



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2021 30 stp
Fakultet for realfag og teknologi

Modellering og analyse av den termiske koeffisienten på flate tak med ulik varmegjennomgang - Casestudier i Oslo, Bergen og Tromsø

Modelling and analysis of the thermal coefficient on
flat roofs with different heat transfer
- Case studies in Oslo, Bergen and Tromsø

Vetle Holtan Krogsrud
Byggeteknikk og arkitektur

Varmegjennomgang:

«Varmetransport, i en vegg (i hus, fryseboks, varmtvannsbeholder osv.) består av varmeledning gjennom ensartede deler av veggen og varmeovergang på grenseflatene mellom forskjellig stoff i veggen og mellom veggen og stoffet utenfor»

(Ormestad, 2019)

Forord

Denne oppgaven representerer mitt avsluttende arbeid med mastergraden i «byggeteknikk og arkitektur» ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet. Oppgaven er skrevet ved fakultetet for realfag og teknologi i tidsrommet august til og med desember 2021. Arbeidet har vært en krevende prosess, men samtidig veldig spennende og lærerikt.

Jeg ønsker å rette en stor takk til professor Thomas Kringlebotn Thiis og stipendiat Iver Frimannslund for jevnlig og god veiledning i arbeidet med oppgaven. De mange lærerike diskusjonene og akademiske samtalene har bidratt til å gi den nødvendige innsikt og inspirasjon for å gjennomføre oppgaven. Jeg vil også benytte anledningen til å takke førsteamanuensis Ulf Geir Indahl for hjelpen jeg fikk i forbindelse med den statistiske metoden benyttet i denne oppgaven.

Takk til familie og kjære for all støtte og oppmuntring igjennom arbeidet. Avslutningsvis vil jeg også takke venner og medstudenter for alle de fine og morsomme øyeblikkene her på NMBU.

Ås, 15.12.2021

Vetle Holtan Krogsrud

Sammendrag

Kunnskap om de termiske varmeledningsegenskapene til takkonstruksjoner er viktig for å kunne redusere snølasten på tak, samt kjenne til energibalansen til snødekket på taket. Allikevel blir takets varmetransport ofte ignorert i dimensjonering av snølasten. Mangelen på en enkel og transparent metode for fastsettelse av den termiske koeffisienten medfører at ingeniører stadig unnlater å hensynta takets varmegjennomgang i snølastberegningen. Den termiske koeffisienten er en reduksjonsfaktor benyttet for å redusere snølastene på tak med høy varmegjennomgang. I tillegg tar ikke dagens praktiserte regelverk høyde for at snølastene på et tak kan øke når innetemperaturen er tilstrekkelig lav. Med bakgrunn i dette er det naturlig å stille spørsmål ved om dagens krav til dimensjonerende snølast bør gjøres mer treffsikker. Det stilles også spørsmålsteget ved om dagens metode for fastsettelse av den termiske koeffisienten kan forenkles og gjøres mer anvendbar for ingeniører.

Denne masteroppgaven forsøker å besvare spørsmålene ved å gjennomføre bygningsfysiske analyser for tre ulike områder i Norge: Oslo, Bergen og Tromsø. Fire metoder for differensiering av bygningers innetemperatur og tekniske krav er evaluert oppimot et 0-alternativ. 0-alternativet beskriver lastsituasjonen på mark. Akkumulerte snømengder er simulert i et Excel-basert energisimuleringsprogram, som beregner den endimensjonale snøakkumuleringen og snøsmeltingen for et homogent snødekke. For å hensynta samt begrunne de geografiske variasjonene i snølast, ble resultatene fra simuleringene bearbeidet med hensikt i å kvantifisere alle direkte og indirekte effekter som påvirker lastbildet.

Resultatene fra analysene indikerer at dagens krav i NS-EN 1991-1-3, for fastsettelse av den termiske koeffisienten, i gitte tilfeller kan gi både høyere og lavere utnyttelse av konstruksjoner enn det de prosjekterende ønsker. Scenarioene som har blitt vurdert indikerer at den termiske koeffisienten kan øke med over 10 % for fryselaagre som følger krav i TEK17. Økningen skyldes hovedsakelig at mer flytende nedbør akkumulerer i snødekket. Mine analyser viser også at konstruksjoner med høy innetemperatur kan få lavere reduksjoner i taklast enn det dagens regelverk gir. Dette utgjør en fare for at bygg underdimensjoneres.

En enkel og transparent metode for fastsettelse av den termiske koeffisienten er frembrakt gjennom tabulerte verdier. Tabellene differensierer mellom forskjellige innetemperaturer og taktyper for å hensynta de observerte variasjonene i den termiske koeffisienten.

Summary

Knowledge about the thermal conductivity properties of roof structures is important to reduce snow loads on roofs, as well as knowing the energy balance on roofs. Nevertheless, the roof's heat transport is often ignored in dimensioning snow loads. The lack of a simple and transparent method for determining the thermal coefficient means that engineers constantly fail to take the roof's heat transfer into account in the snow load calculation. The thermal coefficient is a reduction factor used to reduce the snow loads on roofs with high heat transfer. In addition, current regulations do not consider that the snow loads on a roof can increase when the indoor temperature is sufficiently low. Based on this, it is natural to question whether the current requirements for dimensioning snow loads should be made more accurate. It is also questionable whether the current method for determining the thermal coefficient can be simplified and made more applicable to engineers.

This master's thesis attempts to answer the questions by conducting building physical analyzes for three different areas in Norway: Oslo, Bergen and Tromsø. Four methods for differentiating indoor temperatures and technical requirements have been evaluated against a 0-alternative. The 0-alternative describes the load situation on the ground. The accumulation of snow is simulated in an Excel-based energy simulation program, which calculates the one-dimensional snow accumulation and snowmelt for a homogeneous snow cover. To consider and justify the geographical variations in snow load, the results from the simulations were processed with the intention of quantifying all direct and indirect effects that affect the snow load.

The results from the analyzes indicate that the current requirements in NS-EN 1991-1-3, for determining the thermal coefficient, can in certain cases give both higher and lower utilization of structures than what the designers want. The scenarios that have been assessed indicate that the thermal coefficient can increase by more than 10% for cold stores of requirements in TEK17. The increase is mainly due to more liquid precipitation accumulating in the snow cover. The analyzes also indicate that constructions with a high indoor temperature can have lower reductions in roof load than the current regulations provide. This poses a danger that buildings will be under-dimensioned.

A simple and transparent method for determining the thermal coefficient is produced through tabulated values. The tables differentiate between different indoor temperatures and roof types to consider the observed variations in the thermal coefficient.

