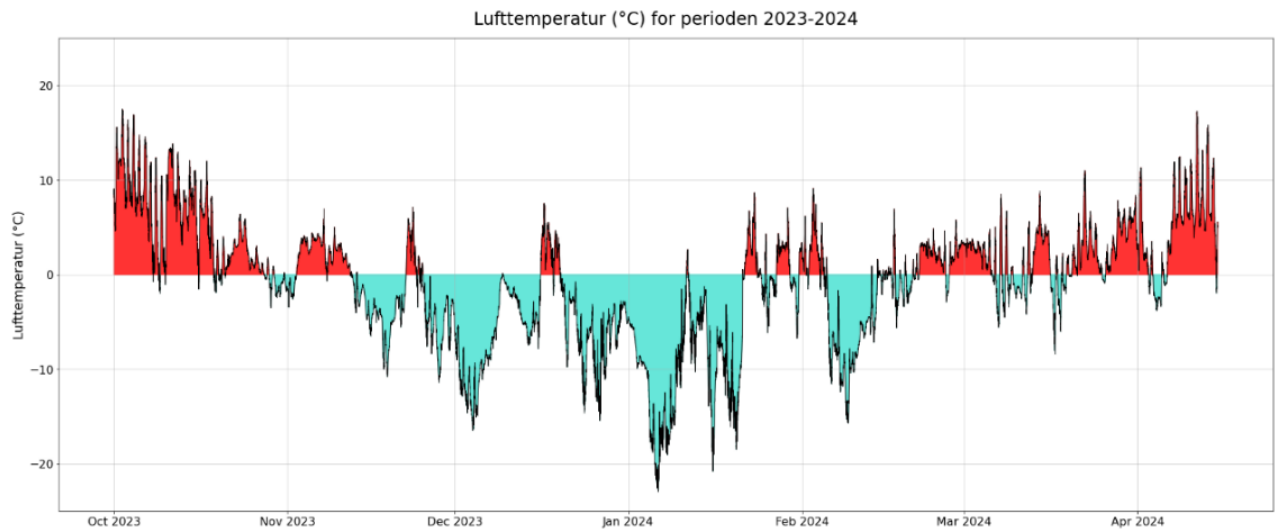
For samme periode viser Figur 48 lufttemperaturen i °C og Figur 49 døgnedbør målt ved Søråsjordet i Ås, i millimeter.



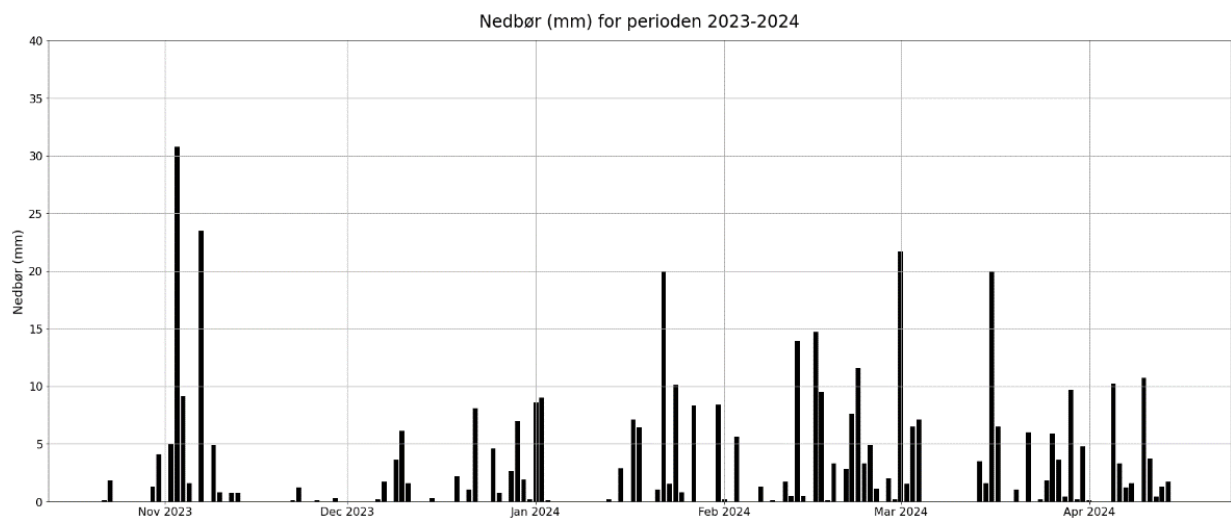
**Figur 46** Total nedbørslast, vannlast og snølast (kN/m<sup>2</sup>) for tak 1 vintersesong 2023-2024



**Figur 47** Total nedbørslast, vannlast og snølast (kN/m<sup>2</sup>) for tak 3 vintersesong 2023-2024



**Figur 48** Lufttemperatur vintersesong 2023-2024



**Figur 49** Døgnnedbør vintersesong 2023-2024

Figur 46 og Figur 47 viser en vannlast på mellom henholdsvis 0,40 og 0,50 i overgangen fra sen høst til vinter. I månedsskifte oktober/november begynner en periode med større mengder nedbør, opp mot 31 mm dagen. I kombinasjon med sesongens første minusgrader øker dette totallasten på de grønne takene.

Et par dager ut i november øker temperaturen og ligger på rundt 4-5 °C, som gjør at store deler av snøen smelter og vannlasten øker opp mot øvre sjikt av takenes teoretiske vannmetningsgrad,



rundt 0,8. Last fra denne fuktigheten forsvinner i avrenning og evapotranspirasjon til omgivelsene frem mot like før 15.november, da stabiliserer den seg på 0,5.

Videre går det en lenger periode uten store mengder nedbør, med temperaturer hovedsakelig ned mot -10 °C. Først mot midten av desember faller det nedbør i form av snø, som øker totallasten på takene, mens vannlasten forholder seg stabil. Snølasten materialiserer seg i økt vannlast over en 4-5 dager periode med plussgrader opp mot 7 °C i midten av desember.

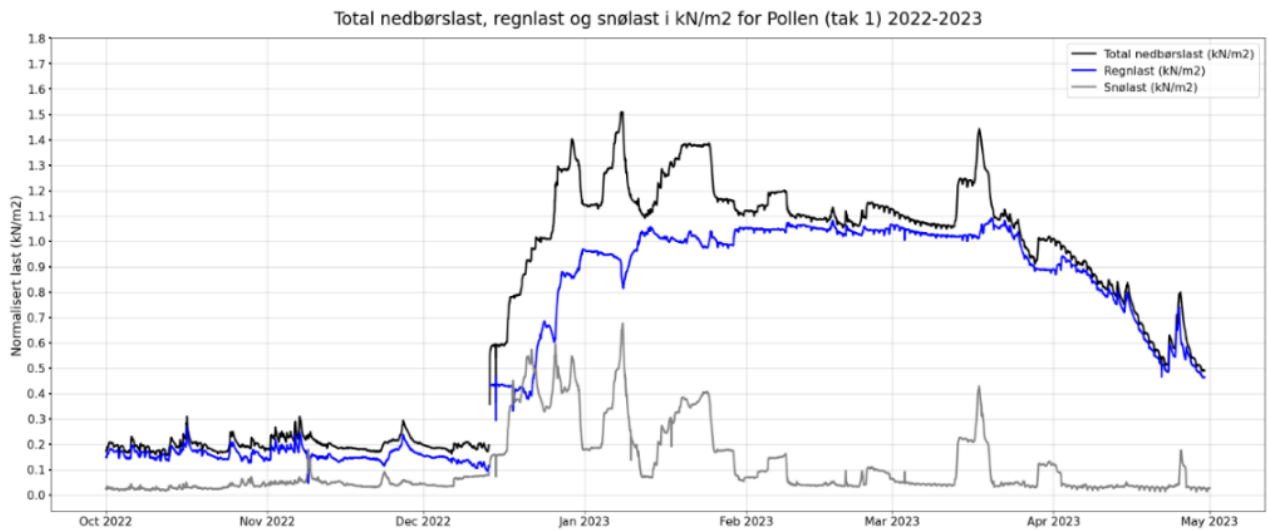
Videre inntreffer største snølast på takene den 22. januar på 1,1 (kN/m<sup>2</sup>). Samtidig faller vannlasten betraktelig med omtrent 0,15 fra sitt stabile nivå på rundt 0,6, selv etter en lengre perioder med minusgrader. Dette kan indikere at det trekkes fra en større snølast på grønne takene enn det reelt sett ligger der. Like etterpå går takene gjennom flere tine-sykluser som gjør at vannlasten øker og stabiliserer seg på omtrent 0,8.

I begynnelsen av februar kommer en lengre kuldeperiode med temperaturer på ned mot -16 °C og flere nedbørsdager. Takene når sin maksimale nedbørslast i slutten av februar på og største estimerte vannlast for tak 1 oppstår den 29. februar på 1,05(kN/m<sup>2</sup>). Dette er over takenes teoretiske vannmetningskapasitet på 1,0(kN/m<sup>2</sup>) og tak 1 kan vurderes som overmettet.

### **5.3.4 Vintersesong med største estimerte vannlast på tak 3 – 2022 til 2023**

Figur 50, Figur 51, Figur 52 og Figur 53 presentert under skal, som i forrige delkapittel, også sees i sammenheng. Figur 50 og Figur 51 viser en tidsserie fra perioden oktober 2022 til mai 2023 med total nedbørslast, snølast og vannlast for de grønne takene, tak 1 og tak 3. Høyeste estimerte vannlast på tak 3 forekommer i denne perioden.

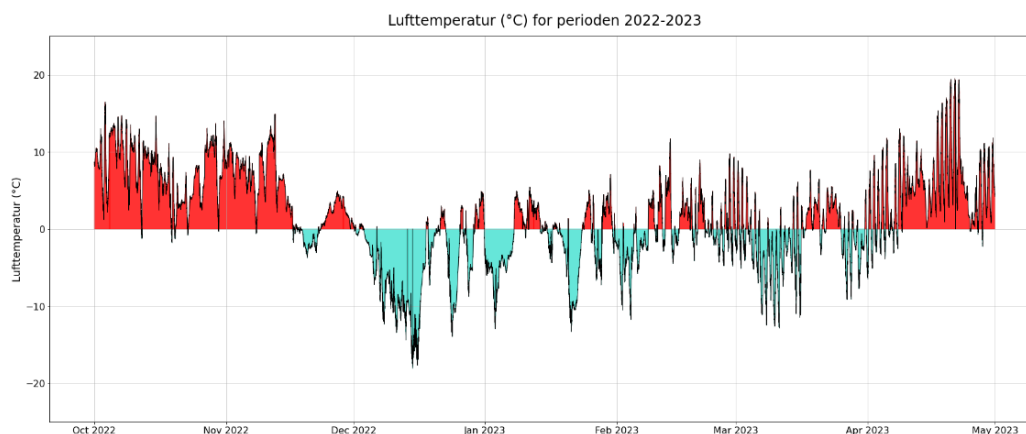
For samme periode viser Figur 52 lufttemperaturen i °C og Figur 53 døgnet nedbør i millimeter, målt på Søråsjordet i Ås.



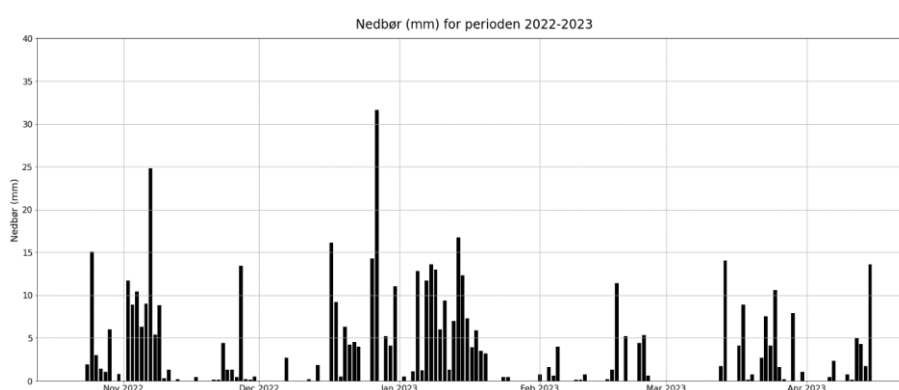
**Figur 50** Total nedbørslast, vannløst og snøsløst (kN/m<sup>2</sup>) for tak 1 vintersesong 2022-2023



**Figur 51** Total nedbørslast, vannløst og snøsløst (kN/m<sup>2</sup>) for tak 3 vintersesong 2022-2023



**Figur 52** Lufttemperatur vintersesong 2022-2023



**Figur 53** Døgnnedbør vintersesong 2022-2023

For begge tak, men spesielt for tak 1, observeres det et betydelig hopp i verdiene rundt midten av desember. For tak 1 hopper verdiene opp mot  $0,18(\text{kN}/\text{m}^2)$ . Dette kan ikke forklares naturlig, utover forhold rundt eller med måleapparatene. Fra midten av desember beskrives derfor resultatene med utgangspunkt i absoluttverdiene til tak 3, men med hvordan vannlasten opptrer i begge takene.

Figur 50 og Figur 51 viser en vannlast på mellom henholdsvis  $0,15$  og  $0,3$ , og  $0,4$  og  $0,55$  i overgangen fra sen høst til vinter. Fra midten av oktober og ut den første uken i november falt det større mengder nedbør som regn, som økte vannlasten i takene noe. Regnfallet gjorde større utslag på tak 3 enn tak 1.

Fuktigheten reduseres frem til midten av november. Da inntraff de første minusgradene over en periode på omtrent fem dager. I denne perioden var det ikke betydelig med nedbør og vannlasten holdt seg stabil på omtrent  $0,17$  for tak 1 og  $0,4$  for tak 3.

I slutten av november kom det en periode med plussgrader opp mot 6 °C og dager med opp mot 14 mm nedbør. Dette økte vannlasten på begge takene. Store mengder av denne forsvant i avrenning eller evapotranspirasjon frem mot en lengre kuldeperiode som startet i begynnelsen av desember, med temperaturer ned mot -18 °C.

Rundt 5. desember kommer det nedbør i form av snø, som gjør at totallasten på takene øker, men ikke vannlasten. Dette indikerer at vannlasten har fryst i de grønne takelementene. Økning av vannlast oppstår først like etter midten av desember, når flere kortere perioder med varmere temperaturer på mellom 1 - 4 °C inntreffer.

Takene når øvre sjikt av sin vannlagringskapasitet på 0,981(kN/m<sup>2</sup>) i slutten av desember.

Det samme gjentar seg i begynnelsen av januar, under en periode med nedbørsmengder opp mot 13 mm dagen og temperaturer ned mot -12 °C. Totallasten på takene øker i form av snølast, men ikke vannlast.

Største snølast vintersesongen 2022-2023 blir registrert den 8. januar til 0,68 (kN/m<sup>2</sup>). Ved samme tidspunkt oppstår det et fall i vannlast til godt under det stabile nivået på rundt 0,75 (kN/m<sup>2</sup>) som taket har hatt i starten av januar, under minusgrader.

Over flere tine- og frysesykluser når tak 3 sesongens høyeste estimerte vannlast på 0,93 (kN/m<sup>2</sup>) den 8. februar.

### 5.3.5 Samtidighet mellom snølast og vannlast

*Tabell 19 Dato for sesongenes maksimale vannlast i forhold til maksimale snølast*

| Sesong    | Tidspunkt for maksimal snølast | Tidspunkt for maksimal vannlast |                                  |            |                                  |
|-----------|--------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|
|           | Referansetak                   | Tak 1                           | FØR eller ETTER maksimal snølast | Tak 3      | FØR eller ETTER maksimal snølast |
| 2018-2019 | 09.02.2019                     | 19.02.2019                      | ETTER                            | 30.11.2018 | FØR                              |
| 2019-2020 | 03.12.2019                     | 19.11.2019                      | FØR                              | 17.11.2019 | FØR                              |
| 2020-2021 | 21.01.2021                     | 24.02.2021                      | ETTER                            | 22.02.2021 | ETTER                            |
| 2021-2022 | 11.01.2022                     | 15.02.2022                      | ETTER                            | 15.02.2022 | ETTER                            |
| 2022-2023 | 08.01.2023                     | 20.03.2023                      | ETTER                            | 08.02.2023 | ETTER                            |
| 2023-2024 | 22.01.2024                     | 29.02.2024                      | ETTER                            | 26.02.2024 | ETTER                            |

Tabell 19 inneholder dato for når sesongenes maksimale snølast og vannlast inntraff. Kolonnene ved siden av datokolonnene for de grønne takene, tak 1 og tak 3, stadfester om maksimal vannlast for sesongen inntraff før eller etter sesongens maksimale snølast. For de to første sesongene oppstod største vannlast før største snølast for tak 3 og en av sesongene for tak 1. Utover dette indikerer resultatene at maksimal vannlast i de grønne takene opptrer etter at største snølast for sesongen har inntruffet.