Innhold

| | |
|---|----------|
| FORORD | I |
| SAMMENDRAG | III |
| SUMMARY | V |
| INNHold | VII |
| FIGURER..... | XI |
| TABELLER..... | XV |
| FORKORTELSER OG BEGREPER | XVII |
| 1 INTRODUKSJON..... | 1 |
| 1.1 MOTIVASJON OG PROBLEMSTILLING | 1 |
| 1.2 STRUKTUR I OPPGAVEN | 3 |
| 2 BAKGRUNN OG TEORI..... | 1 |
| 2.1 BYGGETEKNIKK OG BYGGETRADISJON | 1 |
| 2.1.1 Byggeforskrifter og tekniske standarder | 3 |
| 2.2 DIMENSJONERING AV SNØLASTER | 4 |
| 2.2.1 Snølaststandarden | 4 |
| 2.2.2 Dimensjonerende snølast | 5 |
| 2.2.3 Den termiske koeffisienten | 7 |
| 2.3 TERMOFYSISKE PRINSIPPER OG ENERGIBALANSEN I SNØ | 10 |
| 2.3.1 Varme | 10 |
| 2.3.2 Fasediagrammet..... | 10 |
| 2.3.3 Faseendringer på molekylært nivå..... | 11 |
| 2.3.4 Entalpi..... | 12 |
| 2.3.5 Sublimasjon av snø..... | 13 |
| 2.3.6 Metamorfose i snø..... | 15 |
| 2.4 BYGNINGSFYSIKK | 16 |
| 2.4.1 Varmetransport i en bygning..... | 16 |
| 2.4.2 Varmemotstand og varmegjennomgang..... | 17 |
| 2.4.3 Fourier's lov..... | 17 |
| 2.5 SNØMODELLERING | 18 |
| 2.5.1 Energi- og massebalanse | 19 |
| 2.5.2 Snøtemperatur, smelting og frysing i ESCIMO..... | 19 |
| 2.5.3 ERA5 data | 21 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.6 | SIMULERINGER OG STATISTISKE PRINSIPPER | 22 |
| 2.6.1 | <i>Köppens klimaklassifisering</i> | 22 |
| 2.6.2 | <i>Korrelasjonsanalyse</i> | 23 |
| 2.6.3 | <i>Regresjonsanalyse</i> | 23 |
| 2.6.4 | <i>Ekstremverdianalyse</i> | 25 |
| 2.7 | KLIMAENDRINGER | 26 |
| 3 | METODE | 28 |
| 3.1 | DEN KVANTITATIVE METODEN | 29 |
| 3.2 | MODELLBESKRIVELSE: SNØMODELLEN | 29 |
| 3.2.1 | <i>Antakelser</i> | 30 |
| 3.3 | CASEOMRÅDENE OG ALTERNATIVENE..... | 31 |
| 3.3.1 | <i>Caseområdene</i> | 31 |
| 3.3.2 | <i>Alternativene</i> | 32 |
| 3.3.3 | <i>Datagrunnlaget</i> | 34 |
| 3.4 | SNØSIMULERING | 35 |
| 3.4.1 | <i>Energibalansen</i> | 35 |
| 3.4.2 | <i>Implementering av varmetransport gjennom tak</i> | 36 |
| 3.5 | EFFEKTEN AV FLYTENDE NEDBØR | 37 |
| 3.5.1 | <i>Avrenning av regnvann</i> | 38 |
| 3.5.2 | <i>Absorbering av regnvann</i> | 39 |
| 3.5.3 | <i>Frysing av regnvann</i> | 40 |
| 3.6 | DEN TERMISKE KOEFFISIENTEN | 41 |
| 3.6.1 | <i>Beregning av den termiske koeffisienten</i> | 42 |
| 3.6.2 | <i>Variasjoner i snølaster og beregning av returlaster</i> | 44 |
| 3.6.3 | <i>Ekstremverdikorrigeringer i fastsettelse av endelig C_T faktor</i> | 45 |
| 3.6.4 | <i>Regresjonsanalysen</i> | 46 |
| 4 | RESULTATER | 48 |
| 4.1 | KORRELASJONSANALYSER..... | 49 |
| 4.2 | SWE VARIASJONER..... | 51 |
| 4.3 | SWE PÅVIRKNING AV REGNVANN..... | 52 |
| 4.3.1 | <i>Oslo</i> | 52 |
| 4.3.2 | <i>Bergen</i> | 53 |
| 4.3.3 | <i>Tromsø</i> | 54 |
| 4.4 | C_{TDM} FAKTORENE | 55 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.4.1 | <i>Oslo</i> | 55 |
| 4.4.2 | <i>Bergen</i> | 57 |
| 4.4.3 | <i>Tromsø</i> | 59 |
| 4.5 | REGRESJONSMODELLER | 61 |
| 4.6 | VARIASJON AV C_T MOT MARKLAST | 65 |
| 5 | ØVRIGE C_{TDIM} FAKTORER | 67 |
| 6 | DISKUSJON | 72 |
| 6.1 | EFFEKTEN KLIMATISKE VARIABLE HAR PÅ AKKUMULERT SWE | 72 |
| 6.1.1 | <i>Korrelasjonsanalysene</i> | 72 |
| 6.1.2 | <i>Regnvann og akkumulert SWE</i> | 75 |
| 6.1.3 | <i>Oppsummering</i> | 78 |
| 6.2 | DEN TERMISKE KOEFFISIENTEN | 79 |
| 6.2.1 | <i>Variasjoner i varmefluks og C_T</i> | 79 |
| 6.2.2 | <i>Seleksjonsprosessen</i> | 82 |
| 6.2.3 | <i>Sammenligning av modellerte C_T verdier med eksisterende regelverk</i> | 84 |
| 6.2.4 | <i>Bruk av C_T koeffisienten</i> | 86 |
| 6.2.5 | <i>Oppsummering</i> | 88 |
| 6.3 | FREMTIDIGE C_T VERDIER | 89 |
| 6.3.1 | <i>Direkte effekter: Klimatiske endringer</i> | 89 |
| 6.3.2 | <i>Indirekte effekter: Bygningsfysiske endringer</i> | 91 |
| 6.3.3 | <i>Oppsummering</i> | 91 |
| 6.4 | FORENKLINGER OG ANTAKELSER | 92 |
| 6.4.1 | <i>Forskriftsmessige forenklinger</i> | 92 |
| 6.4.2 | <i>Tekniske forenklinger</i> | 92 |
| 7 | KONKLUSJON | 95 |
| 7.1 | VIDERE ARBEID | 96 |
| 8 | REFERANSER | 97 |

Figurer

| | |
|---|----|
| Figur 1. Eksempel på oppbygning av kompakte tak. Illustrasjonen er hentet fra (Byggforskserien, 2019) og senere modifisert av forfatter. | 1 |
| Figur 2. Eksempel på oppbygning av tak med isolerte takflater og luftet tekning. Illustrasjonen er hentet fra (Byggforskserien, 2019) og senere modifisert av forfatter. | 2 |
| Figur 3. Eksempel på oppbygning av tak med kalde loftsrom. Illustrasjonen er hentet fra (Byggforskserien, 2019) og senere modifisert av forfatter. | 2 |
| Figur 4. Fasediagrammet for vann hentet fra (Tipler & Mosca, 2008, s. 673). | 11 |
| Figur 5. Tiden som kreves for at vann skal gå fra is ved -20°C til vanndamp ved 120°C ved konstant varmetilførsel i et lukket system. Figuren er hentet fra (Tipler & Mosca, 2008, s. 597)..... | 12 |
| Figur 6. Psykrometri diagrammet. Figuren er hentet fra (Edwardsen & Ramstad, 2014, s. 382). | 14 |
| Figur 7. Köppens klima klassifisering over Norge med tilhørende klassifiseringskjema. Illustrasjon og data er hentet fra (Kottek & Rubel, u.å.). | 22 |
| Figur 8. Hetroskedalsk vs. homoskedalsk fordeling. | 24 |
| Figur 9. Trendbilde for maksimal snødybde fra år 1971 til 2000 (Dyrrdal et al., 2013, s. 174). | 26 |
| Figur 10. Korrelasjonsplott mellom snødybde og temperatur. Figuren er hentet fra (Dyrrdal et al., 2013, s. 177)..... | 27 |
| Figur 11. Fordelingen av temperaturdominerte områder (trekant), nedbørdominerte områder (lukket sirkel) og begge (åpen sirkel). Figuren er hentet fra (Dyrrdal et al., 2013, s. 178). | 27 |
| Figur 12. Generell beskrivelse av arbeidsgangen i metoden..... | 28 |
| Figur 13. Caseområdene. Illustrasjoner hentet fra (Rokka, 2021) og senere modifisert av forfatter..... | 31 |
| Figur 14. Generell beskrivelse av klargjøring av data for snøsimulering. Programvare/applikasjon øverst med tilhørende operasjon under. | 34 |
| Figur 15. Generell beskrivelse av prosessen for snømodellering..... | 35 |
| Figur 16. Energibalansen i et snødekke på mark. | 35 |
| Figur 17. Varmetransporten gjennom et tak avhenger av innetemperaturen, snøtemperaturen og takets varmemotstand. | 36 |
| Figur 18. Vannbeholdningens kretsløp i et snødekke på et tak..... | 37 |
| Figur 19. Generell beskrivelse av bearbeidingen av rådata fra ESCIMO til dimensjonerende C_T | 42 |
| Figur 20. Den log-normaliserte regresjonslinjen for marklaster og returperioder for Tromsø. Alle verdier over S_5 betegnes som gyldige (markert i grønn), mens alle verder under betegnes | |

| | |
|---|----|
| som ugyldige (markert i blå). Ugyldige verdier ekskluderes fra videre beregninger. Figuren er laget med bakgrunn i ERA5 data. | 44 |
| Figur 21. Akkumulert snødybde for stabilt kaldt klima a) og varmt kystklima b). Figurene er hentet fra (Meteorologisk Institutt, 2021). | 45 |
| Figur 22. Generell beskrivelse av seleksjonsprosessen og bearbeidingen av datagrunnlaget for regresjonsanalysene..... | 46 |
| Figur 23. Korrelasjonsmatrisene. | 50 |
| Figur 24. Gjennomsnittlig maksimal årlig snølast – Oslo..... | 51 |
| Figur 25. Gjennomsnittlig maksimal årlig snølast – Bergen..... | 51 |
| Figur 26. Gjennomsnittlig maksimal årlig snølast – Tromsø..... | 51 |
| Figur 27. Gjennomsnittlig regnvannandel i maksima SWE for Oslo. | 52 |
| Figur 28. Gjennomsnittlig absorbert regnvannandel i maksimal SWE for Oslo. | 52 |
| Figur 29. Gjennomsnittlig fryst regnvannandel i maksimal SWE for Oslo. | 52 |
| Figur 30. Gjennomsnittlig regnvannandel i maksima SWE for Bergen. | 53 |
| Figur 31. Gjennomsnittlig absorbert regnvannandel i maksimal SWE for Bergen. | 53 |
| Figur 32. Gjennomsnittlig fryst regnvannandel i maksimal SWE for Bergen. | 53 |
| Figur 33. Gjennomsnittlig regnvannandel i maksima SWE for Tromsø..... | 54 |
| Figur 34. Gjennomsnittlig absorbert regnvannandel i maksimal SWE for Tromsø..... | 54 |
| Figur 35. Gjennomsnittlig fryst regnvannandel i maksimal SWE for Tromsø. | 54 |
| Figur 36. Kumulativ prosent fordeling over årlige C_T verdier i Oslo: Bolig. | 55 |
| Figur 37. Kumulativ prosent fordeling over årlige C_T verdier i Oslo: Fryselager. | 56 |
| Figur 38. Variasjonen i C_{Tdim} mot taktype (U-verdi). | 56 |
| Figur 39. Kumulativ prosent fordeling over årlige C_T verdier i Bergen: Bolig. | 57 |
| Figur 40. Kumulativ prosent fordeling over årlige C_T verdier i Bergen: Fryselager. | 57 |
| Figur 41. Variasjonen i C_{Tdim} mot taktype (U-verdi). | 58 |
| Figur 42. Kumulativ prosent fordeling over årlige C_T verdier i Tromsø: Bolig. | 59 |
| Figur 43. Kumulativ prosent fordeling over årlige C_T verdier i Tromsø: Fryselager. | 59 |
| Figur 44. Variasjonen i C_{Tdim} mot taktype (U-verdi). | 60 |
| Figur 45. Modellert snøtemperatur mot virkelig snøtemperatur. En R-verdi på 0,97 indikerer høy tilpasning mellom data og trendlinje..... | 62 |
| Figur 46. Logaritmisk regresjon ($C_t - S_{50}$) for innetemperatur = 25°C og takvinkel = 0°. Området markert i rødt representerer spredningen av modellerte C_T -faktorer for U-verdi = 1,2..... | 65 |

| | |
|---|----|
| Figur 47. Logaritmisk regresjon ($C_T - S50$) for innetemperatur = -28°C og takvinkel = 0° . Området markert i grønt representerer spredningen av modellerte C_T -faktorer for U-verdi = 0,46. | 66 |
| Figur 48. Logaritmisk regresjon ($C_T - S50$) for innetemperatur = 4°C og takvinkel = 0° | 66 |
| Figur 49. Logaritmisk regresjon ($C_T - S50$) for innetemperatur = utetemperatur og takvinkel = 0° | 66 |
| Figur 50. U-verdiens effekt på C_{Tdim} og Δ -regnvann. Styrken på forholdet indikerer om effekten er stor eller liten. | 75 |
| Figur 51. Eksempel på simultan snøakkumulasjon på fryselager (blå linje) og snøsmelting på mark (rød linje). Observasjonene er gjort i Oslo i 1980-1981. Legg merke til at maksimal taklast forekommer samtidig som null marklast. Dette gir C_T lik uendelig. | 83 |
| Figur 52. Endring av C_T som følge av global oppvarming. | 90 |

Tabeller

| | |
|---|----|
| Tabell 1. Grenseverdier for varmegjennomgangskoeffisienten for ulike forskrifter. Verdiene er hentet fra (Wikipedia, 2021). | 3 |
| Tabell 2. Anbefalte verdier for varmegjennomgangskoeffisienten for ulike innnetemperaturer og konstruksjonsdeler. Tabellen er reproduisert fra endringsmeldingen for byggeforskriften av 1. august 1969 (Kommunal- og moderniseringsdepartementet, 1980). | 4 |
| Tabell 3. Anbefalte verdier for eksponeringsfaktoren c_e for ulik topografi. Tabellen er reproduisert fra NS-EN 1991-1-3 (Standard Norge, 2008a, s. 13). | 6 |
| Tabell 4. Anbefalte verdier for karakteristiske snølaste i Oslo, Tromsø og Bergen. Tabellen er reproduisert fra NS-EN 1991-1-3 (Standard Norge, 2008b). | 7 |
| Tabell 5. Anbefalte termiske koeffisienter i USA. Tabellen er reproduisert fra ASCE 7-16 (ASCE 7-16, 2017). | 9 |
| Tabell 6. Varmetekniske grunnbegreper og verdier. Verdiene er hentet fra (Nesje, 2021; Pedersen, 2017; Pedersen, 2019). | 10 |
| Tabell 7. Noen forhåndsdefinerte konstanter i ESCIMO (ESCIMO.spread (v2), 2016). | 30 |
| Tabell 8. Noen gjennomsnittlige meteorologiske variabler for vintermånedene (des-feb). Verdiene er frembrakt på bakgrunn av ERA5-data. | 31 |
| Tabell 9. Bruksalternativer og ulike taktyper. | 33 |
| Tabell 10. Modellerte årlige C_T verdier fra 2010 – 2019 for Oslo – Fryselager: TEK17 standard. | 43 |
| Tabell 11. Potensielle og selekterte variabler for regresjonsanalysen. Selekterte variabler er markert i grønt. | 47 |
| Tabell 12. C_{Tdim} for Oslo. | 56 |
| Tabell 13. C_{Tdim} for Bergen. | 58 |
| Tabell 14. C_{Tdim} for Tromsø. | 60 |
| Tabell 15. Selekterte variable for regresjonsanalysen. | 61 |
| Tabell 16. 5 års returlaster, 50 års returlaster og karakteristiske snølaste. | 65 |
| Tabell 17. Modellerte S_{50} for øvrige analyseområder. | 71 |
| Tabell 18. korrelerende variable med C_T og tilhørende korrelasjonsstyrke. St = sterk, M = medium, Sv = svak | 74 |
| Tabell 19. Anbefalte C_T verdier | 88 |
| Tabell 20. C_T faktorer for ingeniører. | 95 |

Forkortelser og begreper

| | |
|---------------------|--|
| C_T | Den termiske koeffisienten |
| SWE | Snow water equivalent |
| TEK17 | Byggeteknisk forskrift |
| Δ -regnvann | Forholdet mellom regnvanninnholdet i ett snødekke på tak og mark |
| ULS | Ultimate limit state |
| SLS | Service limit state |
| U-verdi | Varmegjennomgangskoeffisient |
| NS-EN 1991-1-3:2003 | Dagens snølaststandard |
| prEN 1991-1-3:2020 | Forslag til ny snølaststandard |
| R_{se} | Utvendig varmeovergangsmotstand |
| Entalpi | Mengden av varmeenergi i et system |
| S_K | Karakteristisk marklast |
| C_e | Eksponeringsfaktor |

1 Introduksjon

1.1 Motivasjon og problemstilling

Manglende og upresise metoder for fastsettelse av den termiske koeffisienten kan føre til at takkonstruksjoner med lav innetemperatur akkumulerer mer snø enn dimensjonert for, eller at takkonstruksjoner med høy innetemperatur overdimensjoneres. Underdimensjonerte konstruksjoner kan resultere i betydelige skader og skadestnader på konstruksjonen, eller i verste fall sette liv i fare ved fullstendig kollaps. Overdimensjonerte konstruksjoner vil derimot bidra til unødvendige byggekostnader for byggherren. For å motvirke dette, er det viktig å finne ut av hvilke variabler som påvirker snøakkumuleringen på tak, og hvordan dette påvirker den dimensjonerende kapasiteten til taket.

I 1990 ble det introdusert en reduksjonskoeffisient for termisk varmetransport, forkortet C_t . Hensikten var å hensynta reduksjonen av snølasten på tak med høy varmegjennomgang. Bestemmelsen ble nedfelt i europeisk standard for beregning av snølast, NS-EN 1991-1-3, og tilsier at den termiske faktoren enten må være mindre eller lik 1. Det betyr at faktoren bare kan bidra til å redusere den dimensjonerende snølasten påført en konstruksjon. Oppgaven stiller spørsmål ved om dagens praktiserte krav kan benyttes i tilfeller hvor operasjonell innetemperatur er betraktelig lavere enn normal innetemperatur. Fra et sikkerhetsmessig perspektiv er det viktig å vurdere hvorvidt dagens praktisering av snølastberegninger kan medføre at man i noen tilfeller underdimensjonerer takkonstruksjoner.

I forslaget til ny standard, prEN 1991-1-3:2020, anbefales det at bygg og konstruksjoner med operasjonell innetemperatur lavere enn $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ skal ha $C_T = 1,2$. Standarden er ikke godkjent for bruk pr. i dag, men antas å erstatte dagens standard innen få år (CEN/TC 250, 2020b).

I USA opereres det med en dynamisk C_T faktor som både kan være høyere og lavere enn 1. Verdien fastsettes på bakgrunn av taktypen (glasstak, ventilerte tak og kalde tak) og innetemperaturen i det aktuelle bygget (fryselagre, uoppvarmede bygg og oppvarmede bygg). Ved å anvende C_T faktorer basert på faste grensebetegnelser som taktype, beliggenhet og innetemperatur, kan det bli:

- 1) Enklere for ingeniører å benytte C_t under dimensjonering.
- 2) Tryggere å anvende konstruksjoner med lav innetemperatur, ettersom konstruksjonen er dimensjonert for mer realistiske snølaster.
- 3) Billigere å bygge konstruksjoner med høy innetemperatur og termisk konduktivitet grunnet lavere snølaster som gir mindre materialbruk.

Hovedformålet ved oppgaven er å beskrive variasjonen i den termiske koeffisienten for ulike taktyper og klimatiske forhold i Norge. For å nå det overordnede målet er det stilt tre forskningsspørsmål:

Spørsmål 1: Hvilke klimatiske faktorer* har den største innflytelsen på akkumulert snømengde på et tak, og hvordan påvirker disse faktorene C_T verdien?

Spørsmål 2: Hvilken termisk koeffisient beskriver best lastsituasjonen for tak med varierende innetemperatur og varmekonduktivitet, og hvordan kan koeffisienten enkelt benyttes av ingeniører og forskere?

Spørsmål 3: Hvordan vil klimaendringer kunne påvirke lastsituasjonen og de termiske koeffisientene i framtiden?

*Med klimatiske faktorer menes her faktorer som ikke er induisert av mennesker eller byggverket i seg selv, men av klimaet.

Forskningsspørsmålene er forsøkt besvart gjennom statistiske analyser av hvordan den årlige snøakkumuleringen varierer på ulike taktyper i forskjellige klima. Resultatene genereres fra simuleringer i en Excel-basert snømodell. Snømodellen er utviklet av Geoscientific Model Development, og beregner den endimensjonale energibalansen i et snødekke (ESCIMO.spread (v2), 2016).

1.2 Struktur i oppgaven

Oppgavens struktur bygger på «IMRaD»-modellen (introduksjon, metode, resultater og diskusjon). I tillegg inkluderes ett bakgrunnskapittel, hvor nødvendig teori for forståelse av analysene gjennomgås. Bakgrunnskapittelet inkluderer også presentasjon av sammenlignbare arbeid.

2 Bakgrunn og teori

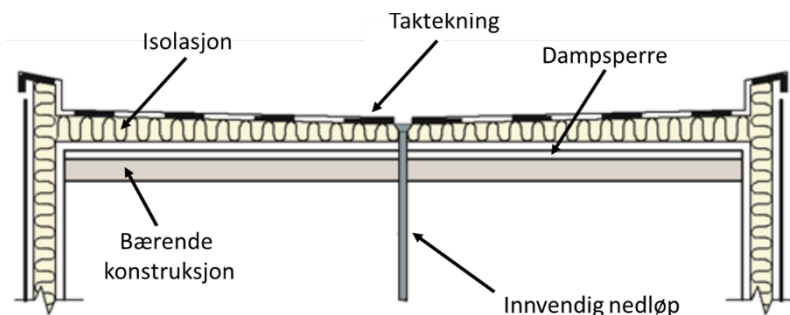
2.1 Byggeteknikk og byggetradisjon

Opp gjennom tiden har byggeteknikken og byggetradisjonene i Norge vært i kontinuerlig endring. Endringene skyldes blant annet skiftende lovverk, varierende byggetradisjoner, variasjoner i materialbruk samt varierende stilarter. Å kjenne til hvordan disse faktorene har endret seg i løpet av tiden er essensielt for å forstå hvordan bygninger opptrer i ulike miljøer.