**Tabell 20** Tidsforskjell mellom største snølast og påfølgende største vannlast

| Sesong    | Tidspunkt for maksimal snølast | Tidspunkt for påfølgende største vannlast |                    |            |                    |
|-----------|--------------------------------|---|--------------------|------------|--------------------|
|           | Referansetak                   | Tak 1                                     | Differanse [dager] | Tak 3      | Differanse [dager] |
| 2018-2019 | 09.02.2019                     | 19.02.2019                                | 10                 | 19.02.2019 | 10                 |
| 2019-2020 | 03.12.2019                     | 06.12.2019                                | 3                  | 06.12.2019 | 3                  |
| 2020-2021 | 21.01.2021                     | 22.01.2021                                | 1                  | 22.01.2021 | 1                  |
| 2021-2022 | 11.01.2022                     | 14.01.2022                                | 3                  | 13.01.2022 | 2                  |
| 2022-2023 | 08.01.2023                     | 13.01.2023                                | 5                  | 12.01.2023 | 4                  |
| 2023-2024 | 22.01.2024                     | 25.02.2024                                | 3                  | 29.01.2024 | 7                  |

Tabell 20 inneholder dato for de målte vintersesongenes største snølast. Dato for den påfølgende største vannlasten er hentet ut for hvert tak og differansen mellom dato for største snølast og dato for påfølgende største vannlast er beregnet. Den påfølgende største regnlasten er ikke nødvendigvis den største for vintersesongen, men det er den største regnlasten før neste snøfall inntreffer.

Resultatene indikerer at største påfølgende regnlast inntreffer et varierende antall dager etter største snølast, mellom 1 til 10 dager etterpå. Overordnet tenderer påfølgende største regnlast å inntreffe etter at sesongens største snølast har inntruffet.

### 5.3.6 Vannlast ved maksimal snølast

*Tabell 21 Vannlast ved tidspunkt for sesongens maksimale snølast*

| Sesong    | Maksimal snølast [kN/m <sup>2</sup> ] | Tidspunkt  | Tak 1                |                  |                            | Tak 3                |                  |                            |
|-----------|---------------------------------------|------------|----------------------|------------------|----------------------------|----------------------|------------------|----------------------------|
|           |                                       |            | [kN/m <sup>2</sup> ] | % av nedbørslast | % av vannlagringskapasitet | [kN/m <sup>2</sup> ] | % av nedbørslast | % av vannlagringskapasitet |
| 2018-2019 | 1,09                                  | 09.02.2019 | 0,62                 | 36 %             | 63 %                       | 0,42                 | 28 %             | 43 %                       |
| 2019-2020 | 0,39                                  | 03.12.2019 | 0,74                 | 65 %             | 75 %                       | 0,66                 | 63 %             | 67 %                       |
| 2020-2021 | 0,50                                  | 21.01.2021 | 0,48                 | 49 %             | 49 %                       | -                    | -                | -                          |
| 2021-2022 | 0,40                                  | 11.01.2022 | -                    | -                | -                          | 0,42                 | 51 %             | 43 %                       |
| 2022-2023 | 0,68                                  | 08.01.2023 | -                    | -                | -                          | 0,48                 | 42 %             | 49 %                       |
| 2023-2024 | 1,10                                  | 22.01.2024 | 0,47                 | 30 %             | 48 %                       | 0,42                 | 28 %             | 43 %                       |

Tabell 21 gir en oversikt over vannlast på de grønne takene da sesongens største snølast inntraff. Vannlasten utgjorde mellom 28-67% av den totale nedbørslasten. Maksimalt 75% av vannlagringskapasiteten på 0,981 kN/m<sup>2</sup> var utnyttet, samtidig som maksimal snølast inntraff.



## 5.4 Beregningseksempel: dimensjonerende lastsituasjon ved ny grønn takoppbygging

### 5.4.1 Lett takkonstruksjon i massivtre

|   |                                       |
|---|---------------------------------------|
| Egenlast til eksisterendekonstruksjon uten grønt tak: | $g_{Ek,A} = 1,65 \text{ kN/m}^2$      |
| Egenlast til grønt tak i full vannmetning:            | $g_{Ek,B100\%} = 2,01 \text{ kN/m}^2$ |
| Egenlast til grønt tak i 56% vannmetning:             | $g_{Ek,B56\%} = 1,58 \text{ kN/m}^2$  |
| Nyttelast på tak i 1994:                              | $q_{Ek,1994} = 1,0 \text{ kN/m}^2$    |
| Nyttelast på tak i 2024:                              | $q_{Ek,2024} = 2,0 \text{ kN/m}^2$    |
| Snølast i 1994:                                       | $S_{Ek,1994} = 2,0 \text{ kN/m}^2$    |
| Snølast i 2024:                                       | $S_{Ek,2024} = 2,8 \text{ kN/m}^2$    |

Den mest ugunstige lastsituasjonen av  $p_{Ed,1}$  og  $p_{Ed,2}$  vil være dimensjonerende for takkonstruksjonen som beskrevet i 2.2.7, hvor:

$$p_{Ed,1} = [\gamma_g \times g_{Ek,A} + \gamma_g \times g_{Ek,B}] + [\gamma_q \times \psi_{0,1} \times q_{Ek,1}]$$

$$p_{Ed,2} = [\xi \times \gamma_g \times g_{Ek,A} + \xi \times \gamma_g \times g_{Ek,B}] + [\gamma_q \times q_{Ek,1}]$$

**Dimensjonerende lastsituasjon i 1994, før etablering av grønn takoppbygging:**

$$g_{Ek,A} = 1,65 \text{ kN/m}^2$$

$$g_{Ek,B} = 0 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{Ek,1} = \text{maks av } \{q_{Ek,1994} \text{ eller } S_{Ek,1994}\} \text{ kN/m}^2 = \text{maks av } \{2,0 \text{ eller } 2,0\} \text{ kN/m}^2 = 2,0 \text{ kN/m}^2$$

$$p_{Ed,1} = [1,35 \times 1,65 + 1,35 \times 0] + [1,50 \times 0,7 \times 2,0] = 4,33 \text{ kN/m}^2$$

$$p_{Ed,2} = [1,20 \times 1,65 + 1,20 \times 0] + [1,50 \times 2,0] = 4,98 \text{ kN/m}^2$$

Bærekonstruksjonen skal være dimensjonert for en last på 4,98 kN/m<sup>2</sup> per i dag og før etablering av ny grønn takoppbygging.

**Dimensjonerende lastsituasjon i 2023, etter etablering av grønn takoppbygging, med dagens dimensjoneringspraksis iht. NS3840:**

$$g_{Ek,A} = 1,65 \text{ kN/m}^2$$

$$g_{Ek,B} = g_{Ek,B100\%} = 2,01 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{Ek,1} = \text{maks av } \{q_{Ek,2024} \text{ eller } S_{Ek,2024}\} \text{ kN/m}^2 = \text{maks av } \{2,0 \text{ eller } 2,8\} \text{ kN/m}^2 = 2,8 \text{ kN/m}^2$$

$$p_{Ed,1} = [1,35 \times 1,65 + 1,35 \times 2,01] + [1,50 \times 0,7 \times 2,8] = 7,88 \text{ kN/m}^2$$

$$p_{Ed,2} = [1,20 \times 1,65 + 1,20 \times 2,01] + [1,50 \times 2,8] = 8,59 \text{ kN/m}^2$$

Bærekonstruksjonen må dimensjoneres for en last på 8,59 kN/m<sup>2</sup> ved etablering av ny grønn takoppbygging i dag, iht. NS3840.

**Dimensjonerende lastsituasjon i 2023, etter etablering av grønn takoppbygging, med 56% av utnyttet vannlagringskapasitet som permanent last:**

$$g_{Ek,A} = 1,65 \text{ kN/m}^2$$

$$g_{Ek,B} = g_{Ek,B56\%} = 1,58 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{Ek,1} = \text{maks av } \{q_{Ek,2024} \text{ eller } S_{Ek,2024}\} \text{ kN/m}^2 = \text{maks av } \{2,0 \text{ eller } 2,8\} \text{ kN/m}^2 = 2,8 \text{ kN/m}^2$$

$$p_{Ed,1} = [1,35 \times 1,65 + 1,35 \times 1,58] + [1,50 \times 0,7 \times 2,8] = 7,30 \text{ kN/m}^2$$

$$p_{Ed,2} = [1,20 \times 1,65 + 1,20 \times 1,58] + [1,50 \times 2,8] = 8,08 \text{ kN/m}^2$$

Bærekonstruksjonen må dimensjoneres for en last på 8,08 kN/m<sup>2</sup> ved etablering av ny grønn takoppbygging i dag, med utgangspunkt på en utnyttet vannlagringskapasitet på 56%.

Eksemplet viser at ved etablering av et grønt ekstensivt tak på en eksisterende konstruksjon bygget i 1994, vil bæreevnen måtte økes med  $8,59 / 4,98 = 1,73$ , 73% i forhold til det den opprinnelig ble dimensjonert for. Økningen skyldes økt dimensjonerende snølast og ekstra belastning fra ny grønn takoppbygging.

Dersom taket dimensjoneres med en last fra ny grønn takoppbygging tilsvarende 56% av vannlagringskapasiteten, vil behovet for økt bæreevne være  $8,08 / 4,98 = 1,62$ , 62%. Dette tilsvarer en 11% reduksjon i nødvendig overkapasitet som den eksisterende lette takkonstruksjonen må ha for å bære lasten av ny grønn takoppbygging.

For nye konstruksjoner som bygges etter dagens standard, vil dimensjonerende last på lette konstruksjoner i massivtre kunne reduseres med  $(8,59 - 8,08) / 8,59 = 0,0594$ , 5,94%, med utgangspunkt i resultatene fra forsøktakene.

## 5.4.2 Tung takkonstruksjon i armert plasstøpt betong

**Dimensjonerende lastsituasjon i 1994, før etablering av grønn takoppbygging:**

$$g_{Ek,A} = 6,65 \text{ kN/m}^2$$

$$g_{Ek,B} = 0 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{Ek,1} = \text{maks av } \{q_{Ek,1994} \text{ eller } S_{Ek,1994}\} \text{ kN/m}^2 = \text{maks av } \{2,0 \text{ eller } 2,0\} \text{ kN/m}^2 = 2,0 \text{ kN/m}^2$$

$$p_{Ed,1} = [1,35 \times 6,65 + 1,35 \times 0] + [1,50 \times 0,7 \times 2,0] = 11,08 \text{ kN/m}^2$$

$$p_{Ed,2} = [1,20 \times 6,65 + 1,20 \times 0] + [1,50 \times 2,0] = 10,98 \text{ kN/m}^2$$

Bærekonstruksjonen skal være dimensjonert for en last på 11,08 kN/m<sup>2</sup> per i dag og før etablering av ny grønn takoppbygging.

**Dimensjonerende lastsituasjon i 2023, etter etablering av grønn takoppbygging, med dagens dimensjoneringspraksis iht. NS3840:**

$$g_{Ek,A} = 6,65 \text{ kN/m}^2$$

$$g_{Ek,B} = g_{Ek,B100\%} = 2,01 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{Ek,1} = \text{maks av } \{q_{Ek,2024} \text{ eller } S_{Ek,2024}\} \text{ kN/m}^2 = \text{maks av } \{2,0 \text{ eller } 2,8\} \text{ kN/m}^2 = 2,8 \text{ kN/m}^2$$

$$p_{Ed,1} = [1,35 \times 6,65 + 1,35 \times 2,01] + [1,50 \times 0,7 \times 2,8] = 14,63 \text{ kN/m}^2$$

$$p_{Ed,2} = [1,20 \times 6,65 + 1,20 \times 2,01] + [1,50 \times 2,8] = 14,59 \text{ kN/m}^2$$

Bærekonstruksjonen må dimensjoneres for en last på 14,63 kN/m<sup>2</sup> ved etablering av ny grønn takoppbygging i dag, iht. NS3840.

**Dimensjonerende lastsituasjon i 2023, etter etablering av grønn takoppbygging, med 56% av utnyttet vannlagringskapasitet som permanent last:**

$$g_{Ek,A} = 6,65 \text{ kN/m}^2$$

$$g_{Ek,B} = g_{Ek,B56\%} = 1,58 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{Ek,1} = \text{maks av } \{q_{Ek,2024} \text{ eller } S_{Ek,2024}\} \text{ kN/m}^2 = \text{maks av } \{2,0 \text{ eller } 2,8\} \text{ kN/m}^2 = 2,8 \text{ kN/m}^2$$

$$p_{Ed,1} = [1,35 \times 6,65 + 1,35 \times 1,58] + [1,50 \times 0,7 \times 2,8] = 14,05 \text{ kN/m}^2$$

$$p_{Ed,2} = [1,20 \times 6,65 + 1,20 \times 1,58] + [1,50 \times 2,8] = 14,08 \text{ kN/m}^2$$

Bærekonstruksjonen må dimensjoneres for en last på 14,08 kN/m<sup>2</sup> ved etablering av ny grønn takoppbygging i dag, med utgangspunkt i en utnyttet vannlagringskapasitet på 56%.

Eksemplet viser at ved etablering av et grønt ekstensivt tak på en eksisterende konstruksjon bygget i 1994, vil bæreevnen måtte økes med  $14,63 / 11,08 = 1,32$ , 32% i forhold til det den opprinnelig ble dimensjonert for. For en tung takkonstruksjon vil lastøkningen fra en ny grønn takoppbygging ha en mindre effekt på krav til overkapasitet enn for en lett konstruksjon.

Dersom taket dimensjoneres med en last fra ny grønn takoppbygging tilsvarende 56% av vannlagringskapasiteten, vil behovet for økt bæreevne være  $14,08 / 11,08 = 1,27$ , 27%. Dette tilsvarer en 5% reduksjon i nødvendig overkapasitet som den eksisterende lette takkonstruksjonen må ha for å bære lasten av ny grønn takoppbygging.

For nye konstruksjoner som bygges etter dagens standard, vil dimensjonerende last på tunge konstruksjoner i armert plastøpt betong kunne reduseres med  $(14,63 - 14,08) / 14,63 = 0,0376$ , 3,76%, med utgangspunkt i resultatene fra forsøktakene.

# 6 Diskusjon

## 6.1 Datagrunnlag

Datagrunnlaget denne studien baserer seg på, strekker seg over en periode på 6,5 år. Resultatene fra analyse av denne dataen gir dermed en indikasjon på lastforholdene som utspiller seg i de grønne takene over denne perioden, men vil være mangelfulle når det kommer til representative 50-årslaster som legges til grunn under prosjektering. Videre er det flere forhold som kan spille inn på verdiene som er registrert.

Hendelser som kan ha påvirket vektregistreringene er presentert i Tabell 6. Det virker tilsynelatende ikke til at fyllingsforsøkene høsten 2019 har påvirket vektregistreringene på tak 3 av spesiell betydning relatert til denne studien.

Vektverdiene lastet ned fra NVE Sildre, tar utgangspunkt i summen av punktlasten på de seks veiecellene hvert tak ligger på. Hver veiecelle står fastmontert mellom søylen de er anlagt oppå og bærekonstruksjonen av limtre på undersiden av taket. De kan anses som fast innspente. Ved temperaturvariasjoner hvor materialene montert på veiecellen utvider eller trekker seg sammen, vil dette kunne overføre spenninger til veiecellen som gir utslag på vektregistreringen. Denne effekten fremkommer som mindre dagsvariasjoner i vekten på taket, i perioder hvor det ikke faller nedbør. Dagsvariasjonene forventes at har liten betydning for resultatene presentert i denne oppgave.

Det er uklart hva som har forårsaket de unaturlige hoppene i vektregistreringene på tak 1 over vintersesongene fra 2021-2023 og tak 3 fra 2020-2021. Det kan skyldes problemer med tilkoblingen til flere av vektcellene, som nevnt i Tabell 6. Det skal være tatt hensyn til de unaturlige bevegelsene i presenterte resultater.

Da nedbørmåleren ved forsøksanlegget viser flere feilregistreringer spesielt over vinteren, har nedbørsdata fra Søråsjordet i Ås blitt brukt i analysen. Datagrunnlaget herfra er ikke direkte anvendt på vektdataen fra forsøksanlegget, men benyttet for å gi et komparativt anslag mot nedbør estimert på takene i forbindelse med verifikasjon av estimert egenlast. Søråsjordet ligger på et jorde i relativt åpent landskap, mindre beskyttet mot vind. Det kan derfor tenkes at det

registreres mindre nedbør på denne stasjonen enn ved forsøksanlegget, men ikke i størrelser som har betydning for analysen.



## 6.2 Takmodulenes egenvekt og nedbørslast

Takmodulenes egenvekt er estimert for å kunne finne ut av hvor stor andel av den registrerte vekten ved hver av takene som tilsvarer vekt fra nedbør. De minste vektverdiene registrert ved hvert av takene, presentert i Tabell 8, viser relativt like egenvektverdier for tak 1 og 2 sammenlignet med prosjekterte egenlaster. For tak 3 avviker egenlasten med nesten 14% fra prosjektert verdi, over 1000 kg. Dette kan komme av flere årsaker:

- Tak 3 ble bygget med en større mengde takelementer enn prosjektert
- Feilregistrering i en eller flere av veiecellene til tak 3

Masterstudien om oppbygning av forsøktakene (Øyre & Trommald, 2018) inkluderer en relativt grundig gjennomgang av takenes oppbygning med bilder fra byggefasen. Det er ingenting som tilsier at takene er bygget så ulike, tilsvarende en vektforskjell på over 1000 kg.

Årsaken til at egenvekten til tak 3 er relativt mye større, kan ligge i feilregistrering ved en eller flere av veiecellene til taket. Vektregistreringene frem til 30. august 2018 indikerer store mengder støy. Fra og med denne datoen ligger likevel vektverdiene til tak 3 skalert med rundt 1,15 opp fra tak 1, og varierer rundt denne faktoren ut hele måleperioden. Grafene for de to første vintersesongene i Figur 40 og Figur 41 illustrerer dette. Derfor vil vektverdiene ved fratrekke for egenlasten, uavhengig av om minste registrerte vekt for tak 3 er den reelle egenlasten til taket, fortsatt gi et gyldig grunnlag for videre analyse.

Tabell 8 lister opp tidspunkt for minste registrerte vekt for hvert av takene. Grafene over nedbør og temperatur (Figur 34 og Figur 35 for tak 1, Figur 36 og Figur 37 for tak 2, og Figur 38 og Figur 39 for tak 3), viser minimalt med nedbør og jevnt høye temperaturer i perioden opp mot laveste måling. Analyse av variasjonen rundt egenlastverdiene (Figur 31, Figur 32 og Figur 33) viser også relativt naturlige endringer før og etter måletidspunkt. Basert på disse resultatene er det grunn til å anta at de registrerte verdiene er representative for egenlastene til takene.

Videre er egenlastverdiene for hvert av takene fratrukket vektverdiene for det respektive taket, og resultatene oppsummeres i Figur 29 og Figur 30 som total nedbørslast. Total nedbørslast består av både snølast oppå taket og vannlast i form av fuktighet lagret i de grønne takene.

Største totale nedbørslast ble registrert vintersesongen 2018-2019 på henholdsvis 1,73 kN/m<sup>2</sup> for tak 1 og 1,55 kN/m<sup>2</sup> for tak 3 (Tabell 9 og

Tabell 10).

Forholdet mellom snølast og vannlast når sesongen største nedbørslastinntreffer fordeler seg relativt likt. Stort sett er det en noe større vannlast enn snølast, på mellom 52,7-67,8%. Når sesongens største nedbørslast på taket inntreffer, vil følgelig verken dimensjonert snølast eller vannlast inntreffe. Dette gir grunnlag for en reduksjon av dimensjonert vannlast ved prosjektering av det grønne taket, tilsvarende ned til 67,8% av vannlagringskapasiteten på 0,981 kN/m<sup>2</sup>.

Forskjellen på total nedbørslast mellom de grønne takene kan komme av forskjellige forhold. Med antakelsen om at fratrukket egenlastverdi er korrekt:

- Det ene taket har en større mengde fuktlagrende masse i seg og holder derfor på mer fuktighet
- Vind kan ha påvirket snølasten på takene forskjellig, hvor mer snø kan ha blåst av det ene taket i forhold til det andre.
- Feilregistrering i data

Nedbørslastene på de grønne takene ser over de første årene likevel ut til å samsvare relativt godt (Figur 40 og Figur 41), og er anvendt for videre analyse.

## 6.3 Estimert snølast på de grønne takene

For å estimere hvor stor andel av den estimerte nedbørslasten som består av vannlast lagret i de grønne takene, er det gjort et anslag for snølast på de grønne takene presentert i Figur 42. Det følger flere usikre momenter ved antakelsen om at snølast på de grønne takene tilsvarer snølasten på referansetaket:

- Lavere parapet på de grønne takene gir mer vindpåvirket snølast
- Lavere parapet kan gi mer snøsmelting grunnet mer påvirkning fra kort- og langbølget stråling
- De grønne takenes plassering kan gi andre vindforhold og dermed en annen vindpåvirket snølast

Takkonstruksjonene er i utgangspunktet utformet likt. Da de grønne takene inneholder flere takelementer i form av drenerende masser og sedummatter, vil parapeten ha en lavere høyde enn på referansetaket for de samme punktene på taket. Ved snøfall vil overkant på snødekke først overstige parapethøyden på de grønne takene og deretter parapeten på referansetaket. Dermed vil snøen på de grønne takmodulene bli ytterligere utsatt for vind, som kan gi en mindre snølast sammenlignet med den på referansetaket. Dette betyr at det for enkelte nedbørsverdier på de grønne takene blir fratrukket en større snølast enn det som reelt ligger på taket, og at resulterende vannlast i realiteten er større.

Da snøen på de grønne takene i mindre grad vil beskyttes av høyden på parapeten, kan det tenkes at det vil smelte mer snø på disse takene sammenlignet med på referansetaket. Snøsmeltingen oppstår som følge av langbølgede varmestråler fra jordkloden og kortbølgede varmestråler fra solen. For enkelte nedbørverdier kan det også i dette tilfellet tenkes at snølasten som trekkes fra i realiteten er mindre.

De grønne takmodulene ligger på hver sin side av referansetaket. Det kan tenkes at de ligger mer vindpåvirket til og har en beskyttende effekt på referansetaket. For enkelte nedbørverdier kan det, som i tilfellet over, resultere i at en større snølast enn reelt blir fratrukket. Dette betyr at estimert vannlast i realiteten kan være høyere.

Videre indikerer Figur 42 at det ligger en snølast på referansetaket i perioden tidlig høst, før vintersesongens første minusgrader og snøfall har inntruffet. Med antakelsen om at fratrukket

egenlast er korrekt, kan dette komme av fuktighet lagret i referansetakets bærekonstruksjon av trykkimpregnert limtre.

Sorpsjonskurven i Figur 9 illustrerer hvordan trevirke av furu vil tilpasse sitt fuktinnhold avhengig av omgivelsenes relative luftfuktighet. Ved økt relativ luftfuktighet, som ofte oppstår i overgang til høst og vinter, vil også fuktigheten i trevirket øke. Denne sorpsjonskurven tilhører ikke trematerialet benyttet i forsøktakenes konstruksjon, men omgivelsenes relative luftfuktighet kan likevel tenkes å ha en effekt på registrert vekt.

Som beskrevet i Tabell 6 er det observert fukt på undersiden av takene rundt sluk. Dette kan virke inn på registrerte vektverdier i form av en økt vekt utover egenlasten. I tillegg er det for deler av de grønne takene ikke etablert membran minst 150 mm over vegetasjonslaget. Dette kan også påvirke vektverdiene i form av økt vekt grunnet fuktlagring i treverket.

### 6.3.1 Validering av estimert snølast på de grønne takene

Metoden for å estimere snølast på takene ved hjelp av densitets- og dybdemålinger viser større avvik både mellom hver av målingene og fra metoden beskrevet i 4.3, hvor snølast estimeres til vektverdien på referansetaket etter at egenlasten er trukket fra.

Mellom referansetaket og tak 3 ligger avviket på henholdsvis 9,57% *mer* snø på det grønne taket ved første måling og 7,57% *mindre* snø på det grønne taket ved måling nummer 2. Det forventes noe avvik mellom takene grunnet ulik oppbygging og vindforhold. Likevel forventes det ikke at avviket skifter retning for de ulike måletidspunktene. Avvikene kan komme av flere forskjellige årsaker, hovedsakelig med bakgrunn i målingene som ble utført:

- Det kan ha blitt målt på ulike deler av taket, både under samme måling, men også mellom de to forskjellige målingene.
- Det kan ha oppstått feil rundt densitetsmålingene fra mark, hvor vekten av snøprøven kan ha blitt målt unøyaktig eller at høyden på snøprøven ikke tilsvarer den målte høyden av snøen på mark.
- Beregningsfeil av volumet til snøen på takene

Måling 1 den 21.januar ble gjennomført under et større snøfall. Snødensiteten ble målt til 190 kg/m<sup>2</sup>, tilsvarende 1,86 kN/m<sup>2</sup>. Denne ligger som forventet på en gjennomsnittlig snødensitet på mellom 1,0 og 2,0 kN/m<sup>2</sup>, tilsvarende nysnø og fast snø hentet fra Tabell 2. Måling 2 den 23.januar ble gjennomført etter en kortere periode med varmegrader. Snødensiteten ble målt til 222 kg/m<sup>2</sup>, tilsvarende 2,18 kN/m<sup>2</sup>. Denne snødensiteten ligger også som forventet i nedre sjikt mellom 2,0 og 2,5 kN/m<sup>2</sup>, tilsvarende fast snø og gammel snø. Resultatene fra densitetsmålingene svekker grunnlaget for at densitetsmålingene er årsak til de avvikende vektverdiene.

Videre viser en sammenligning mellom snølast på referansetak beregnet etter densitets- og dybdemålingene, og snølast beregnet etter metoden i 4.3, et avvik på 16,69% *mer* snø på referansetaket ifølge førstnevnte metode ved første måling. Ved andre måling viser en sammenligning til 21,09% *mindre* snø på referansetaket ifølge førstnevnte metode. Det er forventet noe variasjon mellom de forskjellige metodene, men det forventes det ikke avvik i ulik retning. Avvikene kan komme av flere årsaker:

- Metoden for å estimere volum av snøen på taket kan inneholde feilkilder. Opplysningene om taket er hentet fra to masteroppgaver om takmodulene (Bassøe, 2020; Øyre & Trommald, 2018). Det er en mulighet for at takene ble bygget annerledes og at dette har innvirkning på beregnet vekt av snø. Dersom eksempelvis referansetaket har et større volum til snø enn beregnet, kan man forvente at vekten av snø beregnet basert på dybde- og densitetsmålingene vil ligge litt lavere enn reelt.
- Unøyaktig måling av snødybde på tak.
- Lasten av snø estimert iht metoden i 4.3 kan inneholde feilkilder. Den kan representere en større last enn reelt dersom vekt utover snø ligger lagret i eller på taket. Dette kan være i form av fuktighet i treverket.

Da metoden i 4.3 setter snølast på de grønne takene lik snølast på referansetaket, er den samme vekten av snø satt for begge takene under «Registrert snøvekt». For det grønne taket viser en sammenligning mellom de to metodene ytterligere avvik, i form av 28,15% *mer* snø basert på

densitets- og dybdemålingene for første måling. For andre måling viser den 27,06% *mindre* snø på taket basert på densitets- og dybdemålingene. Det forventes heller ikke her avvik i ulik retning og det antas at årsaken ligger i de samme faktorene som er nevnt over.

Overordnet viser resultatene at metoden for å beregne vekt av snø basert på dybde- og densitetsmålinger ikke umiddelbart gir en god indikasjon på reel vekt av snø. Dette begrunnes med avvik i ulik retning mellom de to takene for hver av de to målingene. Disse avvikene forplanter seg videre når vekten på det samme taket sammenlignes mellom de to metodene. Resultatene indikerer et avvik mellom reel snølast og snølasten som anvendes for å finne vannlast på de grønne takene, på opp mot 30%. Dette er store avvik og det forventes at deler av avviket kommer av feilkildene nevnt over.

Basert på resultatene med mulige feilkilder er det vanskelig å anslå hvor stort avvik det er mellom reel og estimert snølast. Med de grønne takenes oppbygning forventes det likevel en mindre snølast på taket av årsaker nevnt i 6.3. Ved å sette snølast på de grønne takene lik snølasten på referansetak, trekker man sannsynligvis fra en større andel snø enn det reelt sett befinner seg på det grønne taket. Av den grunn kan man forvente at den resulterende vannlasten som blir igjen, i realiteten er større.

## 6.4 Vannlast på de grønne takene

### 6.4.1 Forskningsspørsmål 1

*I hvilken grad opptrer vannlast på grønne ekstensive tak over vintersesongen?*

I delkapittel 3.3 er den teoretiske vannlagringskapasiteten til de grønne takene beregnet til 0,981 kN/m<sup>2</sup>. Resultatene med estimert maksimal vannlast listet opp i Tabell 16 og Tabell 17, indikerer flere vintersesonger med maksimal vannlast større enn vannlagringskapasiteten, og vannlasten i øvre sjikt av takenes vannlagringskapasitet. Dette indikerer at takenes sekundærkapasitet utnyttes.

For tak 1 overstiger vannlast vannlagringskapasiteten i minst halvparten av de målte vintersesongene, med vannlast opp mot 1,05 kN/m<sup>2</sup>. Største vannlast inntreffer vintersesongen 2023-2024 med 1,056 kN/m<sup>2</sup>. Maksimal vannlast i tak 3 når aldri maksimal vannlagringskapasitet, men ligger på over 0,8 kN/m<sup>2</sup> alle seks sesonger. Største vannlast inntreffer vintersesongen 2022-2023 på 0,93 kN/m<sup>2</sup>.

Disse vannlastverdiene er basert på estimer med flere usikkerhetsmomenter diskutert i kapittel 6.1 til 6.3. Overordnet indikerer likevel resultatene at vannlast vil variere helt opp mot takenes vannlagringskapasitet for de fleste vintersesonger. I en dimensjonerings situasjon vil man dermed ikke ha mye å gå på i forhold til en reduksjon i karakteristisk vannlast, med grunnlag i utnyttet vannlagringskapasitet.

Tidspunkt for når maksimal vannlast inntreffer varierer i stor grad. For tak 1 inntraff største vannlast sent på vinteren for 3 av 4 sesonger, mens for tak 3 forekom 4 av 6 vannlaster tidlig i vintersesongen, før årsskifte. De resterende sesongene oppstod maksimal vannmetning for sesongen tidlig på vinteren, før årsskifte.

Det er vanskelig å si noe sikkert om hvorfor både lastverdiene og tidspunktet for når de største vannlastene inntreffer avviker mellom tak 1 og tak 3, utover at årsaken er sammensatt. Takene er i utgangspunktet bygget tilnærmet identiske, for å kunne validere målingene for hvert tak mot



det andre. Utover feilkilder diskutert i tidligere delkapitler, kan avvikene også skyldes marginalt større verdier før årsskifte, hvor de samme nivåene av regnlast også opptrer etter årsskiftet rundt overgangen til vår med mye snøsmelting. Resultatene indikerer likevel en tendens mot maksimal vannlast sent på vinteren i samme periode som maksimal snølast, og kan ses i sammenheng med mye snøsmelting.

Snølast på tak vil være den dominerende variable lasten for de fleste takkonstruksjoner anlagt med grønne ekstensive tak og sporadisk gangtrafikk. Det gjelder også for de bærende takkonstruksjonene på forsøksanlegget i Ås. Over vår-, sommer- og høstsesong, kan man argumentere for at eventuell vannlast i takene er dimensjonert inn i takets kapasitet under snølast. Dette forutsetter at last fra takenes vannlagringskapasitet ikke overstiger karakteristisk snølast for lokasjonen.

Utfordringen oppstår over de vintersesongene hvor snølasten nærmer seg dimensjonert snølast for konstruksjonen, i tillegg til eventuelle vannlaster lagret i taket fra inngangen til vinteren. Ved inngangen til en relativt kald vinter kan det tenkes at vannlast fra høstmånedene fryser fast i de vannlagrende elementene i taket og belaster taket ved dette nivået over hele vinteren. Takkonstruksjonen skal i tillegg da ha kapasitet til å bære den dimensjonerende snølasten. Det kan derfor være interessant å vurdere hvilken vannlast takene har ved inngangen til vinteren. Ytterligere vannlast etter sesongens første snøfall skal i teorien være dimensjonert inn under snølast. Vannlasten er et resultat av smeltevann fra snøen.

Ved inngangen til vinteren indikerer resultatene fra Tabell 18 at mellom 41-56% av vannlagringskapasiteten på 0,981 kN/m<sup>2</sup> er utnyttet og at vannlasten ytterst sjeldent faller under dette inngangsnivået over resten av vinteren. Dette gjelder også for de varmere vintrene. Et eksempel er vannlast ved inngang til vinteren 2019-2020. Dette var den mildeste vinteren målt siden oppstart av MET sine målinger, med en snittemperatur på 5,7 grader over normalen for perioden 1961-1990 (MET & institutt, 2020). Vannlasten faller ikke under nivået tilsvarende det ved inngangen til vinteren 01.12.

Vannlasten ved inngangen til vinteren kan potensielt anses som en permanent last over vinteren. Dette nivået av vannlast ser ut til å fungere som et minimumsnivå av vannlast. Vannlast over dette nivået varierer opp mot maksimal vannlagringskapasitet på 0,981 kN/m<sup>2</sup> og kan anses som en variabel last.

Grafene i Figur 46, Figur 47, Figur 50 og Figur 51 indikere videre at vannlast i de grønne takene er sterkt temperaturavhengig. Ved temperaturer under 0°C og snøfall holder vannlastnivået seg

stabil. Fuktigheten i taket fryser tilsynelatende til. Det skal ikke mer enn 2 til 3 dager med temperatur på mellom 0-5 °C før store deler av snøen smelter og renner videre ned i det grønne taket. Et eksempel på dette er siste del av desember 2022 i (Figur 51 og Figur 52). I dette eksemplet ser ikke vannet ut til å avrenne, men lagres i sedummattene og LECAen.

For uoppvarmede takkonstruksjoner med grønne ekstensive tak, som dette forsøksanlegget er, vil vannlasten i stor grad avhenge av lufttemperaturen. Over kalde vintere, med lengre sammenhengende kuldeperioder, vil man kunne forvente at andelen snølast av den totale nedbørslasten er større enn ved varmere vintere. Over varmere vintere vil potensielt en større andel av den totale nedbørslasten bestå av vannlast fra smeltevann.

På oppvarmede takkonstruksjoner vil vannlasten sannsynligvis være noe mindre påvirket av lufttemperatur. Avhengig av isolasjonsevnen til taket, vil varmen fra bygningen bidra til en jevnere og høyere temperatur i det grønne taket. Dette vil føre til økt smeltevann fra snø, som øker vannlasten i det grønne taket i perioder hvor temperaturen i taket holder seg over 0° C som følge av varmen fra taket. Varmestrømmen fra takflaten kan også tenkes å tillate ytterligere avrenning fra taket i denne perioden. Både for kalde og varme vintere, vil andelen vannlast kunne utgjøre en økt andel av total nedbørslast, sammenlignet med på en uoppvarmet takkonstruksjon.