Blant de tradisjonelle byggematerialene finner vi stein, tegl, kalk, sement, tre, metall og glass. Materialbruken samt materialspesifikasjonene har dog økt voldsomt det siste århundret, fra om lag 50 ulike byggematerialer i år 1900 til godt over 60.000 ulike byggematerialer i år 2000 (Mørk, 2014). I dette tidsrommet har materialenes varmeisolerende egenskaper og styrke økt i spesielt stor grad. Dette har gjort det mulig å bygge større og høyere bygninger, med klimaskiller som isolerer bedre mot temperaturskjeller mellom varm og kald side. I tillegg har bedre materialer og innovative byggetradisjoner gjort det lettere å motvirke råte og muggdannelse i konstruksjoner, gjennom blant annet luftede fasader og fuktvennlige materialer.

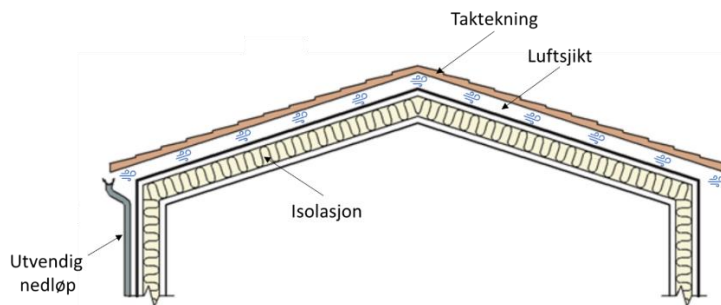
Takkonstruksjoner deles normalt inn i tre hovedtyper (Byggforskserien, 2019):

Kompakte tak består av et eller flere takelementer plassert tett sammen. Takoverflatens temperatur avhenger av den aktuelle innetemperaturen. Taket kan både være vinklet eller flatt, men for flate tak er det vanligvis nødvendig med innvendig nedløp for å unngå isdannelse på taket. Materialene mellom dampsperre og taktekningen bør ikke være fuktømfintlige eller råtefarlige, da fuktighet og smeltevann kan være i konstruksjonen over lengre tid. Bærekonstruksjonen er normalt laget av betongplater, stålplater, trevirke eller massivtre. Øvrige isolasjonsmaterialer, dampsperre og taktekning plasseres normalt over bærekonstruksjonen. Disse taktypene er spesielt vanlig for større bygninger som skoler og kontorbygg.



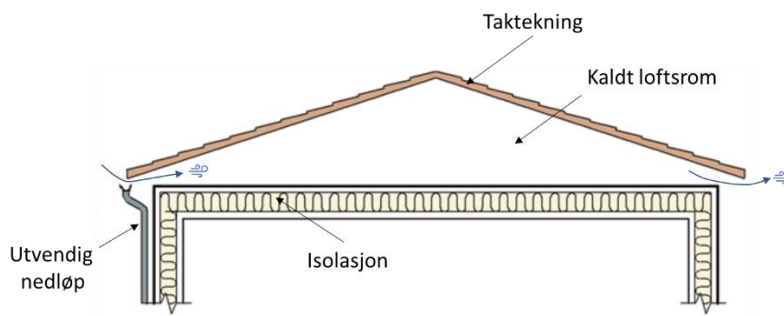
Figur 1. Eksempel på oppbygning av kompakte tak. Illustrasjonen er hentet fra (Byggforskserien, 2019) og senere modifisert av forfatter.

Tak med isolerte takflater og luftet tekning har oftest isolasjonsmaterialene omsluttet takstolene, taksperrene eller takåsene. Mellom isolasjonsmaterialet og taktekningen finnes det et ventilert luftsjikt som både bidrar til å transportere fukt ut av konstruksjonen i tillegg til å holde takoverflaten kald. Hensikten er å motvirke snøsmelting og eventuelle fuktproblemer som sopp, mugg og råte. Tak av denne typen bygges oftest som skråtak, og er svært vanlig i moderne hus og boliger.



Figur 2. Eksempel på oppbygning av tak med isolerte takflater og luftet tekning. Illustrasjonen er hentet fra (Byggforskserien, 2019) og senere modifisert av forfatter.

Tak med kalde loftsrom har ofte dårlige isolerende egenskaper. Loftsrommet kan både være ventilert med uteluft, eller være uventilert. Av den grunn er innetemperaturen i loftsrommet og utetemperaturen vanligvis like. For uventilerte loftsrom er det vanlig å ha luftet tekning. Slike takkonstruksjoner er oftest utført som skrå tretak, og er spesielt vanlig i eldre bygårder fra 1800 tallet.



Figur 3. Eksempel på oppbygning av tak med kalde loftsrom. Illustrasjonen er hentet fra (Byggforskserien, 2019) og senere modifisert av forfatter.

2.1.1 Byggeforskrifter og tekniske standarder

Den høyeste tillatte grenseverdien for varmetap gjennom en konstruksjonsdel er beskrevet i byggeforskriftene. Konstruksjonsdelene deles inn i gulv, tak, yttervegger samt vinduer, og kravene har gjennom tidene blitt strengere med hensikt i å redusere det nasjonale energikonsumet benytte til romoppvarming. Tabell 1 viser hvordan varmegjennomgangskoeffisienten (U-verdien) har endret seg med forskjellige forskrifter.

Tabell 1. Grenseverdier for varmegjennomgangskoeffisienten for ulike forskrifter. Verdiene er hentet fra (Wikipedia, 2021).

| Forskrift | Publisert | Tak | Gulv | Yttervegger | Vinduer |
|---------------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|---------|
| NS 3700 Passivhus | 1. juli 2010 | 0,08-0,09 | 0,08 | 0,10-0,12 | 0,8 |
| NS3700 Lavenergihus | 1. juli 2010 | 0,10-0,12 | 0,10-0,12 | 0,15-0,16 | 0,8 |
| TEK17 | 1. juli 2017 | 0,13 | 0,10 | 0,18 | 0,8 |
| TEK10 | 1. juli 2010 | 0,13 | 0,15 | 0,18 | 1,2 |
| TEK07 | 1. juli 2007 | 0,13 | 0,15 | 0,18 | 1,2 |
| TEK97 | 1. juli 1997 | 0,15 | 0,15 | 0,22 | 1,6 |
| Byggeforskrift 1987 | 27. mai 1987 | 0,20 | 0,30 | 0,30 | 2,4 |
| Byggeforskrift 1969 | 1. april 1970 | 0,41 - 0,58 | 0,41 - 0,70 | 0,46 - 1,28 | |
| Byggeforskrift 1949 | 15. desember 1949 | 0,6–1,0 | 0,8 | 0,6–1,1 | |

Overnevnte standarder har også flere tilleggskrav som har endret seg gjennom tidene.

I byggeforskriften fra 1949 var Norge delt inn i 4 klimasoner. De ulike klimasonene ga retningslinjer for hvor høy U-verdien kunne være for ulike områder i Norge. Klimasonene ble også videreført i den senere byggeforskriften fra 1969, men i 1980 kom det en endringsmelding som tillot U-verdien å variere med bakgrunn i byggets funksjonelle innetemperatur, jf. Tabell 2. I TEK17 og TEK10 spesifiseres det også at bygg med operasjonell innetemperatur under 15°C er fritatt de generelle kravene til U-verdi, såfremt «energibehovet holdes på et forsvarlig nivå» (DiBK, 2017).

Tabell 2. Anbefalte verdier for varmegjennomgangskoeffisienten for ulike innetemperaturer og konstruksjonsdeler. Tabellen er reprodusert fra endringsmeldingen for byggeforskriften av 1. august 1969 (Kommunal- og moderniseringsdepartementet, 1980).

| Bygningsdel | U-verdi [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$] | | |
|--------------------------------|---|---|--|
| | Innetemperatur [$^{\circ}\text{C}$] | | |
| | $18^{\circ}\text{C} <$ | $10^{\circ}\text{C} - 18^{\circ}\text{C}$ | $0^{\circ}\text{C} - 10^{\circ}\text{C}$ |
| Fasade og kjelleryttervegger | 0,45 | 0,70 | 0,90 |
| Tak | 0,23 | 0,40 | 0,65 |
| Gulv mot det fri | 0,23 | 0,35 | 0,45 |
| Gulv mot grunnen | 0,30 | 0,50 | 0,60 |
| Porter i industri og lagerbygg | 2,00 | 2,00 | - |

2.2 Dimensjonering av snølast

I dette kapittelet gjennomgås grunnleggende teori for dimensjonering av snølast. Det teoretiske grunnlaget er hentet fra snølaststandarden NS-EN 1991-1-3 med tilhørende vedlegg. Beregninger og antakelser vil bli framlagt, samt en grundigere gjennomgang den termiske koeffisienten.

2.2.1 Snølaststandarden

Snølaststandarden NS-EN 1991-1-3 inngår i samlingen av eurokoder fra NS-EN 1990 til NS-EN 1999, og omfatter en rekke prosjekteringsregler tilknyttet beregning av snølast. Standarden må leses i sammenheng med øvrige eurokoder for å forsikre seg om at bygninger og konstruksjoner dimensjoneres i henhold til lovverket. På nasjonalt nivå forutsetter NS-EN 1991-1-3 bruken av en rekke parametere ved beregning av dimensjonerende snølast. De nasjonale retningslinjene er beskrevet i «nasjonalt tillegg», som er utarbeidet i henhold til kravene framstilt i plan- og bygningsloven (pbl). Ved å benytte metoder og utførelser i samsvar med eurokodene med tilhørende nasjonale tillegg, vil man forsikre seg om at kravene i teknisk forskrift og pbl er oppfylt (Standard Norge, 2008a).

Snølaststandarden gir hovedsakelig metodikken for beregning av den dimensjonerende snølasten benyttet for prosjektering av takkonstruksjoner.

2.2.2 Dimensjonerende snølast

Den dimensjonerende snølasten angir den faktiske snølasten som må hensyntas i beregning av den dimensjonerende lastsituasjonen jf. NS-EN 1990:2002. Den dimensjonerende snølasten beregnes som produktet av den karakteristiske snølasten og tre koeffisienter:

$$S_{dim} = \mu_i C_e C_t S_k \quad (1)$$

hvor,

S_{dim} = Den dimensjonerende snølasten [kN/m²]

μ_i = Formfaktoren for snølast

C_e = Eksponeringsfaktoren

C_t = Den termiske faktoren

S_k = Den karakteristiske marklasten [kN/m²]

Koeffisientene μ_i , C_e og C_t avhenger av lokale virkninger, og bestemmes i henhold til tabulerte verdier i NS-EN 1991-1-3 (Standard norge, 2008a, s. 12).

Formfaktoren for snølast (μ_i) beskriver hvordan snølasten kan endre seg som følge av snødriver på forskjellige takformer. Snødriver kan lede til ujevn lastfordeling og gi store ansamlinger med snø på enkelte deler av et tak. Formfaktoren avhenger av takets form og vinkel, og hvorvidt taket grenser til andre tak eller høyere byggverk.

Eksponeringsfaktoren (C_e) tar høyde for de topografiske variasjonene i byggeområdet og kan både være større og mindre enn 1. Eurokoden skiller mellom områder som er vindutsatt, normale og skjermet, og gir følgende klassifiseringer jf. tabell 5.1 i NS-EN 1991-1-3.

Tabell 3. Anbefalte verdier for eksponeringsfaktoren c_e for ulik topografi. Tabellen er reprodusert fra NS-EN 1991-1-3 (Standard Norge, 2008a, s. 13).

| Topografi | C_e |
|-------------------------|-------|
| Vindutsatt ^a | 0,8 |
| Normal ^b | 1,0 |
| Skjermet ^c | 1,2 |

a – Vindutsatt topografi: Flate områder uten hindringer, som gir eksponering på alle sider, helt uten eller med ingen terrengbeskyttelse, høyere byggverk eller trær.

b – Normal topografi: Områder der vinden ikke i vesentlig grad fjerner snø fra byggverk som følge av terreng, andre byggverk eller trær

c – Skjermet topografi: Områder der det aktuelle byggverket er vesentlig lavere enn terrenget omkring. Eller er omgitt av høye trær og/eller av høye byggverk.

Den termiske koeffisienten (C_T) beskriver hvordan varmetransporten gjennom taket påvirker den akkumulerte snømengden på taket. I eurokoden står det at den termiske koeffisienten bør brukes for å hensynta reduksjonen av snølasten på tak med varmegjennomgang høyere enn 1 W/m²K. Koeffisienten kan enten være mindre eller lik 1. Eurokoden fremlegger spesielt tilfeller med glasstak som aktuelle for bruk av den termiske koeffisienten, grunnet den lave varmemotstanden til glass.

Den karakteristiske snølasten (S_k) beskriver hvilket lastbilde som kan forekomme på bakkenivå for spesifikke områder. Den karakteristiske snølasten er beregnet med 50 års returperiode, hvilket betyr at det er 2 % sannsynlighet for at den aktuelle lasten inntreffer hvert år. Snølastens returperiode er et statistisk verktøy benyttet for å estimere hyppigheten en konkret snølast er forventet å inntreffe. I nasjonalt tillegg er de karakteristiske lastene bestemt for alle kommunene i landet. For områder med høyde over havet større enn høydegrensen (H_g), er det utarbeidet tilleggslaster (ΔS_k) som skal kompensere for et kaldere og mer snø utsatt klima, som vist i Tabell 4. Snølastene kan dog variere betydelig utover dette i enkelte kommuner, ettersom det er tilknyttet stor usikkerhet til snøtyngden og regionaliseringen i beregningen av de karakteristiske snølastene (Standard Norge, 2008b, s. 1).

Tabell 4. Anbefalte verdier for karakteristiske snølaster i Oslo, Tromsø og Bergen. Tabellen er reprodusert fra NS-EN 1991-1-3 (Standard Norge, 2008b).

| Kommune | S_k [kN/m ²] | H_g [m] | ΔS_k [kN/m ²] |
|-----------------|----------------------------|-----------|-----------------------------------|
| Oslo | | | |
| 0-150 m.o.h | 3,5 | - | - |
| 151 – 250 m.o.h | 4,5 | - | - |
| 251 – 350 m.o.h | 5,5 | - | - |
| >350 m.o.h | 6,5 | - | - |
| Tromsø | 6,0 | 150 | 1,0 |
| Bergen | 2,0 | 150 | 0,5 |

Kombinasjonen av overnevnte faktorer (den karakteristiske snølasten, formfaktoren, den termiske faktoren og eksponeringsfaktoren) gir oss den dimensjonerende snølasten, betegnet S_{dim} . Den dimensjonerende snølasten er laveste grenseverdi for snølast et tak skal dimensjoneres for.

2.2.3 Den termiske koeffisienten

Formålet med den termiske koeffisienten (C_T) er å hensynta reduksjon av snølast på tak med høy varmegjennomgang. Faktoren ble først introdusert i 3. utgave av NS3479, og er i utgangspunktet ment spesifikt for glasstak. Til tross for dette presiseres det i et underpunkt at C_t «kan også gjelde for andre materialer» (ISO/DIS 4355, 2012, s. 27). Bestemmelsen tillater med andre ord reduksjon av snølast på tak laget av andre materialer enn glass når varmegjennomgangen er tilstrekkelig høy.

Metoden for fastsettelse av den termiske koeffisienten er beskrevet i ISO 4355, gjengitt nedenfor. Formlene antar at snølasten er lik eller større enn 1,5 kN/m² (Standard Norge, 2008a).

$$ct = \left[1 - 0,054 \left(\frac{S_0}{3,5} \right)^{0,25} f(U_0, \theta) \right] \cos(2\beta) \quad 0^\circ \leq \beta \leq 45^\circ \quad (2)$$

hvor

$$f(U_0, \theta) = \begin{cases} 0 & U_0 < 1,0 \\ (\theta - 5) [\sin(0,4U_0 - 0,1)]^{0,75} & 1,0 \leq U_0 \leq 4,5 \text{ og } 5 \leq \theta \leq 18 \\ \theta - 5 & U_0 > 4,5 \text{ og } 5 \leq \theta \leq 18 \end{cases} \quad (3)$$

U_0 = Takets termiske varmegjennomgang, forutsatt at den utvendige varmeovergangsmotstanden (R_{se}) er lik null [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

β = Takvinkelen [$^\circ$]

S_0 = Den karakteristiske snølasten på bakkenivå, forutsatt $> 1,5 \text{ kN}/\text{m}^2$

θ = Den laveste forventede innetemperaturen i løpet av vinteren [$^\circ\text{C}$]

Videre står det spesifisert at dersom takets U-verdi ikke er uavhengig av den utvendige varmeovergangsmotstanden ($R_{se} > 0$), skal U_0 bregnes i samsvar med formelen nedenfor:

$$U_0 = \frac{U}{1 - UR_{se}} \quad (4)$$

hvor,

U = Den termiske varmegjennomgangskoeffisienten til taket [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

R_{se} = Den utvendige varmeovergangsmotstanden [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]

I tillegg skal det alltid gjennomføres en kontroll om vann kan renne fritt av taket uten risiko for gjenfrysing.

I noen land opereres det med en termisk koeffisient som både kan være mindre eller større enn 1. Eksempelvis i den amerikanske standarden «Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures» - ASCE 7-16, er den termiske koeffisienten bestemt med bakgrunn i innetemperatur og taktype, jf. tabell 5.

Tabell 5. Anbefalte termiske koeffisienter i USA. Tabellen er reproduisert fra ASCE 7-16 (ASCE 7-16, 2017).

| Termisk forhold | C_t |
|--|-------------------------|
| Alle strukturer unntatt som angitt nedenfor | 1,0 |
| Strukturer holdt like under frysepunktet og andre med kalde, ventilerte tak der den termiske motstanden mellom det ventilerte rommet og det oppvarmede rommet overstiger 0,22 W/m ² K | 1,1 |
| Uoppvarmede- og friluftsstrukturer | 1,2 |
| Fryselagre | 1,3 |
| Kontinuerlig oppvarmede glasstak med en termisk motstand mindre enn 2,5 W/m ² K | 0,85 |

2.3 Termofysiske prinsipper og energibalansen i snø

I dette kapitlet presenteres de termofysiske prinsippene som er benyttet i beregninger, analyser og tolkninger i oppgaven. Kapitlet tar for seg hvordan energibalansen i et snødekke påvirker faseendringene av snø, hvordan sublimasjon/resublimasjon av snø opptrer og hvordan metamorfoseendringer av snø påvirker snøens egenskaper. Alle prinsippene er med å forklare resultatene i oppgaven eller underbygge metodeoppsettet.