Dersom forsøktakene ved NMBU hadde være anlagt på en oppvarmet takkonstruksjon, hvor varmestrøm fra takflaten hadde hatt en effekt på temperaturen i det grønne taket og i samme temperaturperiode som beskrevet over, kan det tenkes at andelen vannlast av total nedbørslast hadde vært større. For vannlasten ved inngangen til vinteren kan det tenkes at denne vil øke dersom det ligger snø på taket og økt smeltevann fra denne blir lagret i taket. Likevel representerer intervallet av vannlast ved inngang til vinter på 41-56% av vannlagringskapasitet både varmere og kaldere vintersesonger. Varmestrøm fra en oppvarmet takkonstruksjon tenkes derfor å ha en minimal effekt.

Ved beregning av karakteristisk snølast for en lokasjon, inkluderes en termisk reduksjonskoeffisient dersom U-verdien til taket tilsvarer 1 W/m<sup>2</sup>K eller mer. Denne vil ikke være relevant for nyere konstruksjoner, da minimumskravet til energieffektivitet for tak ligger på henholdsvis 0,18 etter både TEK17 og TEK10. For eldre konstruksjoner, med høyere varmegjennomgang, vil reduksjonskoeffisienten være mer relevant. Tanken er at en større andel snø vil smelte og renne ned fra tak. Dersom det er anlagt et grønt ekstensivt tak på den eldre takkonstruksjonen, vil dette smeltevannet fortsatt kunne lagres på taket i de grønne

takelementene. Det bør tas med i vurderingen under dimensjonering av snølast på eldre konstruksjoner, i kombinasjon med grønne tak.

## 6.4.2 Forskningsspørsmål 2

*Gir grad av samtidighet mellom vannlast og snølast grunnlag for en reduksjon av karakteristisk vannlast?*

Ved dimensjonering av bærende konstruksjoner er det av interesse å vite når aktuelle laster inntreffer i forhold til hverandre. På den måten kan man tilpasse lastsituasjonen med faktorer som representerer sannsynligheten for at lastene vil opptre samtidig.

Når man i dag dimensjonerer egenlast fra takelementene med full vannmetning som en permanent last, innebærer dette en dimensjonerende lastsituasjon hvor takets vannlagringskapasitet er fullt utnyttet samtidig som maksimal snølast inntreffer. I realiteten oppstår ikke denne situasjonen, med mindre takets vannlagringskapasitet er fullstendig utnyttet ved inngangen til vinteren og ligger fryst fast frem til våren.

Ikke under noen omstendighet inntreffer maksimal snølast og maksimal vannlast samtidig under måleperioden for forsøktakene ved NMBU. Dette indikerer analysen både for når sesongens største nedbørslast, største snølast og største vannlast inntreffer. Største vannlast opptrer som oftest etter største snølast, i forbindelse med snøsmelting. I de tilfeller den ikke gjør det, oppstår den før årsskifte når snødybden ligger på lavere nivåer. Snølasten når største vannlast inntreffer ligger i intervallet 4,3-14,0% av total nedbørslast, iht Tabell 16 og Tabell 17.

Avvikende grad av samtidighet understøttes videre av resultatene i

Tabell 20. Den påfølgende største vannlasten etter sesongens største snølast inntreffer minst én dag etter. Dette henger logisk sammen med at vannlasten avhenger av smeltevann fra snøen. En økning i vannlast betyr en reduksjon i snølast, gitt at det ikke tilføres vann til taket fra andre kilder.

Dersom man tar utgangspunkt i vannlast som en variabel last over hele vinteren, innebærer dette at den variable lasten kan reduseres med bakgrunn i at den ikke vil opptre samtidig med maksimal snølast. Når sesongens største snølast inntreffer, ligger vannlasten på mellom 28-67% av total nedbørslast, og maksimalt opp mot 75% av vannlagringskapasiteten på 0,981 kN/m<sup>2</sup> estimert i Tabell 21. Dette innebærer at vannlasten i en dimensjonerende lastberegning for forsøktakene, kan settes til 75% av vannlagringskapasiteten tilsvarende 0,74 kN/m<sup>2</sup> og beregnes som en variabel last.

Et viktig aspekt er takets evne til å la vannet avrenne videre. Dersom det har oppstått hindringer som medfører at vannet forblir på taket og øker utnyttet vannlagringskapasitet ved inngang til vinteren, innebærer det en økt risiko for at maksimal vannlast inntreffer samtidig med maksimal snølast. På den måten fungerer dagens dimensjoneringspraksis som en sikkerhetsfaktor, som tar hensyn til takets potensiale for vannlast ved eksempelvis tett sluk og eventuelle beregningsfeil fra ingeniør og leverandør.

### 6.4.3 Forskningsspørsmål 3

*Overdimensjoneres bærekonstruksjoner for grønne ekstensive tak med utgangspunkt i dagens dimensjoneringspraksis?*

I SINTEF sin nye veileder fra 2024, om bæreevne til eksisterende takkonstruksjoner med ny grønn takoppbygging, bemerkes dagens konservative lastdimensjoneringspraksis. Lasten fra vannmetning i det grønne taket beregnes som en permanent last, når den i realiteten er en variabel last avhengig av nedbør i løpet av året og takets strømningshastighet. Resultatene fra forsøktakene ved NMBU indikerer det samme, at last fra vannmetning i takene er en variabel størrelse.

Over hele året utenom vinteren, vil vannlasten i det grønne taket være dimensjonert inn i bærekonstruksjonen under snølast, gitt at karakteristisk vannlast ikke overstiger karakteristisk snølast. Det vil kun være vannlasten på taket ved inngang til vinteren som kommer i tillegg til dimensjonert snølast. Den estimerte vannlasten i takene ved inngang til seks målte vintersesonger, viser at inngangslasten ligger på mellom 41-56% av takenes vannlagringskapasitet på 0,981 kN/m<sup>2</sup>.

Med utgangspunkt i at alle oppgitte verdier fra leverandør er korrekt, at de statiske beregningene utføres i henhold til standard og at ingen hindringer fører til at vann ikke kan renne ned fra tak, indikerer resultatene fra forsøktakene at dagens takkonstruksjoner med grønne ekstensive tak overdimensjoneres.

Eksemplene i 1.1 viser, med utgangspunkt i estimert vannlast på forsøktakene i Ås og eksisterende konstruksjon fra 1994, at lette massivtrekonstruksjoner overdimensjoneres med omtrent 11% og tyngre betongkonstruksjoner med omtrent 5%. For konstruksjoner bygget etter dagens standard, overdimensjoneres lette massivtrekonstruksjoner med nærmere 6% og tyngre betongkonstruksjoner med i underkant av 3,8%.

Overdimensjonering av konstruksjoner i den grad eksemplifisert over kan ikke sies å være betydelige. Likevel kan det spesielt for lette, eksisterende konstruksjoner være utslagsgivende i forhold til om man må utføre forsterkende tiltak. For mange byggherrer kan dette være avgjørende for om man velger å etablere et grønt ekstensivt tak, grunnet tids- og kostnadshensyn.

I eksemplene er det benyttet et konservativt anslag for vannlast ved inngang vinteren, på 56% av vannlagringskapasiteten. Videre forskning på feltet kan forsøke å etablere en mer representativ verdi for den utnyttede kapasiteten ved inngang til vinteren og kvantifisere variasjonen rundt denne verdien.

Grad av overdimensjonering sett opp mot dagens dimensjoneringspraksis vil variere stort med flere faktorer. Forholdet mellom vannlast og egenvekt til de grønne takelementene i tørr tilstand, vil avgjøre hvor stor reduksjonen av dimensjonerende last blir. En større andel vannlast i forhold til egenlast, betyr en større andel reduksjon av permanent egenvekt. Konstruksjonens byggeår og tekniske tilstand er også av betydning. En eldre konstruksjon vil måtte dimensjoneres for en større differanse i snølast og nyttelast. Den relative reduksjonen i dimensjonerende last fra ny grønn takoppbygging vil dermed bli mindre.

En reduksjon i dimensjonerende vannlast på grønne ekstensive tak vil ha størst effekt på lette takkonstruksjoner, med en minimal differanse mellom eksisterende og dagens dimensjonerende snølast. Reduksjonsnivået i dimensjonerende vannlast vil øke med økt andel vannlast i forhold til det grønne takets egenlast i tørr tilstand.

## 6.5 Overførbarhet

Resultatene fra denne studien baserer seg på et klima representativt for Ås, Akershus og deler av Oslo, som beskrevet i 3.9.1. For grønne ekstensive tak lokalisert i maritimt tempererte og deler av kontinentale klimaer, kan det derfor tenkes at man vil få de samme resultatene. Det vil ligge en begrensning i overførbarhet av resultatene til grønne ekstensive tak i andre deler av Norge og verden med andre typer klimasoner, slik som i polare klimaer med langt lavere temperaturer.





## 7 Konklusjon

Resultatene fra denne studien baserer seg på registrerte vektverdier fra ett grått og to grønne ekstensive tak ved NMBU over 6 vintersesonger. Vektverdiene er registrert over en måleperiode på 6,5 år fra 2018-2024, med et registreringsintervall på 10 minutter. For å kunne analysere vannlasten i de grønne ekstensive takene over vinteren, er det utviklet metoder for å estimere henholdsvis egenlastens og snølastens andel av den registrerte vekten. Basert på analyse av den resulterende vannlasten, er følgende forskningsspørsmål forsøkt besvart videre:

1. I hvilket omfang opptrer vannlast på grønne ekstensive tak i løpet av vinteren?
2. Gir grad av samtidighet mellom vannlast og snølast grunnlag for en reduksjon av karakteristisk vannlast?
3. Overdimensjoneres takkonstruksjoner med grønne ekstensive tak i dag?

## 7.1 Forskningsspørsmål 1

*I hvilken grad opptrer vannlast på grønne ekstensive tak over vintersesongen?*

Innledningsvis er det viktig å påpeke at det er knyttet flere usikkerhetsmomenter til registreringen av vektverdiene ved takene i måleperioden, i tillegg til metodene anvendt for å estimere snø- og vannlast på de grønne takene. Av den grunn er flere relevante verdier utelatt fra videre analyse, henholdsvis fra vintersesongene fra 2021-2023 for tak 1 og 2020-2021 for tak 3.

Med bakgrunn i validering av snølast på de grønne takene, er det med sannsynlighet fratrukket en større snølast enn det som reelt ligger på de grønne takene. Dette innebærer en forventning om at estimert vannlast i realiteten ligger på et noe høyere nivå i enkelte perioder, enn det som er presentert i denne studien.

Resultatene i denne studien indikerer at vannlasten opptrer som en variabel last over vintersesongen. Den varierer tydelig med tid og ikke monotont mot en bestemt grenseverdi. For de fleste vintersesongene vil den variere helt opp mot takets vannlagringskapasitet beregnet til 0,981 kN/m<sup>2</sup>. I en dimensjonerings situasjon vil man derfor ikke ha noe å gå på i forhold til en uutnyttet andel av takets vannlagringskapasitet. Likevel opptrer ikke vannlast som følge av vannmetning som en permanent last, slik det dimensjoneres for i dag.

Maksimal vannlast tenderer mot å inntreffe sent i sesongen, sett i sammenheng med mye snøsmelting. Ved enkelte vintersesonger inntreffer maksimal vannlast på høsten, i forbindelse med en regnfylt, varmere start på vinteren. For noen av disse sesongene er estimert vannlast marginalt større på høsten, hvor de samme nivåene med vannlast inntreffer senere på vinteren, i forbindelse med snøsmelting.

Det kan argumenteres for at all last fra nedbør i vintermånedene desember til februar er dimensjonert inn i takets bæreevne under snølast. Derav vil den reelle tilleggslasten taket må dimensjoneres for i tillegg til snølast, være vannlasten i det grønne taket ved inngangen til vinteren. Resultatene fra videre undersøkelse av vannlasten til takene ved inngang til vinteren, indikerer at takene har en utnyttet vannlagringskapasitet på mellom 41-56% og at vannlasten ikke beveger seg under dette nivået over resten av vinteren. Under forskningsspørsmål 3 om

hvorvidt takkonstruksjonen overdimensjoneres med dagens regelverk, eksemplifiseres dette med et beregningseksempel hvor 56% av det grønne takets vannlagringskapasitet legges til grunn.

Videre indikerer resultatene at vannlasten i takene er sterkt temperaturavhengig. Etter en lengre kuldeperiode skal det ikke mer enn 2 til 3 dager med temperatur på mellom 0-5 °C før store deler av snøen smelter og renner videre ned i det grønne taket. Over flere tine- og frysesykluser kan taket fungere som en form for langsiktig lager, vannet avrenner ikke, men lagres frem til maksimal vannlagringskapasiteten på 0,981 kN/m<sup>2</sup> er nådd.

I forbindelse med den termiske koeffisienten som reduserer dimensjonerende snølast på tak ved varmestrøm på over 1,0 W/m<sup>2</sup>K, er det viktig å inkludere denne effekten i dimensjoneringsprosessen. Smeltevann som er tiltenkt at renner ned fra tak, lagres i det grønne taket istedenfor.

Forsøktakene ved NMBU ligger anlagt på en uoppvarmet konstruksjon. Dersom takene lå på en oppvarmet konstruksjon med en varmestrøm som ga reel effekt på temperaturen i taket, vurderes det dithen at andelen vannlast ville utgjort en større andel av den totale nedbørslasten både for kaldere og varmere vintere. Likevel representerer intervallet av vannlast ved inngang til vinter på 41-56% av vannlagringskapasitet både varmere og kaldere vintersesonger. Det tenkes derfor at varmestrøm fra taket ville hatt minimal effekt på denne.

## 7.2 Forskningsspørsmål 2

*Gir grad av samtidighet mellom vannlast og snølast grunnlag for en reduksjon av karakteristisk vannlast?*

Ikke under noen omstendighet inntreffer maksimal snølast og maksimal vannlast samtidig under måleperioden for forsøktakene ved NMBU. Dette indikerer analysen både for når sesongens største nedbørslast, største snølast og største vannlast inntreffer.

Når maksimal snølast for sesongen inntreffer er største registrerte vannlast estimert til 75% av vannlagringskapasiteten. Forholdet mellom snølast og vannlast når sesongens største totale nedbørslast for sesongen inntreffer, fordeler seg relativt jevnt mellom lastene. Stort sett utgjør vannlast en noe større andel enn snølast, på mellom 52,7-67,8% av total nedbørslast. Når største vannlast for sesongen inntreffer, ligger snølast på mellom 4,3-14,0% av total nedbørslast. Disse resultatene indikerer altså at maksimal snølast og vannlast ikke oppstår samtidig, noe bærekonstruksjoner dimensjoneres for i dag.

Største vannlast opptrer som oftest etter største snølast, i forbindelse med snøsmelting. I de tilfeller den ikke gjør det, oppstår den før årsskifte når snødybden ligger på lavere nivåer. Videre analyse av når påfølgende største vannlast inntreffer etter sesongens største snølast viser også at økt vannlast som følge av snøfall ikke inntreffer samtidig som snølasten. Den påfølgende største vannlasten etter sesongens største snølast inntreffer minst én dag etter. Dette henger logisk sammen med at vannlasten avhenger av smeltevann fra snøen.

Med utgangspunkt i vannlast som en variabel last over hele vinteren, kan et alternativ til dimensjoneringsløsning foreslått i 6.4.1, kan være å beregne andelen vannlast i taket til 75% av vannlagringskapasiteten, tilsvarende 0,74 kN/m<sup>2</sup>. Med en kombinasjonsverdi representativ for variasjonen av vannlast og sannsynligheten for at denne opptrer samtidig med snølast, kan denne for enkelte lastsituasjoner reduseres ytterligere.

I forhold til forskningsspørsmål 2 kan man basert på resultatene i denne studien konkludere med at grad av samtidighet mellom vannlast og snølast gir grunnlag for reduksjon av karakteristisk vannlast.

## 7.3 Forskningsspørsmål 3

*Overdimensjoneres bærekonstruksjoner for grønne ekstensive tak med utgangspunkt i dagens dimensjoneringspraksis?*

I besvarelsen av forskningsspørsmål 1 ble det argumentert for at tilleggslasten et grønt tak utsettes for over vinteren, i tillegg til snølast, vil være vannlasten ved inngangen til vinteren. Med utgangspunkt i den høyeste estimerte vannlasten ved inngang til vinteren, på  $0,55 \text{ kN/m}^2$  tilsvarende 56% av vannlagringskapasiteten, er dimensjonerende lastsituasjon beregnet for en lett takkonstruksjon av massivtre og en tung plassarmert betongkonstruksjon hvor det skal legges en ny grønn takoppbygging.

Eksemplene i 1.1 viser, med utgangspunkt i estimert vannlast på forsøktakene i Ås og eksisterende konstruksjon fra 1994, at lette massivtrekonstruksjoner overdimensjoneres med omtrent 10% og tyngre betongkonstruksjoner med omtrent 5%. For konstruksjoner bygget etter dagens standard, overdimensjoneres lette massivtrekonstruksjoner med nærmere 6% og tyngre betongkonstruksjoner med i underkant av 3,8%.

Det kan konkluderes med at ja, bærekonstruksjoner for grønne tak overdimensjoneres etter dagens regelverk. Overkapasiteten utgjør ikke en stor andel som eksemplifisert i denne studien. Likevel kan det for eksisterende bygninger være utslagsgivende i forhold til om det må utføres forsterkende på bærekonstruksjonen. I eksemplet ble det også valgt en konservativ last ved inngangen til vinteren på 56% av vannlagringskapasiteten. Denne lasten lå på et lavere nivå for de fleste andre vintersesongene og det kan tenkes at den vil ligge noe lavere over en 50 års måleperiode.