2.3.1 Varme

Varmeenergi er en form for kinetisk energi forårsaket av subatomiske eller molekylære vibrasjoner i et stoff. Vibrasjonens intensitet er direkte sammenfallende og proporsjonal med temperaturen til stoffet, som i vitenskapelig sammenheng ofte måles i kelvin. Symbolet for kelvin er K. Når et stoff avgir varme til omgivelsene avtar de molekylære bevegelsene i stoffet, og temperaturen går ned. Varmeenergi måles i Joule, og varmeenergien et kilogram stoff tar opp når temperaturen stiger med 1 °C defineres som stoffets spesifikke varmekapasitet. Tilsvarende er den spesifikke smeltevarmen definert som energimengden som kreves for å smelte 1 kg av et stoff, uten at stoffets temperatur endrer seg (Edvardsen & Ramstad, 2014).

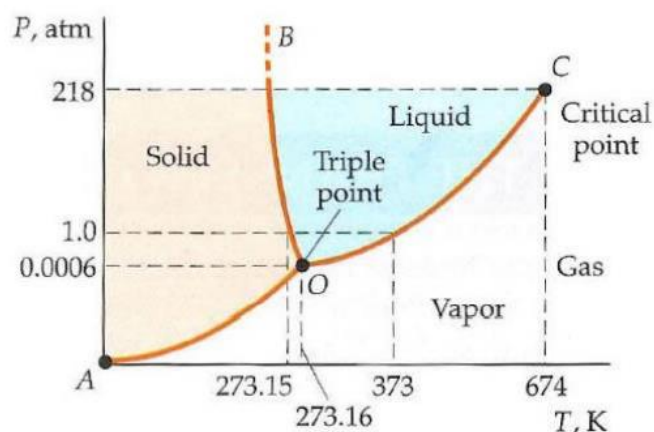
Tabell 6. Varmetekniske grunnbegreper og verdier. Verdiene er hentet fra (Nesje, 2021; Pedersen, 2017; Pedersen, 2019).

| Materiale | Spesifikk varmekapasitet | Spesifikk smeltevarme | Spesifikk fordampningsvarme |
|-----------|--------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| Vann | 4183 J/kg°C | - | 2257 kJ/kg |
| Snø | 2090 J/kg°C | 334 kJ/kg | - |
| Is | 2090 J/kg°C | 334 kJ/kg | - |

2.3.2 Fasediagrammet

En faseovergang beskriver prosessen hvor et stoff endrer sine kvalitative fysiske egenskaper. Energien som kreves for at en faseovergang skal skje avhenger hovedsakelig av temperatur og trykk (Pedersen, 2020). Tabell 6 viser hvor mye energi som benyttes når vann gjennomgår en faseovergang ved én atmosfæres trykk (atm). Den totale energimengden som benyttes i transformasjonen fra en fase ved en temperatur, til en annen fase ved en annen temperatur, tilsvarer summen av energikonsumet benyttet i faseovergangen og energikonsumet benyttet i

temperaturendringen. Figur 4 viser ved hvilke temperatur og trykk vann er i likevekt når volumet holdes konstant.

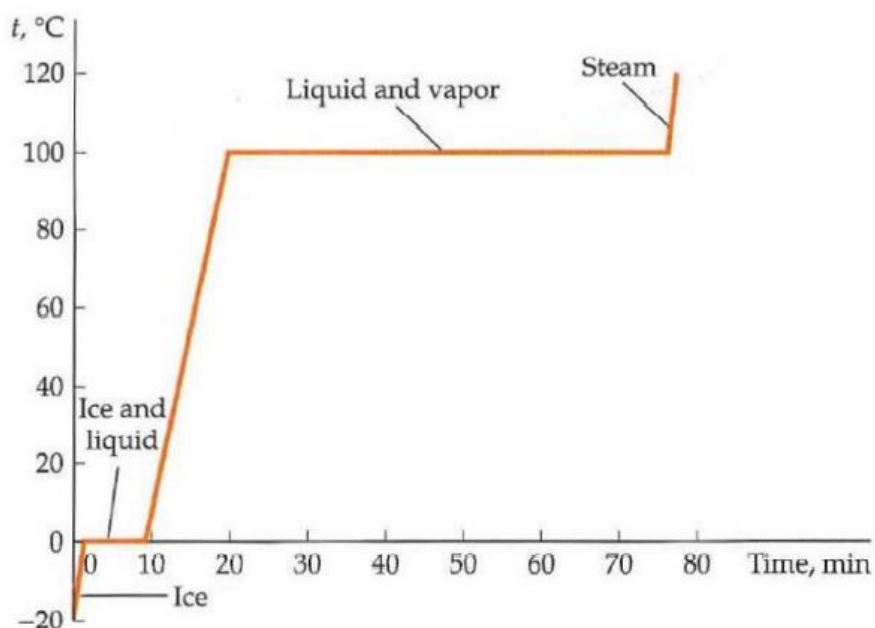


Figur 4. Fasediagrammet for vann hentet fra (Tipler & Mosca, 2008, s. 673).

Vann ved 1 atm kan bare endre fase mellom fast stoff og væske, eller mellom væske og gass. Faseovergangen mellom fast stoff og gass kalles sublimasjon/resublimasjon, og kan ifølge fasediagrammet bare inntreffe ved trykk lavere enn 0,0006 atm.

2.3.3 Faseendringer på molekylært nivå

Som beskrevet i kapittel 2.3.2 er energimengden som kreves for at et stoff skal gjennomgå en faseendring lik energien benyttet til å øke stoffets temperatur pluss energien benyttet i selve faseendringen. Når et stoff øker sin temperatur, øker de molekylære bevegelsene i stoffet. Denne temperaturen kan fortsette å øke til en grensetemperatur, hvor ytterligere energitilførsel ikke lenger bidrar til en temperaturøkning, men derimot fører til at stoffet gjennomgår en faseovergang (Tipler & Mosca, 2008).



Figur 5. Tiden som kreves for at vann skal gå fra is ved -20°C til vanndamp ved 120°C ved konstant varmetilførsel i et lukket system. Figuren er hentet fra (Tipler & Mosca, 2008, s. 597).

Figur 5 viser ved hvilke temperaturer vann gjennomgår faseendringer fra is til vanndamp. Områder med ingen stigning i temperatur symboliserer tidsrommet hvor stoffet bytter fase. På molekylært nivå vil en faseovergang være preget av at intermolekylære krefter brytes. Når alle de intermolekylære attraksjonskreftene er brutt, er faseovergangen fullført, og stoffets temperatur kan fortsette å øke til grensetemperaturen for neste faseovergang. Den totale energimengden benyttet i prosessen tilsvarer entalpiendringen til stoffet.

2.3.4 Entalpi

Entalpi er definert som summen av den latente og følbare varmen i et lukket system. Følbare varme beskriver energimengden som inngår i prosessen hvor et stoff endrer temperatur, men beholder sine fysiske egenskaper, mens latent varme beskriver energimengden benyttet i en faseovergang.

Gitt den spesifikke varmekapasiteten til et stoff, massen til stoffet og temperaturstigningen stoffet gjennomgår, kan den følbare varmeenergien beregnes som følger:

$$Q_{\text{følbar varme}} = mc\Delta T \quad (5)$$

hvor,

$Q_{\text{følbar varme}}$ = Varmeenergien benyttet i temperendringen [kJ]

m = Massen til stoffet [kg]

c = Den spesifikke varmekapasiteten til stoffet [kJ/kg°C]

ΔT = Temperaturendringen [K]

Tilsvarende kan den latente varmeenergien regnes ut etter følgende formel:

$$Q_{\text{latent varme}} = m * L_{\text{fase}} \quad (6)$$

hvor,

$Q_{\text{latent varme}}$ = Varmeenergien benyttet i faseovergangen [kJ]

L_{fase} = Latent varmeenergi krevd for den gitte faseovergangen [kJ/kg]

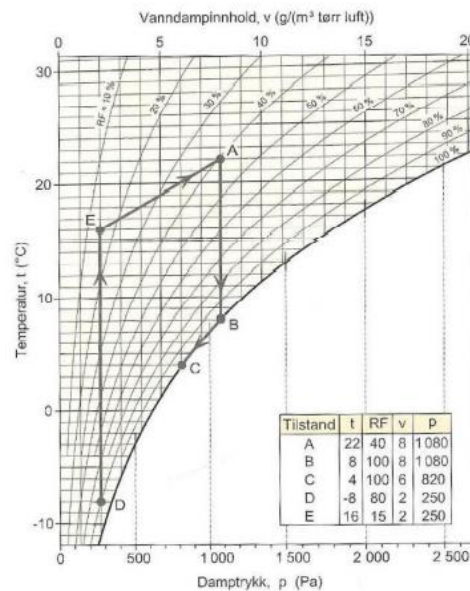
I formel 6 ovenfor er det viktig å differensiere mellom latent fordampningsvarme og latent smeltevarme, referert til i Tabell 6. Summen av både latent fordampningsvarme og latent smeltevarme er lik stoffets sublimasjonsvarme.

2.3.5 Sublimasjon av snø

Sublimasjon beskriver prosessen hvor et stoff går direkte fra fast form til gass uten dannelse av væske, og angis i kg vann pr. kg luft (Pedersen, 2021). Denne prosessen er et naturlig fenomen som blant annet er med å redusere snømengdene på tak og mark om vintrene.

Sublimasjon av snø oppstår når partialtrykket til vanndamp er større i snøens porer enn i luften. Ifølge Tipler (Tipler & Mosca, 2008) er partialtrykk definert som det trykket en enkelt gass utøver i ett luket system, uten tilstedeværelse av andre gasser. Trykkdifferansen induserer en ekstern fukttransport fra snø til luft. Tilsvarende vil fuktighet transporteres fra atmosfære til snø dersom partialtrykket av vanndamp er større i luften enn i snøen. Fenomenet kalles resublimasjon.

I termodynamikken er temperatur og trykk gjensidig avhengige. Høyere temperatur fører til høyere trykk. Ved å tilføre varmeenergi i snø, vil partialtrykket av vanndamp øke, hvilket gir økt sublimasjon. I tillegg kan vi se fra psykometri diagrammet i Figur 6 at både partialtrykket til vanndamp og den relative luftfuktigheten er lineært avhengige, samt avhengig av temperaturen.



Figur 6. Psykrometri diagrammet. Figuren er hentet fra (Edvardsen & Ramstad, 2014, s. 382).

I masteroppgaven til Iver Frimannslund (Frimannslund, 2017) ble variasjonene i sublimasjonsrater analysert for snø oppå solceller i varmemodus. I forskningsarbeidet ble gradientverdiene for temperatur og fuktighet benyttet som indikasjonsparemetere, der større gradientverdier normalt indikerte høyere sublimasjon. Gradientverdiene størrelse avhenger av temperaturdifferansen og fuktdifferansen på hver side av et snødekk, og beregnes i henhold til formlene 7 og 8.

$$\text{Temperaturgradient} = \frac{dT}{dx} \quad (7)$$

$$\text{Fuktighetsgradient} = \frac{dS}{dx} \quad (8)$$

hvor,

dT = Temperaturdifferansen [°C]

dS = Fuktighetsdifferansen [g/kg]

dx = Snødekkets tykkelse [m]

Selv om fasediagrammet til vann tilsier at sublimasjon kun inntreffer ved trykk lavere enn 1 atm, kan en kontinuerlig induisert varmefluks over den smale tykkelsen til et snøkrystall generere en varmegradiert tilstrekkelig høy nok til at snøkrystallet sublimerer umiddelbart (Male, 1980, sitert av Frimannslund, 2017 s.31). Eksempelvis er dette normalt for snø på bakken gjennom den induserte markvarmen. Motsatt kan snø utsatt for en negativ varmefluks resublimere vanndamp fra luften, hvilket er med å øke den totale snølasten.

2.3.6 Metamorfose i snø

Metamorfose i snø beskriver alle de strukturelle endringene snøkrystaller gjennomgår fra de skapes i skydekket til de smelter bort og blir til vann. Prosessen har betydning for snøkrystallenes visuelle utseende samt de fysiske egenskapene, deriblant snøens varmekonduktivitet og tetthet. Metamorfose i snø styres av en rekke ytre faktorer som vind, solinnstråling, temperatur og luftfuktighet. I tillegg eksisterer snø vanligvis i nærheten av eget smeltepunkt, hvilket gjør at selv små klimatiske variasjoner kan påvirke metamorfosen til snø.

En av utfordringene tilknyttet beregning av energibalansen til et snødekke er at snødekket i seg selv har en termisk konduktivitet. Snøens varmekonduktivitet varierer med densiteten, snøens mikrostruktur samt den relative andelen av ulike bestanddeler som vann og luft. Snøens egenskaper vil derfor ikke være den samme i løpet av året, som følge av ulikt klima (Nuijten, 2018). Til tross for dette blir snøens termiske konduktivitet ofte sett i sammenheng med densiteten alene. Data fra konduktivitetmålinger av snø fra mange ulike sesonger, med dybder opp mot 600 mm og et relativt lavt fuktinnhold, viser til verdier mellom 0.025 W/mK til 0.56 W/mK for densiteter fra 10 to 550 kg/m³ (Côté et al., 2012, sitert av Nuijten et al. 2016 s.263). Til forskjell fra mange kommersielle isoleringsprodukter tilsvarer dette en svært høy varmemotstand og gode isolerende egenskaper.

Temperatur gradient metamorfisme beskriver hvordan snøens mikrostruktur forandrer seg når snø utsettes for en konstant varmefluks. Ettersom snø har gode isolerende egenskaper, vil det dannes en høy varmegradiert over snødekket ved tilført varmeenergi fra mark eller tak (Frimannslund, 2017). Dette kan føre til høyere sublimasjonsrater. I denne sammenheng vil ulik varmetilførsel gjennom eksempelvis mark og tak gi ulik sublimasjonshastighet, og dermed ulik snømengde.

2.4 Bygningsfysikk

I dette kapitlet gjennomgås de nødvendige bygningsfysiske prinsippene som trengs for å forstå videre analyser og tolkninger. Kapitlet tar for seg hvilke faktorer som påvirker varmetransporten gjennom en bygningsfasade og hvordan varmetransporten kan beregnes.

2.4.1 Varmetransport i en bygning

Varmetransport skjer alltid i retning mot områder med lavere temperaturer, hovedsakelig som kombinasjon av både varmeledning, konveksjon og stråling.

Varmeledning beskriver prosessen der varmeoverføringen skjer gjennom molekylbevegelser. Molekyler med høy varmeenergi kan kolliderer med kaldere nabomolekyler, og overføre bevegelsesenergien videre. Hvor fort varmetransporten går, avhenger av stoffets varmeledningsevne. Varmeledningsevnen til et materiale er proporsjonal med materialets densitet og molekyltetthet, hvor eksempelvis metaller leder varme godt, mens luft leder varme dårlig (Edvardsen & Ramstad, 2014, s. 388).

Selv om luft har dårlig varmeledningsevne i seg selv, kan det lede mye varme gjennom konveksjon. Fenomenet inntreffer når luft er omgitt av to tettliggende flater med ulik temperatur, ved at luften nærmest den varme flaten varmes opp og blir lettere, samtidig som luften nærmest den kalde flaten kjøles ned og blir tyngre. Slik oppstår et kretsløp hvor luft begynner å bevege seg i sirkulære bevegelser, en prosess som kalles naturlig konveksjon. I denne prosessen blir også varmeenergi transportert fra varm til kald side når den varme luften kommer i kontakt med den kalde overflaten (Edvardsen & Ramstad, 2014, s. 389).

Avslutningsvis kan varmeenergi overføres gjennom elektromagnetisk varmestråling. Alle stoffer emitterer og absorberer elektromagnetisk varmestråling, men varme stoffer emitterer mye mer varmestråling enn kalde stoffer. Dette gir en netto varmetransport fra varm til kald side (Edvardsen & Ramstad, 2014, s. 389). Varmestrålingens størrelse bestemmes etter formel 9.

$$E = 5,68 * 10^{-8} * \epsilon * T^4 \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (9)$$

hvor,

T = Flatens absolutte temperatur [K]

€ = Materialets emisjonsfaktor

Summen av varmeledning, konvensjon og stråling tilsvarer den totale varmetransporten gjennom et materiale, og betegnes som materialets varmekonduktivitet.

2.4.2 Varmemotstand og varmegjennomgang

Varmemotstand benyttes for å angi hvor godt en bygningskonstruksjon motstår en varmestrøm, og betegnes R . Varmemotstanden avhenger av materialtykkelsen og varmekonduktiviteten til hvert enkelt sjikt i konstruksjonen. For et homogent materialsjikt beregnes varmemotstanden etter formel 10:

$$R = \frac{d}{\lambda_d} \text{ [m}^2\text{K/W]} \quad (10)$$

hvor,

d = Materialtykkelsen [m]

λ_d = Materialets dimensjonerende varmekonduktivitet [W/mK]

For en konstruksjonsdel bestående av flere materialer er den totale varmemotstanden R_T lik summen av varmemotstanden til alle materialsjiktene. Det totale varmetapet gjennom konstruksjonsdelen er uttrykt gjennom varmetransportkoeffisienten, omtalt som konstruksjonens U -verdi. U -verdien er den inverse av R_T , gitt følgende formel:

$$U = \frac{1}{R_T} \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (11)$$

2.4.3 Fourier's lov

Fourier's lov er en enkel formel, som beregner den endimensjonale varmefluksen gjennom et materiale:

$$q_x = -\lambda_d \left(\frac{dT}{d} \right) \quad (12)$$

hvor,

q_x = Varmefluksen i x-retning [W/m²]

dT = Temperaturdifferansen på hver side av materialet [K]

Ved å kombinere formel 10 og 11, kan materialets varmekonduktivitet uttrykkes som $\lambda_d = d * U$. Ved å sette dette uttrykket inn i formel 12, kan varmekonduktiviteten gjennom en bygningskonstruksjon beregnes som følger:

$$q_x = -k \left(\frac{dT}{dx} \right) = -dU \left(\frac{dT}{dx} \right) = -U dT = -U(T_{i+1} - T_i) \quad [\text{W/m}^2] \quad (13)$$

hvor,

T_i = Temperaturen på den kalde siden av materialet [K]

T_{i+1} = Temperaturen på den varme siden av materialet [K]

2.5 Snømodellering

The Energy Balance Snow Cover Integrated Model, heretter forkortet ESCIMO, er et program utviklet av Geoscientific Model Development for timevis snøsimulering. Programmet benytter avanserte metoder for beregning av den endimensjonale snøakkumuleringen og snøsmelting for et homogent snødekke. Metoden baserer seg på å løse energi- og massebalanselikningene, nærmere beskrevet i kommende kapitler. Antakelsen om et endimensjonalt og homogent snødekke er en tilstrekkelig forenkling av de kompliserte naturlige forholdene inni et snødekke ved studie av snølast på tak (Marke et al., 2016). Til tross for dette er det viktig å være bevisst på at snøens egenskaper og metamorfose i realiteten vil variere over sesongen, grunnet naturlige fenomener som eksempelvis varierende fuktighets- og temperaturgradient.

ESCIMO er testet ut i mange ulike klimasoner og har oppnådd gode resultater i områder som både er lokalisert høyt over havet i de Sveitsiske fjellene, samt lavtliggende arktiske områder i Finland (Marke et al., 2016). Produktversjonen benyttet i denne oppgaven er andre utgave av ESCIMO, og inneholder en rekke oppgraderinger fra forgjengeren. De nye oppdateringene inkluderer blant annet hvordan våttemperaturen påvirker nedbørsfasene, en ny og forbedret metode for estimering av snøens temperatur som funksjon av induert varme fra omgivelsene, samt en forbedret estimering av andelen fast og flytende vannandel i snøpakken. For ytterligere beskrivelser av simuleringsprogrammet og hvilke parametere som inngår, henvises til Marke et al (2016).