## 8 Veien videre

Denne studien konkluderer med at bærekonstruksjoner for grønne ekstensive tak overdimensjoneres med utgangspunkt i dagens dimensjoneringspraksis. Beregningseksemplene viser på én side at overkapasiteten ikke utgjør en betydelig andel. Likevel kan dagens krav til bæreevne være utslagsgivende for om det må utføres forsterkende tiltak av bærekonstruksjonen. Med bakgrunn i at dette øker kostnader i form av behov for mer tid og ressurser, og at CO<sub>2</sub>-utlipp vil øke grunnet behov for en større mengde materialer, vil det fortsatt være aktuelt å undersøke vannlasten i grønne tak videre.

Følgende forhold kan være aktuelt å forske på videre:

- Vannlast i grønne tak ved inngangen til vinteren. Resultatene i denne studien indikerer at vannlasten sjelden faller under dette nivået over resten av vinteren. Videre studier vil kunne kvantifisere dette nivået for en lengre måleperiode.
- Vannlast når sesongens største snølast inntreffer. Resultatene i denne studien viser at største estimerte vannlast når sesongens største snølast inntreffer, ligger på 75% av vannlagringskapasiteten. Videre studier vil også for her kunne kvantifisere dette nivået for en lengre måleperiode.

Generelt bør det for videre forskning etableres forsøksanlegg med det hovedformål å registrere vekt på takene, med instrumenter egnet for måling av andelen snø på takene. Sammen med instrumenter for måling av fuktighet i takene, vil dette kunne gi betraktelig sikrere estimater for vannlast.

## 9 Litteraturhenvisning

- (2021–2022), P. L. *Nye bestemmelser i plan- og bygningsloven om håndtering av overvann*. Oslo: Kommunal- og distriktsdepartementet. Tilgjengelig fra: [https://www.regjeringen.no/contentassets/6bf561f1c5f94d4580d49b2bc77252d6/18\\_nye\\_bestemmelser\\_overvann.pdf](https://www.regjeringen.no/contentassets/6bf561f1c5f94d4580d49b2bc77252d6/18_nye_bestemmelser_overvann.pdf) (lest 15.02.2024).
- Andenæs, E. (2021). *Risk assessment of blue-green roofs*. Doktoravhandling. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology (lest 10.11.2023).
- Bassøe, P. A. (2020). *Grønne tak med magasinerendesjikt: Avrenning ved kontrollerte fyllingsforsøk og kalibrering av DDD-modellen: Norges Miljø- og biovitenskapelige Universitet*.
- Benestad, R. & Haugen, J. (2007). *On complex extremes: Flood hazards and combined high spring-time precipitation and temperature in Norway*. Climatic Change 85 (lest 27.01.2024).
- Björk, F. (2004). *Green Roofs Effect on Durability of Roof Membranes*. Malmö, Sweden: International Green Roof Institute.
- Bjørnsen, K. (2021). *Temperaturrendringer på Ås fra 1901-2020 – faktisk temperaturrendring og andre ytre påvirkninger* (lest 15.04.2024).
- Braskerud, B. C. (2016). *Grønne tak for flomdemping*. Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/Media/5036/overvann-gr%C3%B8nne-tak-for-flomdemping.pdf> (lest 02.01.2024).
- Broekhuizen, I., Muthanna, T. M., Leonhardt, G. & Viklander, M. (2019). Urban drainage models for green areas: Structural differences and their effects on simulated runoff. *Journal of Hydrology X*, 5. doi: 10.1016/j.hydroa.2019.100044.
- Byggforsk, S. (2018). *421.132 Fukt i bygninger. Teorigrunnlag*: SINTEF Byggforsk. Tilgjengelig fra: <https://www.byggforsk.no/Document/Index/184/#>.
- Cryo.met. (2024). *Snødybdeobservasjoner*. Tilgjengelig fra: <https://cryo.met.no/nb/snoedybde-produkter>.
- Ellingsen, H. E. (2021). *Ny strategi skal gi Oslo grønnere tak og fasader*. Tilgjengelig fra: <https://magasin.oslo.kommune.no/byplan/gr%C3%B8nnere-tak-og-fasader#ref> (lest 05.02.2024).
- FLL, Development, R. S. f. L. & Construction, a. L. (2018). *Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofs*. Tilgjengelig fra: [https://commons.bcit.ca/greenroof/files/2019/01/FLL\\_greenroofguidelines\\_2018.pdf](https://commons.bcit.ca/greenroof/files/2019/01/FLL_greenroofguidelines_2018.pdf).

- Galbrun, L. & Scerri, L. (2017). Sound insulation of lightweight extensive green roofs. 116: 130-139.
- Han, K. T., Ruan, L. W. & Liao, L. S. (2022). Effects of Indoor Plants on Human Functions: A Systematic Review with Meta-Analyses. *Int. J. Environ. Res. Public Health* (01.04.2024). doi: 10.3390.
- Hanssen-Bauer, I., Førland, E. J., Haddeland, I., Hisdal, H., Mayer, S., Nesje, A., Nilsen, J. E. Ø., Sandven, S., Sandø, A. B., Sorteberg, A. & Ådlandsvik, B. (2016). Klima i Norge 2100. (2).
- Jensen, T. M., Elvebakk, K., Kolstad, S. T. & Eide, S. (2024). *Veileder - Bæreevne for eksisterende takkonstruksjoner med ny grønn takoppbygging*. 2 utg. I: SINTEF (red.). Veileder (lest 29.04.2024).
- Klimasevicesenter, N. (2024). Tilgjengelig fra: <https://seklima.met.no/observations/>.
- MET & institutt, M. (2020). *Den varmeste vinteren målt i Norge*. Tilgjengelig fra: <https://www.met.no/nyhetsarkiv/den-varmeste-vinteren-malt-i-norge-pa-120-ar> (lest 15.04.2024).
- Munden, J. P. (2022). *Påvisning av seismisk lastvirkning ved bruksendring og ombygging av murgårder i Oslo* Masteroppgave. Ås: Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (lest 29.04.2024).
- Nagase, A. & Dunnett, N. (2013). Establishment of an annual meadow on extensive green roofs in the UK. *Landscape and Urban Planning*, 112.
- NASA. (2024). *What Is Climate Change?* Tilgjengelig fra: <https://science.nasa.gov/climate-change/what-is-climate-change/> (lest 07.03.2024).
- Nilsen, V., Paus, K. H., Berg, R., Møen, K., Amin, S. & Norden, G. (2023). *Grønne forsøksstak i Norges landskapslaboratorium, NMBU: Rapport for perioden 2018 – 2022*.
- Nitter, K. (2021). *VA-infrastrukturen utgått på dato: Må oppgraderes for enorme beløp*. Tilgjengelig fra: <https://www.sintef.no/siste-nytt/2021/va-infrastrukturen-utgatt-pa-dato-ma-oppgaderes-for-enorme-belop/> (lest 05.02.2024).
- Noreng, K., Kvalvik, M., Busklein, J. O., Ødegård, I. M., Clewing, C. S. & French, H. K. (2012). *Grønne tak - Resultater fra et kunnskapsinnhentingsprosjekt*. Prosjektrapport 104 (lest 12.12.2023).
- Paus, K. (2018). *Forslag til dimensjonerende verdier for trinn 1 i Norsk Vann sin tre-trinnsstrategi for håndtering av overvann*. Vannforeningen. Tilgjengelig fra: <https://vannforeningen.no/wp-content/uploads/2018/07/Paus.pdf> (lest 05.03.2024).

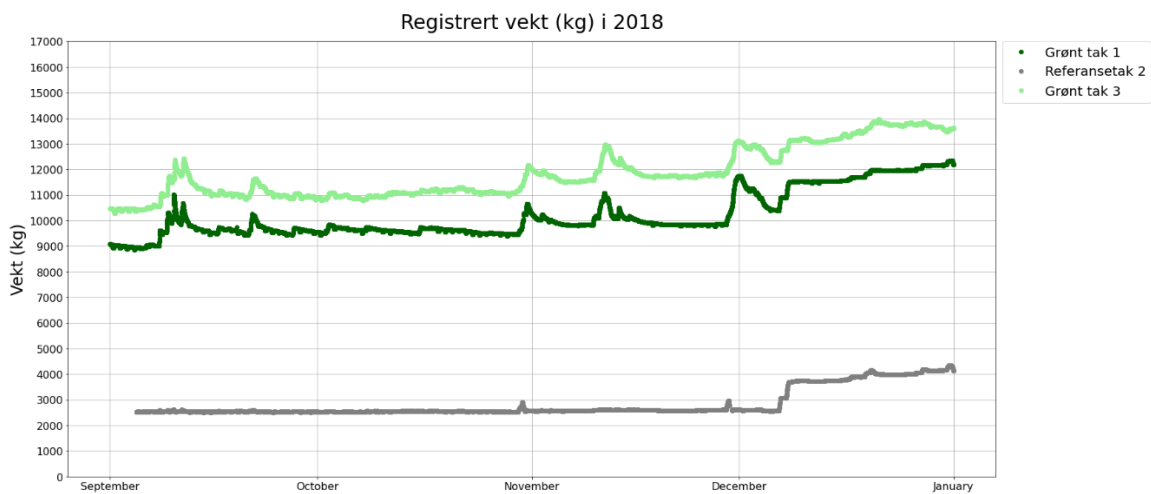


- Rowe, D. B. (2011). Green roofs as a means of pollution abatement. *Environmental Pollution*, 159 (8-9): 2100-2110.
- SINTEF Byggforsk. (2013). 544.823 Sedumtak. Tilgjengelig fra: <https://www.byggforsk.no/dokument/4093/sedumtak> (lest 30.04.2024).
- Sivertsen, E., Bruaset, S., Maurin, N., Abdalla, E. M. H. & Raspati, G. (2023). *Klima 2050*. Report No 47 (lest 12.12.2023).
- Skjeldrum, P. M. (2016). *Ombygging til Blågrønne Tak*. Masteroppgave (lest 06.01.2024).
- Standard Norge. (2015). *NS 3840:2015 Grønne tak - Planlegging, prosjektering, utførelse, skjøtsel og drift - Ekstensive tak*. Tilgjengelig fra: <https://lese.standard.no/product/2514883/nb> (lest 01.02.2024).
- Standard Norge. (2016). *NS-EN 1990:2002+A1:2005+AC:2010+NA:2016 Eurokode 0 Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner*. Tilgjengelig fra: <https://lese.standard.no/product/2480771/nb> (lest 01.02.2024).
- Standard Norge. (2019). *NS-EN 1991-1-1:2002+NA:2019 Eurokode 1 — Laster på konstruksjoner — Del 1-1: Allmenne laster — Tetthet, egenvekt og nytteaster i bygninger*. Tilgjengelig fra: <https://lese.standard.no/product/2535802/nb>.
- Thodesen, B., Kvande, T., Tilley Tajet, H. T., Time, B. & Lohne, J. (2018). Adapting green-blue roofs to nordic climate. *Nordic Journal of Architectural Research* (2).
- Øyre, A. S. & Trommald, J. (2018). *Etablering av Bia, en forskningsinfrastruktur med grønne tak*. Tilgjengelig fra: <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/handle/11250/2505728> (lest 10.12.2023).
- Aarnes, H. (2018). *sukkulenter*: SNL. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/sukkulenter> (lest 02.04.2024).

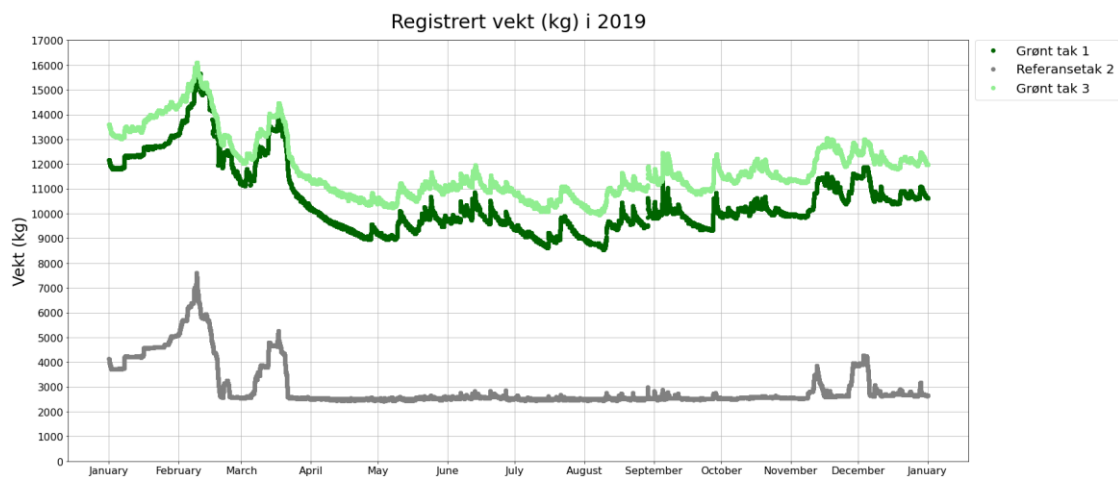
# 10 Vedlegg

## A Fullstendige resultater fra analyse, fremstilt grafisk

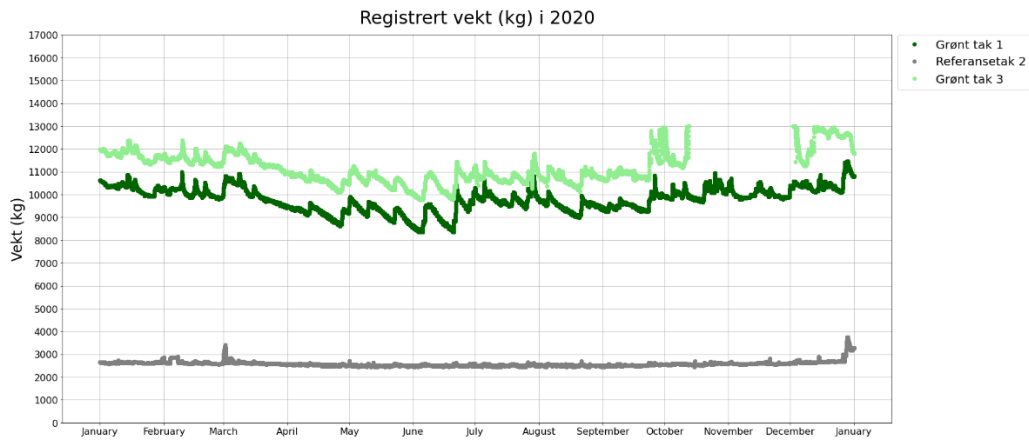
### A1. Vekt (kg) registrert på forsøktakene over hele måleperioden



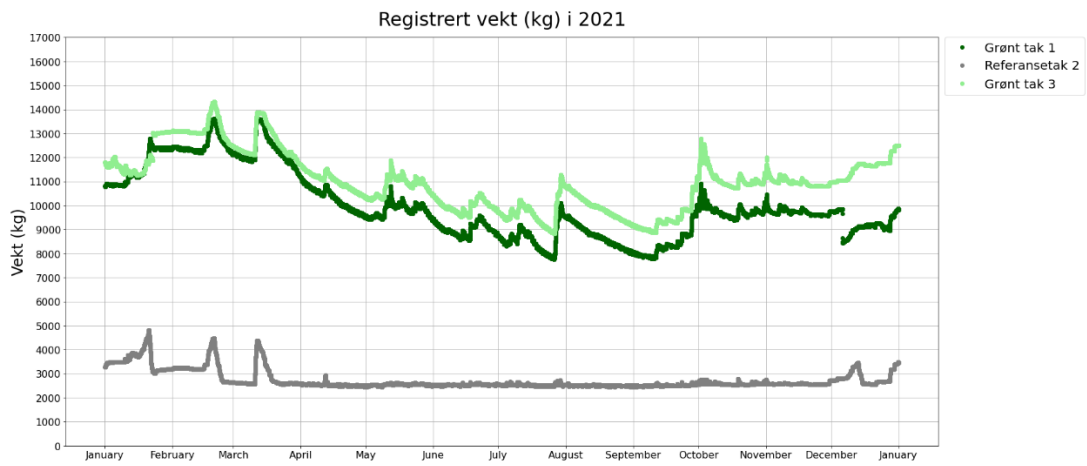
A1. 1 Registrert vekt på forsøktakene i 2018



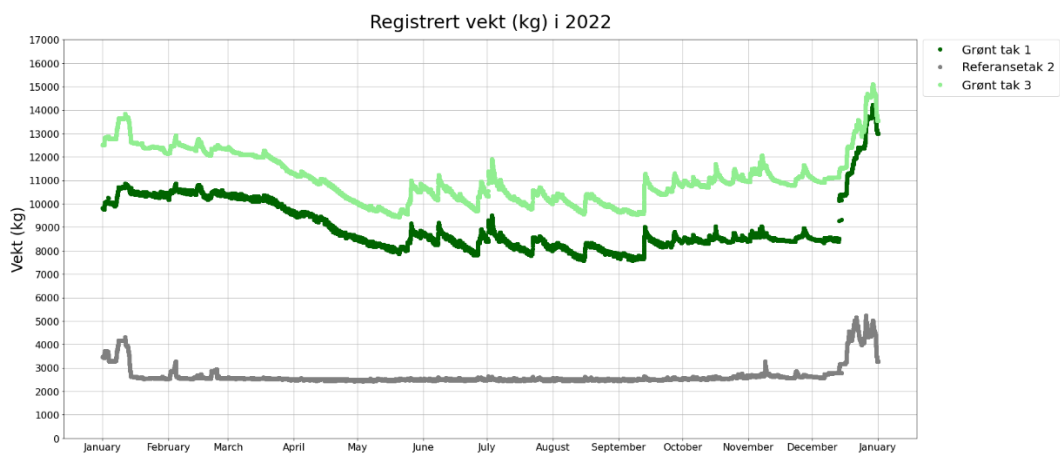
A1. 2 Registrert vekt på forsøktakene i 2019



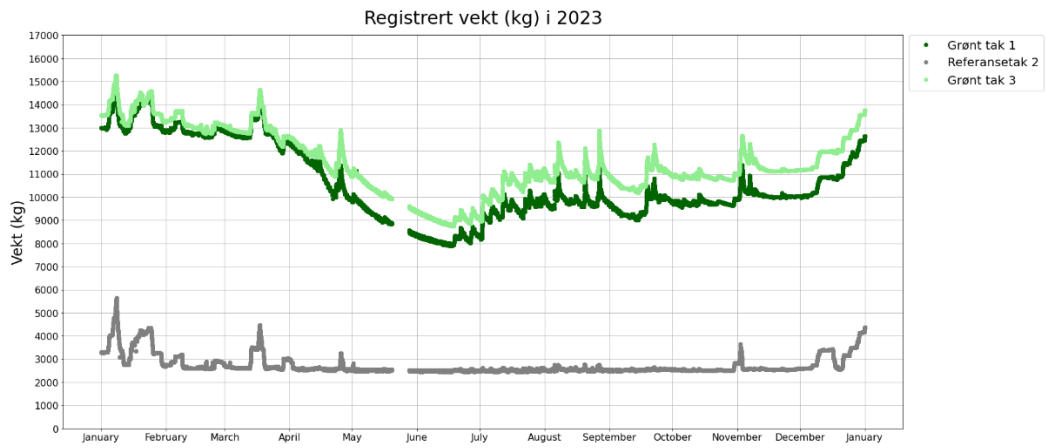
A1. 3 Registrert vekt på forsøktakene i 2020



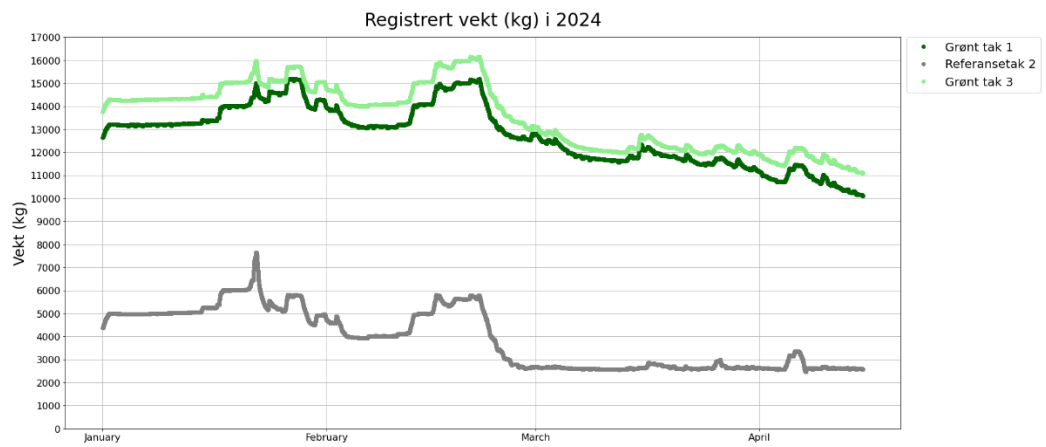
A1. 4 Registrert vekt på forsøktakene i 2021



A1. 5 Registrert vekt på forsøktakene i 2022

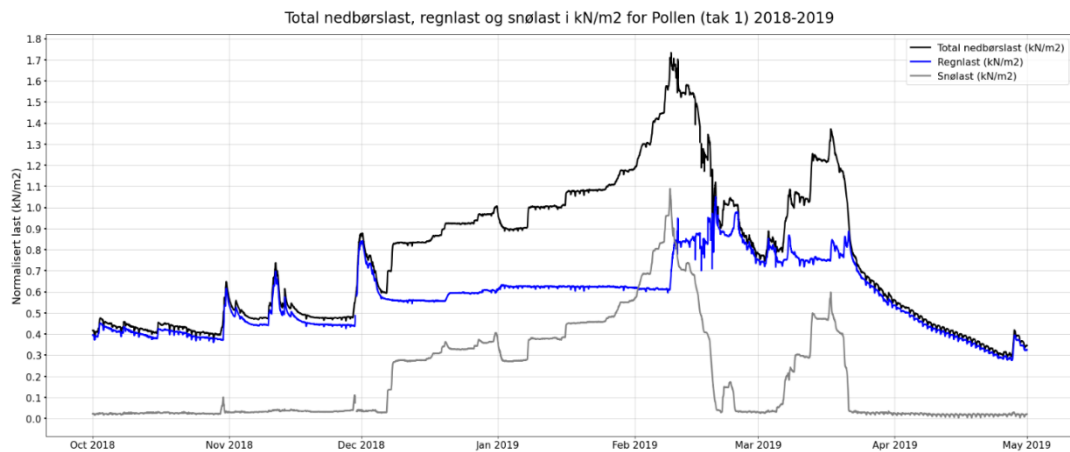


*A1. 6 Registrert vekt på forsøktakene i 2023*

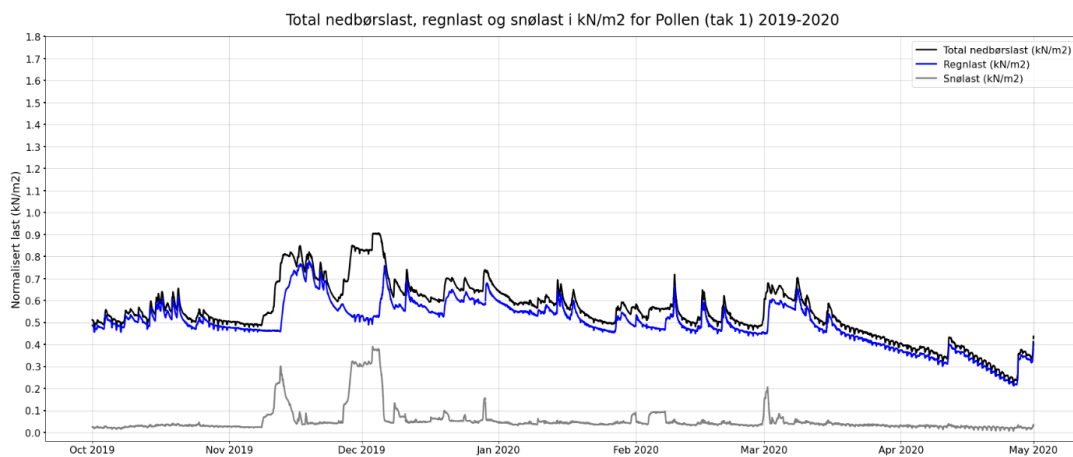


*A1. 7 Registrert vekt på forsøktakene i 2024*

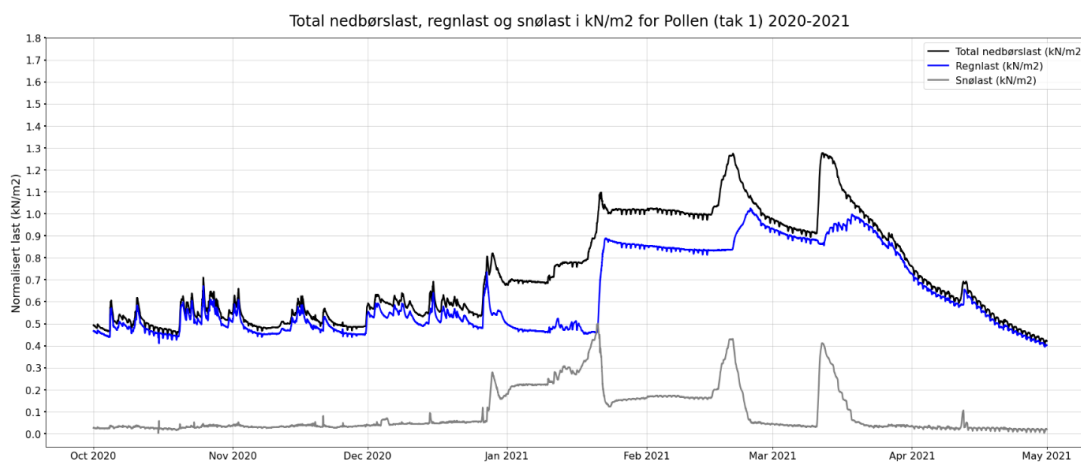
## A2. Total nedbørslast, vannlast og snølast på tak 1



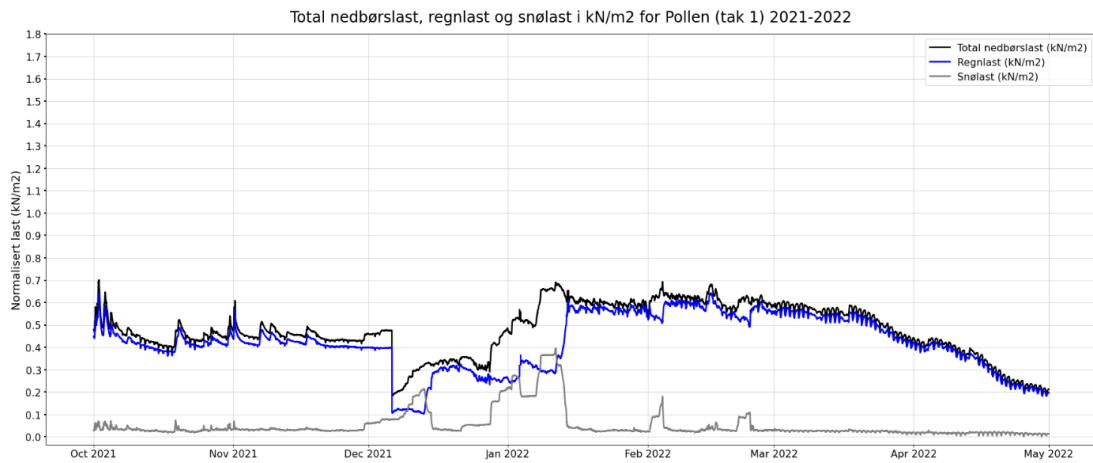
### A2.1 Total nedbørslast, vannlast og snølast på tak 1 vintersesongen 2018-2019



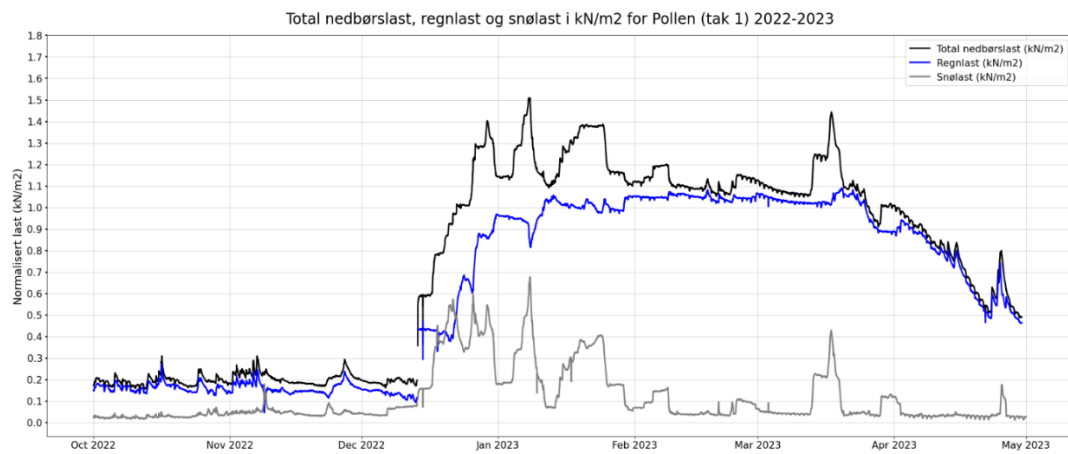
### A2.2 Total nedbørslast, vannlast og snølast på tak 1 vintersesongen 2019-2020



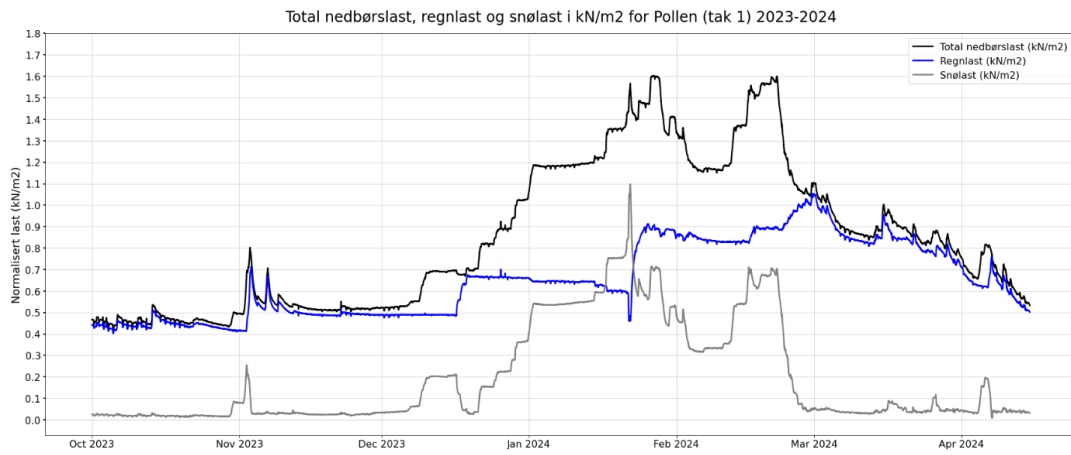
### A2.3 Total nedbørslast, vannlast og snølast på tak 1 vintersesongen 2020-2021



*A2. 4 Total nedbørslast, vannlast og snølast på tak 1 vintersesongen 2021-2022*



*A2. 5 Total nedbørslast, vannlast og snølast på tak 1 vintersesongen 2022-2023*

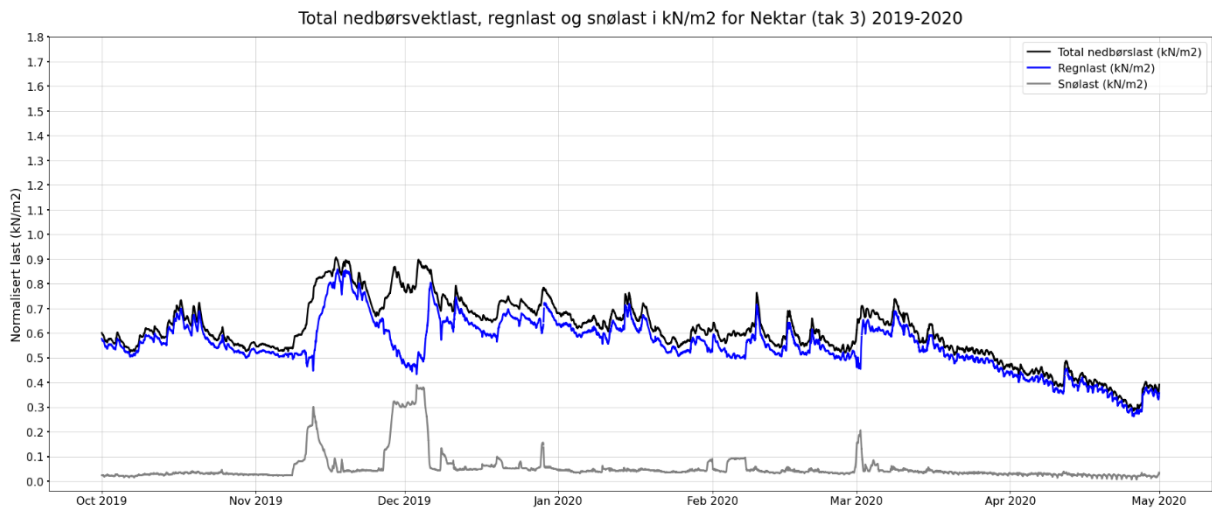


*A2. 6 Total nedbørslast, vannlast og snølast på tak 1 vintersesongen 2023-2024*

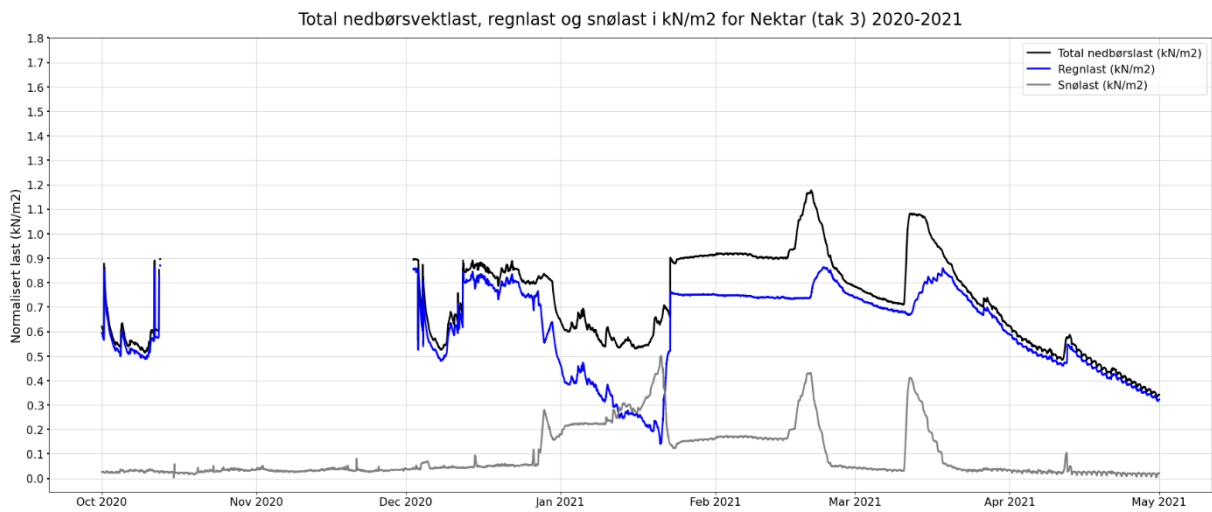
### A3. Total nedbørslast, vannlast og snølast på tak 3



*A3. 1 Total nedbørslast, vannlast og snølast på tak 3 vintersesongen 2018-2019*

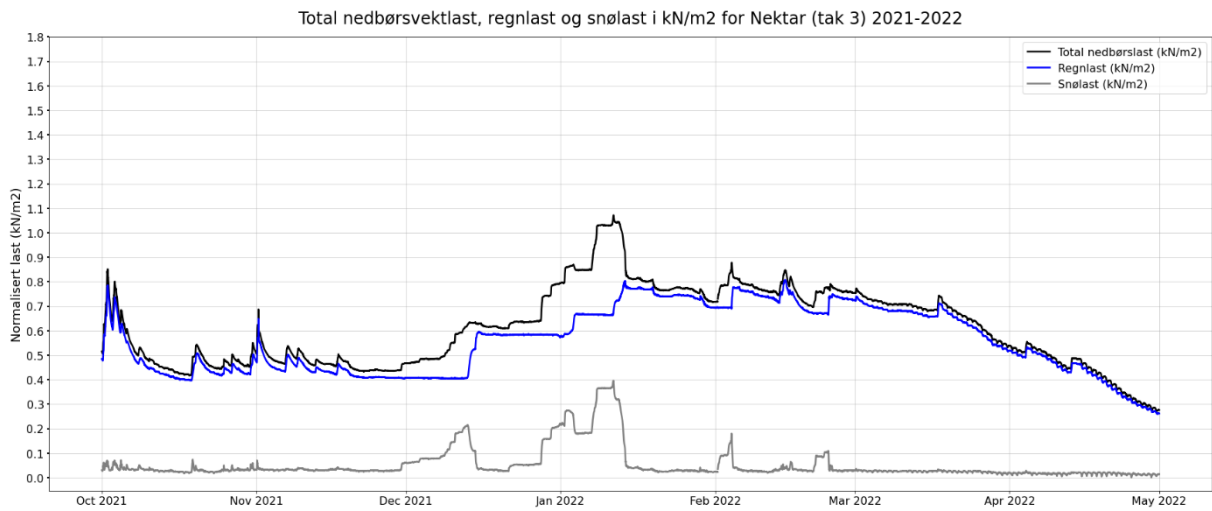


*A3. 2 Total nedbørslast, vannlast og snølast på tak 3 vintersesongen 2019-2020*



*A3. 3 Total nedbørslast, vannlast og snølast på tak 3 vintersesongen 2020-2021*

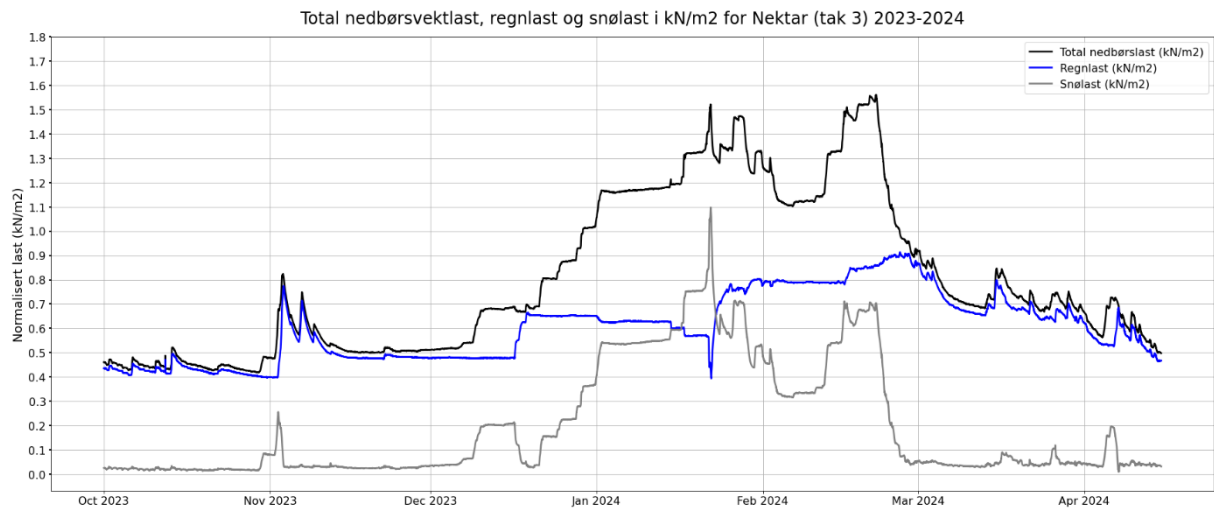




*A3. 4 Total nedbørslast, vannlast og snølast på tak 3 vintersesongen 2021-2022*



*A3. 5 Total nedbørslast, vannlast og snølast på tak 3 vintersesongen 2022-2023*

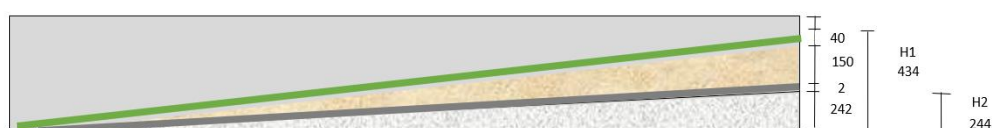


*A3. 6 Total nedbørslast, vannlast og snølast på tak 3 vintersesongen 2023-2024*

## B Volumberegning av snø på tak 2 og tak 3

Volum av snø på taket tilsvarer summen av volum beregnet i B1, B2 og B3(kun for måling 21.januar).

### B1. Beregning av snøvolum opp til høyeste punkt på fallisolasjon



Figur B1. 1 Illustrasjon av takoppbygging og høyeste punkt på tak 2 (H1) og tak 3 (H2)

| Lag                     | Volum[m <sup>3</sup> ]         |      |
|-------------------------|--------------------------------|------|
| Isolasjon               | 7,00                           |      |
| Protan membran          | 0,10                           |      |
| LECA                    | 8,00                           |      |
| Sedum                   | 2,00                           |      |
| <b>Totalt grønt tak</b> | <b>17,10</b>                   |      |
| <b>Totalt grått tak</b> | <b>7,10</b>                    |      |
|                         |                                |      |
| Volum takkasse H1       | 21,05                          |      |
| Volum takkasse H2       | 11,36                          |      |
| Grønt tak               | Volum snø <b>opptil</b> 434 mm | 3,95 |
|                         |                                |      |
| Referansetak            | Volum snø <b>opptil</b> 244 mm | 4,26 |

Tabell B1 1 Volum av snø opp til høyeste punkt på tak 2 og tak 3

**B2. Beregning av snøvolum fra høyeste punkt på taket opp til målt snødybde på tak 2 og tak 3**

| <b>21.jan</b> |             |
|---------------|-------------|
| Snødybde [m]  | Snøvolum m3 |
| 0,42          | 19,5552     |
| 0,46          | 21,4176     |
|               |             |
| <b>23.jan</b> |             |
| Snødybde [m]  | Snøvolum m3 |
| 0,13          | 6,0528      |
| 0,12          | 5,5872      |

*Tabell B2. 1 Snøvolum fra høyeste punkt på tak opp til målt snødybde*

### B3. Beregning av snøvolum på parapet 21.januar

|                  |  |       |
|------------------|--|-------|
| Utvendig mål m2  |  | 50    |
| Innvendig mål m2 |  | 46,56 |
|                  |  |       |
| Flate parapet m2 |  | 3,44  |

*Tabell B3. 1 Flateareal av parapet*

|  |      |
|--|------|
| Høyde opp til parapet grønt tak (m)    | 0,05 |
| Høyde opp til parapet referansetak (m) | 0,24 |

|                                       |      |
|---------------------------------------|------|
| Høyde på snø på parapet, grønt tak    | 0,41 |
| Høyde på snø på parapet, referansetak | 0,18 |

|   |        |
|---|--------|
| Volum av snø på parapet grønt tak (m3)    | 1,4104 |
| Volum av snø på parapet referansetak (m3) | 0,6192 |

*Tabell B3. 2 Volum av snø på parapet for tak 2 og tak 3*

## C Kodescript anvendt i Python for produksjon av datasettene som er anvendt for videre analyse

```
##### Importerer vektdatasettene fra NVE Sildre
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from matplotlib.dates import MonthLocator, DateFormatter
""

filsti1 = r"C:\Users\Louise\Desktop\Pyton>Lastanalyse FINAL\vekt21F.csv"
filsti2 = r"C:\Users\Louise\Desktop\Pyton>Lastanalyse FINAL\vekt22F.csv"
filsti3 = r"C:\Users\Louise\Desktop\Pyton>Lastanalyse FINAL\vekt23F.csv"

vektPollen = pd.read_csv(filsti1, sep=';') #Grønt tak lokalisert lengst sør
vektPer = pd.read_csv(filsti2, sep=';') #Referansetak lokalisert i midten
vektNektar = pd.read_csv(filsti3, sep=';') #Grønt tak lokalisert lengst nord
# og konverterer vektverdiene til float
vektdata = [vektPollen, vektPer, vektNektar]
for tak in vektdata:
    tak['Vekt (kg)'] = tak['Vekt (kg)'].str.replace(',', '.').astype(float)
##### Importerer datasett for lufttemperatur fra NVE Sildre
filsti4 = r"C:\Users\Louise\Desktop\Pyton>Lastanalyse FINAL\lufttempF.csv"
lufttemp = pd.read_csv(filsti4, sep=';')
lufttemp['Lufttemperatur (°C)'] = lufttemp['Lufttemperatur (°C)'].apply(lambda x: str(x).replace(',', '.'))
lufttemp['Lufttemperatur (°C)'] = pd.to_numeric(lufttemp['Lufttemperatur (°C)'], errors='coerce')
##### Importerer nedbørsdata fra seklime.met og Søråsjordet
filsti5 = r"C:\Users\Louise\Desktop\Pyton>Lastanalyse FINAL\nedborDogn.csv"
nedbor = pd.read_csv(filsti5, sep=';')
nedbor['Nedbør (mm)'] = nedbor['Nedbør (mm)'].str.replace(',', '.').astype(float)
##### FØR Plotter alle tak i samm graf - før databehandling
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.dates import MonthLocator, DateFormatter
import numpy as np
# Vektdata og farger
vektdata = {'Pollen': vektPollen, 'Per': vektPer, 'Nektar': vektNektar}
farger = {'Pollen': 'darkgreen', 'Per': 'gray', 'Nektar': 'lightgreen'}
# Konverter tidspunkt til datetime-format
for name, data in vektdata.items():
    data['Tidspunkt'] = pd.to_datetime(data['Tidspunkt'], format='%d.%m.%Y %H:%M')
# Grupper dataene etter år og datasett
grouped_data = {name: data.groupby(data['Tidspunkt'].dt.year) for name, data in vektdata.items()}
# Loop gjennom hvert år
for year, _ in next(iter(grouped_data.values())):
    # Opprett en figur
    plt.figure(figsize=(25, 12))
    # Loop gjennom hvert datasett
    for name, group in grouped_data.items():
        # Sjekk om året er tilgjengelig for datasettet
        if year in group.groups:
            data = group.get_group(year)
            plt.plot(data['Tidspunkt'], data['Vekt (kg)'], 'o', label=name, color=farger[name], linewidth=3.0)
    #plt.xlabel("Tidspunkt", fontsize=24)
    plt.ylabel('Vekt (kg)', fontsize=24)
    plt.title(f'Registrert vekt (kg) i {year} - før databehandling', fontsize=30, weight='light', y=1.02)
    plt.legend(fontsize=20, loc='center left', bbox_to_anchor=(1.0, 0.93)) # Legend utenfor plottet på høyre side
    # Juster x-aksen til å vise måneder
    plt.gca().xaxis.set_major_locator(MonthLocator())
    plt.gca().xaxis.set_major_formatter(DateFormatter('%B'))
    # Legg til rutenett
    plt.grid(True)
    # Øk oppløsningen langs y-aksen
    plt.gca().yaxis.get_major_locator().set_params(nbins=10)
    plt.xticks(fontsize=16)
    min_val = 0
    if year == 2018:
```

```

max_val = 28000
else:
max_val = 17000
plt.yticks(np.arange(min_val, max_val + 1000, 1000), fontsize=16)
plt.show()
#%% Erstatte ekstremverdier med Nan ved visuell sjekk
# Pollen: ekstremverdier fjernet med indeks
indekserPollen = [30970, 30971, 30972, 30984, 30977, 30976, 30975, 30985, 30983, 30978, 30974, 115028, 115029, 115027,
115030, 115031, 115032, 115033, 115034, 115035, 115036,
115037, 115038, 115039, 115040, 115041, 115042, 115043, 115026, 115044, 115045,
115046, 115047, 115048, 115049, 115050, 115051, 115052, 115053, 115054, 115055,
115056, 115057, 115058, 115025, 115059, 294401, 294402, 294403, 294404, 294405
]
vektPollen.loc[indekserPollen, 'Vekt (kg)'] = np.nan
# Nektar: ekstremverdier fjernet med indeks
indekserNektar = [78896, 78897, 78895, 96755, 96751, 96757, 110865, 110902, 103811, 103849, 103812, 103815, 103951
]
vektNektar.loc[indekserNektar, 'Vekt (kg)'] = np.nan
# Per: ekstremverdier fjernet med indeks
indekserPer = [20340, 231106, 232718, 111047, 111048, 111049, 111046
]
vektPer.loc[indekserPer, 'Vekt (kg)'] = np.nan
# Pollen: ekstremverdier fjernet med intervall
vektPollen.loc[(vektPollen['Tidspunkt'] >= '2019-02-14 00:00:00') & (vektPollen['Tidspunkt'] <= '2019-02-16 23:59:59') &
(vektPollen['Vekt (kg)'] < 13000), 'Vekt (kg)'] = np.nan
vektPollen.loc[(vektPollen['Tidspunkt'] >= '2019-02-16 00:00:00') & (vektPollen['Tidspunkt'] <= '2019-02-20 23:59:59') &
(vektPollen['Vekt (kg)'] < 11500), 'Vekt (kg)'] = np.nan
vektPollen.loc[(vektPollen['Tidspunkt'] >= '2019-03-04 00:00:00') & (vektPollen['Tidspunkt'] <= '2019-03-10 23:59:59') &
(vektPollen['Vekt (kg)'] < 11000), 'Vekt (kg)'] = np.nan
vektPollen.loc[(vektPollen['Tidspunkt'].dt.year == 2022) & (vektPollen['Tidspunkt'].dt.month == 1) & (vektPollen['Vekt (kg)'] >
11000), 'Vekt (kg)'] = np.nan
vektPollen.loc[(vektPollen['Tidspunkt'].dt.year == 2023) & (vektPollen['Tidspunkt'].dt.month == 1) & (vektPollen['Vekt (kg)'] <
12600), 'Vekt (kg)'] = np.nan
vektPollen.loc[(vektPollen['Tidspunkt'].dt.year == 2023) & (vektPollen['Tidspunkt'].dt.month == 4) & (vektPollen['Vekt (kg)'] <
9900), 'Vekt (kg)'] = np.nan
vektPollen.loc[(vektPollen['Tidspunkt'].dt.year == 2023) & (vektPollen['Tidspunkt'].dt.month == 4) & (vektPollen['Vekt (kg)'] >
12600), 'Vekt (kg)'] = np.nan
# Nektar: ekstremverdier fjernet med intervall
vektNektar.loc[(vektNektar['Tidspunkt'].dt.year == 2019) & (vektNektar['Tidspunkt'].dt.month == 10) & (vektNektar['Vekt (kg)']
< 10000), 'Vekt (kg)'] = np.nan
vektNektar.loc[(vektNektar['Tidspunkt'].dt.year == 2019) & (vektNektar['Tidspunkt'].dt.month == 11) & (vektNektar['Vekt (kg)']
< 10500), 'Vekt (kg)'] = np.nan
vektNektar.loc[(vektNektar['Tidspunkt'].dt.year == 2019) & (vektNektar['Tidspunkt'].dt.month == 11) & (vektNektar['Vekt (kg)']
> 13200), 'Vekt (kg)'] = np.nan
vektNektar.loc[(vektNektar['Tidspunkt'].dt.year == 2019) & (vektNektar['Tidspunkt'].dt.month == 12) & (vektNektar['Vekt (kg)']
> 13200), 'Vekt (kg)'] = np.nan
vektNektar.loc[(vektNektar['Tidspunkt'].dt.year == 2019) & (vektNektar['Tidspunkt'].dt.month == 12) & (vektNektar['Vekt (kg)']
< 11100), 'Vekt (kg)'] = np.nan
vektNektar.loc[(vektNektar['Tidspunkt'].dt.year == 2020) & (vektNektar['Tidspunkt'].dt.month == 3) & (vektNektar['Vekt (kg)'] <
11000), 'Vekt (kg)'] = np.nan
vektNektar.loc[(vektNektar['Tidspunkt'].dt.year == 2020) & (vektNektar['Tidspunkt'].dt.month == 11) & (vektNektar['Vekt (kg)']
> 13000), 'Vekt (kg)'] = np.nan
vektNektar.loc[(vektNektar['Tidspunkt'].dt.year == 2020) & (vektNektar['Tidspunkt'].dt.month == 7) & (vektNektar['Vekt (kg)'] <
9500), 'Vekt (kg)'] = np.nan
vektNektar.loc[(vektNektar['Tidspunkt'].dt.year == 2020) & (vektNektar['Tidspunkt'].dt.month == 8) & (vektNektar['Vekt (kg)'] <
9500), 'Vekt (kg)'] = np.nan
vektNektar.loc[(vektNektar['Tidspunkt'].dt.year == 2020) & (vektNektar['Tidspunkt'].dt.month == 9) & (vektNektar['Vekt (kg)'] <
10200), 'Vekt (kg)'] = np.nan
vektNektar.loc[(vektNektar['Tidspunkt'].dt.year == 2020) & (vektNektar['Tidspunkt'].dt.month == 10) & (vektNektar['Vekt (kg)']
< 10000), 'Vekt (kg)'] = np.nan
vektNektar.loc[(vektNektar['Tidspunkt'].dt.year == 2020) & (vektNektar['Tidspunkt'].dt.month == 10) & (vektNektar['Vekt (kg)']
> 12000), 'Vekt (kg)'] = np.nan
vektNektar.loc[(vektNektar['Tidspunkt'] >= '2020-10-05 00:00:00') & (vektNektar['Tidspunkt'] <= '2020-10-25 23:59:59') &
(vektNektar['Vekt (kg)'] > 12000), 'Vekt (kg)'] = np.nan
vektNektar.loc[(vektNektar['Tidspunkt'].dt.year == 2020) & (vektNektar['Tidspunkt'].dt.month == 11) & (vektNektar['Vekt (kg)']
< 10600), 'Vekt (kg)'] = np.nan
vektNektar.loc[(vektNektar['Tidspunkt'].dt.year == 2020) & (vektNektar['Tidspunkt'].dt.month == 11) & (vektNektar['Vekt (kg)']
> 13000), 'Vekt (kg)'] = np.nan
vektNektar.loc[(vektNektar['Tidspunkt'].dt.year == 2020) & (vektNektar['Tidspunkt'].dt.month == 12) & (vektNektar['Vekt (kg)']
< 11000), 'Vekt (kg)'] = np.nan
vektNektar.loc[(vektNektar['Tidspunkt'].dt.year == 2020) & (vektNektar['Tidspunkt'].dt.month == 12) & (vektNektar['Vekt (kg)']
> 13000), 'Vekt (kg)'] = np.nan

```

```

vektNektar.loc[(vektNektar["Tidspunkt"].dt.year == 2022) & (vektNektar["Tidspunkt"].dt.month == 10) & (vektNektar["Vekt (kg)"]
< 10700), 'Vekt (kg)'] = np.nan
vektNektar.loc[(vektNektar["Tidspunkt"].dt.year == 2022) & (vektNektar["Tidspunkt"].dt.month == 11) & (vektNektar["Vekt (kg)"]
< 10500), 'Vekt (kg)'] = np.nan
vektNektar.loc[(vektNektar["Tidspunkt"].dt.year == 2022) & (vektNektar["Tidspunkt"].dt.month == 12) & (vektNektar["Vekt (kg)"]
< 10700), 'Vekt (kg)'] = np.nan
vektNektar.loc[(vektNektar["Tidspunkt"].dt.year == 2023) & (vektNektar["Tidspunkt"].dt.month == 1) & (vektNektar["Vekt (kg)"] <
12600), 'Vekt (kg)'] = np.nan
vektNektar.loc[(vektNektar["Tidspunkt"].dt.year == 2023) & (vektNektar["Tidspunkt"].dt.month == 4) & (vektNektar["Vekt (kg)"] <
10700), 'Vekt (kg)'] = np.nan
# Per: ekstremverdier fjernet med intervall
vektPer.loc[(vektPer["Tidspunkt"].dt.year == 2018) & (vektPer["Tidspunkt"].dt.month == 11) & (vektPer["Vekt (kg)"] < 2280), 'Vekt
(kg)'] = np.nan
vektPer.loc[(vektPer["Tidspunkt"].dt.year == 2020) & (vektPer["Tidspunkt"].dt.month == 7) & (vektPer["Vekt (kg)"] < 2420), 'Vekt
(kg)'] = np.nan
vektPer.loc[(vektPer["Tidspunkt"].dt.year == 2020) & (vektPer["Tidspunkt"].dt.month == 9) & (vektPer["Vekt (kg)"] < 2420), 'Vekt
(kg)'] = np.nan
vektPer.loc[(vektPer["Tidspunkt"].dt.year == 2018) & (vektPer["Tidspunkt"].dt.month == 7) & (vektPer["Vekt (kg)"] > 2800), 'Vekt
(kg)'] = np.nan
vektPer.loc[(vektPer["Tidspunkt"].dt.year == 2020) & (vektPer["Tidspunkt"].dt.month == 10) & (vektPer["Vekt (kg)"] < 2420), 'Vekt
(kg)'] = np.nan
vektPer.loc[(vektPer["Tidspunkt"].dt.year == 2023) & (vektPer["Tidspunkt"].dt.month == 4) & (vektPer["Vekt (kg)"] < 2480), 'Vekt
(kg)'] = np.nan
vektPer.loc[(vektPer["Tidspunkt"].dt.year == 2023) & (vektPer["Tidspunkt"].dt.month == 1) & (vektPer["Vekt (kg)"] < 2000), 'Vekt
(kg)'] = np.nan
# %% Justerer tidspunkt på tak 3 - Nektar
vektNektarR = vektNektar.copy()
import pandas as pd
# Anta at vektNektarR er navnet på den opprinnelige dataframen
# Angi datoene for observasjonene som skal justeres
dato_observasjon = pd.to_datetime('2019-03-31 03:10:00')
dato_tilbake = pd.to_datetime('2019-02-09 06:10:00')
# Angi grensedatoen for observasjonene som skal justeres
grensedato = pd.to_datetime('2020-12-02')
# Sjekk om observasjonen er før grensedatoen for justering
if dato_observasjon < grensedato:
    # Beregn differansen mellom datoene
    forskjell = dato_observasjon - dato_tilbake
    # Juster tidspunktet i kolonnen "Tidspunkt" ved å legge til differansen
    vektNektarR.loc[vektNektarR["Tidspunkt"] < grensedato, "Tidspunkt"] -= forskjell
vektNektar = vektNektarR.copy()
# Se på de endrede verdiene i DataFrame for å bekrefte endringene
vektNektar.head()
# %% Fjerner alle verdier frem til en felles dato og tidspunkt
vektPollen = vektPollen[vektPollen["Tidspunkt"] > '2018-09-01 00:00:00']
vektNektar = vektNektar[vektNektar["Tidspunkt"] > '2018-09-01 00:00:00']
vektPer = vektPer[vektPer["Tidspunkt"] > '2018-09-01 00:00:00']
# %%
lufttemp = lufttemp[lufttemp["Tidspunkt"] > '2018-09-01 00:00:00']
# %% ETTER Plotter alle tak i samme graf per år - etter databehandling
vektdata = {'Pollen': vektPollen, 'Per': vektPer, 'Nektar': vektNektar}
farger = {'Pollen': 'darkgreen', 'Per': 'gray', 'Nektar': 'lightgreen'}
# Konverter tidspunkt til datetime-format
for name, data in vektdata.items():
    data["Tidspunkt"] = pd.to_datetime(data["Tidspunkt"], format='%d.%m.%Y %H:%M:%S')

# Grupper dataene etter år og datasett
grouped_data = {name: data.groupby(data["Tidspunkt"].dt.year) for name, data in vektdata.items()}

# Loop gjennom hvert år
for year, _ in next(iter(grouped_data.values())):
    # Opprett en figur
    plt.figure(figsize=(25, 12))
    # Loop gjennom hvert datasett
    for name, group in grouped_data.items():
        # Sjekk om året er tilgjengelig for datasettet
        if year in group.groups:
            data = group.get_group(year)
            plt.plot(data["Tidspunkt"], data["Vekt (kg)"], 'o', label=name, color=farger[name], linewidth=4.5)
    # plt.xlabel("Tidspunkt", fontsize=24)
    plt.ylabel("Vekt (kg)", fontsize=24)
    plt.title(f'Registrert vekt (kg) i {year} - etter databehandling', fontsize=30, weight='light', y=1.02)
    plt.legend(fontsize=20, loc='center left', bbox_to_anchor=(1.0, 0.93)) # Legend utenfor plottet på høyre side

```



```

# Juster x-aksen til å vise måneder
plt.gca().xaxis.set_major_locator(MonthLocator())
plt.gca().xaxis.set_major_formatter(DateFormatter('%B'))
# Legg til rutenett
plt.grid(True)
# Øk oppløsningen langs y-aksen
plt.gca().yaxis.set_major_locator().set_params(nbins=10)
plt.xticks(fontsize=16)
min_val = 0
max_val = 17000
plt.yticks(np.arange(min_val, max_val + 1000, 1000), fontsize=16)
plt.show()
##### Legger til ny kolonne med sesong + årstall på vektdatasettene
def legg_til_sesongkolonne(dataframe):
    # Konverter 'Tidspunkt' til datetime
    dataframe['Tidspunkt'] = pd.to_datetime(dataframe['Tidspunkt'], format='%d.%m.%Y %H:%M')
    # Opprett kolonnene "Sesong" og "Sesong_År" basert på måneden
    dataframe['Sesong'] = dataframe['Tidspunkt'].dt.month.map({
        1: 'Vinter', 2: 'Vinter', 3: 'Vår',
        4: 'Vår', 5: 'Vår', 6: 'Sommer',
        7: 'Sommer', 8: 'Sommer', 9: 'Høst',
        10: 'Høst', 11: 'Høst', 12: 'Vinter'
    }) + ' ' + dataframe['Tidspunkt'].dt.strftime('%Y')
# Bruk funksjonene på hvert dataframe
legg_til_sesongkolonne(vektPollen)
legg_til_sesongkolonne(vektPer)
legg_til_sesongkolonne(vektNektar)
##### Maks og min vekt (kg) per sesong
import pandas as pd
# Liste over datasettene med deres navn
vektdata = {'vektPollen': vektPollen, 'vektPer': vektPer, 'vektNektar': vektNektar}
# Gå gjennom hvert datasett
for navn, datasett in vektdata.items():
    # Finn indeksen for raden med den minste vekten
    minste_indeks = datasett['Vekt (kg)'].idxmin()
    # Hent ut tidspunktet og den minste vekten
    tidspunkt_min_vekt = datasett.loc[minste_indeks, 'Tidspunkt']
    minste_vekt = datasett.loc[minste_indeks, 'Vekt (kg)']
    # Skriv ut informasjonen
    print(f"For datasett {navn}:")
    print(f"Den minste registrerte vekten er: {minste_vekt} kg, registrert på tidspunktet: {tidspunkt_min_vekt}\n")
##### Lager liste med nabopunkter for validering
import pandas as pd
def finn_nabopunkter(df, tidspunkt, vekt_kg, antall_nabopunkter):
    # Finn indeksen for det gitte tidspunktet
    indeks = df[df['Tidspunkt'] == tidspunkt].index[0]
    # Definer indeksene for nabopunktene
    start_indeks = max(0, indeks - antall_nabopunkter)
    slutt_indeks = min(len(df), indeks + antall_nabopunkter + 1)
    # Hent ut tidspunktene og vektverdiene for nabopunktene
    nabopunkter = [(df.loc[i, 'Tidspunkt'], df.loc[i, 'Vekt (kg)']) for i in range(start_indeks, slutt_indeks)]
    return nabopunkter
# Bruk funksjonen til å finne nabopunktene
naboPollen = finn_nabopunkter(vektPollen, '2022-09-07 11:00:00', 7575.6, 10)
naboPer = finn_nabopunkter(vektPer, '2022-05-03 09:00:00', 2428.75, 10)
naboNektar = finn_nabopunkter(vektNektar, '2023-06-17 12:40:00', 8742.438, 10)
##### Plotting av egenvektgrafer
def plot_nabo(nabo, datasett_navn):
    tidspunkter = [punkt[0] for punkt in nabo] # Tidspunkter
    vekter = [punkt[1] for punkt in nabo] # Vektverdier
    tidspunkter_str = [tid.strftime('%H:%M') for tid in tidspunkter] # Konverter tidspunkter til strenger
    midten = len(tidspunkter) // 2 # Indeksen til det midterste punktet
    plt.figure(figsize=(8, 6))
    plt.plot(tidspunkter_str, vekter, marker='o', linestyle='-', color='b')
    # Marker det midterste punktet som rødt
    plt.plot(tidspunkter_str[midten], vekter[midten], marker='o', linestyle='-', color='r')
    plt.title(f"Nabopunkter egenvekt {datasett_navn}", fontsize=20)
    plt.ylabel("Vekt (kg)", fontsize=16)
    plt.xticks(rotation=45, ha='right', fontsize=12) # Roter x-aksen for bedre lesbarhet
    plt.yticks(fontsize=12)
    plt.grid(True)
    plt.tight_layout()
    plt.show()

```

```

# Plot nabopunktene for vektPollen
plot_nabo(naboPollen, 'Pollen - Tak 1')
# Plot nabopunktene for vektPer
plot_nabo(naboPer, 'Per - Tak 2')
# Plot nabopunktene for vektNektar
plot_nabo(naboNektar, 'Nektar - Tak 3')
%% Funksjon som finner minste vekt i dataframe input
def minste_vekt(datasett):
    minste_indeks = datasett['Vekt (kg)'].idxmin()
    # Hent ut den minste vekten
    minste_vekt = datasett.loc[minste_indeks, 'Vekt (kg)']
    return minste_vekt
%% Lagrer minste registrerte verdier i variabler
tørrPollen1 = minste_vekt(vektPollen)
tørrPer1 = minste_vekt(vektPer)
tørrNektar1 = minste_vekt(vektNektar)
%% Trekker fra egenlast for å finne nedbørslast
vektPollen['Nedbør (kg)'] = vektPollen['Vekt (kg)'] - tørrPollen1
vektNektar['Nedbør (kg)'] = vektNektar['Vekt (kg)'] - tørrNektar1
vektPer['Nedbør (kg)'] = vektPer['Vekt (kg)'] - tørrPer1
%% Finner regnlast ved å trekke fra nedbørsvekt på Per fra Pollen og Nektar
# Kopier dataene for å unngå endringer i de opprinnelige datasettene
regnvektPollen = vektPollen.copy()
regnvektNektar = vektNektar.copy()
# Velg kun de relevante nedbørsverdiene basert på tidspunktene i regnvektPollen og regnvektNektar
relevant_nedbor_Pollen = vektPer.loc[vektPer['Tidspunkt'].isin(regnvektPollen['Tidspunkt']), 'Nedbør (kg)'].values
relevant_nedbor_Nektar = vektPer.loc[vektPer['Tidspunkt'].isin(regnvektNektar['Tidspunkt']), 'Nedbør (kg)'].values
# Utfør operasjonen på kopiene
regnvektPollen['Regnlast (kg)'] = regnvektPollen['Nedbør (kg)'] - relevant_nedbor_Pollen
regnvektNektar['Regnlast (kg)'] = regnvektNektar['Nedbør (kg)'] - relevant_nedbor_Nektar
%% Normalisering av vektverdiene på størrelse kg/m
takflate = 46.6 #Areal av takene i m2
vektPollen['Nedbør (kg/m2)'] = vektPollen['Nedbør (kg)'] / takflate
regnvektPollen['Regnlast (kg/m2)'] = regnvektPollen['Regnlast (kg)'] / takflate
vektNektar['Nedbør (kg/m2)'] = vektNektar['Nedbør (kg)'] / takflate
regnvektNektar['Regnlast (kg/m2)'] = regnvektNektar['Regnlast (kg)'] / takflate
vektPer['Nedbør (kg/m2)'] = vektPer['Nedbør (kg)'] / takflate
%% Normaliserer på størrelse med Newton (kN/m2)
vektPollen['Nedbør (kN/m2)'] = vektPollen['Nedbør (kg/m2)'] *(9.81/1000)
regnvektPollen['Regnlast (kN/m2)'] = regnvektPollen['Regnlast (kg/m2)'] *(9.81/1000)
vektNektar['Nedbør (kN/m2)'] = vektNektar['Nedbør (kg/m2)'] *(9.81/1000)
regnvektNektar['Regnlast (kN/m2)'] = regnvektNektar['Regnlast (kg/m2)'] *(9.81/1000)
vektPer['Nedbør (kN/m2)'] = vektPer['Nedbør (kg/m2)'] *(9.81/1000)

```



**Norges miljø- og biovitenskapelige universitet**  
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet  
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003  
NO-1432 Ås  
Norway