2.5.1 Energi- og massebalanse

Snødekkets energibalanse beregnes for hvert timestrinn ved å ta i betraktning kortbølget og langbølget stråling (H_Q), følbare (H_F) og latente (H_L) varmestrømmer, det advective varmetilskuddet fra fast eller flytende nedbør (H_R), eksoterme og endoterme reaksjoner ved frysing og smelting, samt en konstant jordvarmefluks (H_M). Den totale varmeenergien som er tilgjengelig for å smelte snø (H) er uttrykt ved formel 14 nedenfor.

$$H_Q + H_L + H_F + H_R + H_M = H \quad (14)$$

Den akkumulerte snømengden (massen) blir i ESCIMO angitt som snøvannekvivalent (SWE), og benevnes kg/m^2 . Gitt at densiteten til vann er 1 kg/m^3 , vil 1 kg/m^2 SWE tilsvare en vannsøyle på 1mm. Fast nedbør øker mengden akkumulert SWE, mens flytende nedbør absorberes og adderes til SWE inntil grenseverdien for maksimal absorpsjon er nådd. Dette beskrives nærmere i neste kapittel.

2.5.2 Snøtemperatur, smelting og frysing i ESCIMO

Snø har alltid temperatur lik 273,16 K eller lavere (Tipler & Mosca, 2008). Dersom endringen i entalpi er negativ, dvs. at endringen i varmetransport mellom snødekket og omgivelsene reduseres mellom gjeldende og forrige tidstrinn, vil den nye temperaturen være lik den foregående temperaturmålingen minus den relative temperaturendringen uttrykt i formel 5. Entalpinivået avhenger av energitilførselen uttrykt i formel 14, samt eventuelle eksoterme eller endoterme prosesser som følge av snøsmelting eller gjenfrysing av vann.

Snøtemperaturen $[\Theta]$ beregnes etter formel 15 nedenfor. Formelen antar at snøtemperaturen de første 24 timene av simuleringen er 273,15 K

$$\Theta_n = \max \left\{ \begin{array}{l} \min (\Theta_{n-1}, \Theta_{n-2}, \Theta_{n-3} \dots \Theta_{n-23}, \Theta_{n-24}) \\ \Theta_{n-1} + \min \left\{ \begin{array}{l} 0 \text{ K} \\ \frac{\Delta H}{C_s} \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (15)$$

hvor,

Θ_n = Snøens temperatur ved tidspunkt n [K]

Θ_{n-1} = Snøens temperatur ved tidspunkt $n - 1$ time [K]

ΔH = Endringen i entalpi [J]

C_s = Den spesifikke varmekapasiteten til snø [J/kg°C]

Et varmetap som følge av negativ energibalanse fører til at kuldeinnholdet øker. Kuldeinnholdet er her forstått som energimengden krevd for å øke snøtemperaturen til 273,16 K. Ved høyere kuldeinnhold øker potensialet for akkumulert SWE [mm] gjennom frysing og resublimasjon. Snøens temperatur og kuldeinnhold kan anses som direkte sammenfallende og proporsjonal med snødekkets totale energibalanse, jf. formel 16.

$$C_c = \frac{(T_s - 273,16K) * (SWE_{t-1} + P_s) * C_s}{C_i} \quad (16)$$

hvor,

C_c = Kuldeinnholdet [mm]

T_s = Snøens temperatur [K]

P_s = Mengden fast nedbør [mm]

C_s = Den spesifikke varmekapasiteten til snø [J/kg°C]

C_i = Den spesifikke smeltavarme for is [J/kg°C]

I tilfellet med negativ energibalanse, er potensialet for frysing av flytende vann i snødekket uttrykt ved følgende formel.

$$RF = \min \left\{ \begin{array}{l} C_{lw\ t-1} \\ \frac{-E * dt}{c_i} \end{array} \right. \quad (17)$$

hvor,

RF = Mengden flytende vann som fryser i snødekket [mm]

$C_{lw\ t-1}$ = Det flytende vanninnholdet i snødekket ved foregående tidsintervall [mm]

E = Energibalansen i snødekket [J]

dt = Antall sekunder i hvert tidsintervall (3600 s)

Snøsmelting oppstår ved positiv energibalanse, ved at kuldeinnholdet reduseres mellom gjeldende og forrige tidstrinn. Smeltet snø blir ikke umiddelbart fjernet fra snødekket, ettersom en viss andel flytende vann kan absorberes i snøens porer gjennom kapillære krefter. Faktisk snøsmelting beregnes etter formel 18.

$$M = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{E * dt}{c_i} - (C_c - C_{c\ t-1}) \\ SWE_{t-1} - C_{c\ t-1} \end{array} \right. \quad (18)$$

Vanninnholdet i snødekket blir dermed oppdatert jf. følgende formel.

$$C_{lw} = \min \left\{ \begin{array}{l} C_{lw\ t-1} + M \\ SWE_{t-1} * HC_w \end{array} \right. \quad (19)$$

hvor,

HC_w = Vannbeholdningskapasiteten (absorpsjonspotensialet) [mm]

HC_w begrenser vannlagringen i et snødekke, og er uttrykt som et forholdstall av total snømengde. Forholdstallet kan defineres av brukeren selv, men er som standardinnstilling satt til 0,1 i ESCIMO som anbefalt av Blöschl og Kirnbauer (Blöschl & Kirnbauer, 1991). Vannbeholdningskapasiteten kan dermed uttrykkes som følger:

$$HC_w = SWE * 0,1 \quad (20)$$

2.5.3 ERA5 data

ERA5 er ett offentlig tilgjengelig og lett anvendelig datasett over et stort antall metrologiske parametere. Dataene representerer gjennomsnittsverdier innenfor et 30km rutenett, som kan hentes ut over hele jorden. Datagrunnlaget er frambrakt på bakgrunn av store mengder historiske data som er behandlet i avanserte modellerings- og dataassimileringsystemer. Modelleringene er gjort for 137 nivåer av atmosfæren, fra bakkenivå opp til en høyde på 80km. ERA5 data gir også informasjon om variabelenes usikkerhet ved redusert romlig eller tidsmessig oppløsning (ECMWF).

2.6 Simuleringer og statistiske prinsipper

I dette kapittelet gjennomgås de statistiske prinsippene og metodene benyttet i oppgaven. I tillegg gir kapittelet en kort innføring i Köppens klimaklassifisering som blir benyttet i valget av caseområder for senere analyser.

2.6.1 Köppens klimaklassifisering

Köppens klima klassifisering er et av de mest brukte systemene for klimadifferensiering, og baserer seg på forskjeller i gjennomsnittlig månedstemperatur og årstemperatur samt gjennomsnittlig månedsnedbør og årsnedbør. De ulike klimasonene er klassifisert med tre bokstaver, der første bokstav differensierer mellom fem primære klima; A (tropisk), B (tørt), C (temperert), D (kontinentalt), og E (polart). Norge inngår i gruppe D, E og C. Hver hovedgruppe er deretter delt inn nedbørsorienterte undergrupper, indikert ved andre bokstav. Temperaturrelaterte variasjoner er klassifisert med en tredje bokstav.

| Klassifisering | Antall steder | Köppen Geiger Klassifisering | Eksempel | Fargekode |
|--------------------------------|---------------|------------------------------|--------------|-----------|
| Subarctic climate | 597 | Dfc | Trondheim | ● |
| Oceanic climate | 341 | Cfb | Bergen | ● |
| Warm humid continental climate | 335 | Dfb | Oslo | ● |
| Tundra climate | 19 | ET | Longyearbyen | ● |
| Subpolar oceanic climate | 9 | Cfc | Magerholm | ● |
| Subarctic climate | 4 | Dsc | Lom | ● |
| Warm humid continental climate | 3 | Dsb | | ● |



Figur 7. Köppens klima klassifisering over Norge med tilhørende klassifiseringsskjema. Illustrasjon og data er hentet fra (Kottek & Rubel, u.å.).

2.6.2 Korrelasjonsanalyse

En korrelasjonsanalyse benyttes for å beskrive den statistiske samvariasjonen mellom to kontinuerlige variabler. Analysen baserer seg på årsak-virkning prinsippet, ved å si at den statistisk sammenheng er signifikant dersom en endring i en variabel medfører en endring i den andre variabelen. I tillegg kan en korrelasjonsanalyse gradere styrken på forholdet.

Når man gjennomfører en korrelasjonsanalyse, får man ut en korrelasjonskoeffisient (r-verdi) som kan være mellom -1 og 1. En r-verdi på -1 tilsier en perfekt negativ korrelasjon, mens en r-verdi på 1 tilsier en perfekt positiv korrelasjon. Ved negativ korrelasjon vil den ene variabelen stige mens den andre synker, mens ved positiv korrelasjon vil begge variablene bevege seg i samme retning (Frøslie, 2020).

Korrelasjon benyttes ofte som forberedelse til andre analyser, eksempelvis som innledende variabelseleksjon til multiple regresjonsanalyser. For å teste om flere variable har en sammenheng samtidig, kan man benytte en korrelasjonsmatrise.

2.6.3 Regresjonsanalyse

Når man gjennomfører en multipl regressjonsanalyse, leter man etter et flerdimensjonalt objekt som passer best med innsamlede data, på formen:

$$Y = A + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n + e \quad (21)$$

hvor,

Y = Den avhengige variabelen

X_1 til X_n = De uavhengige variablene

A = Konstantleddet

b_1 til b_n = Regresjonskoeffisientene

e = Feilleddet (residual)

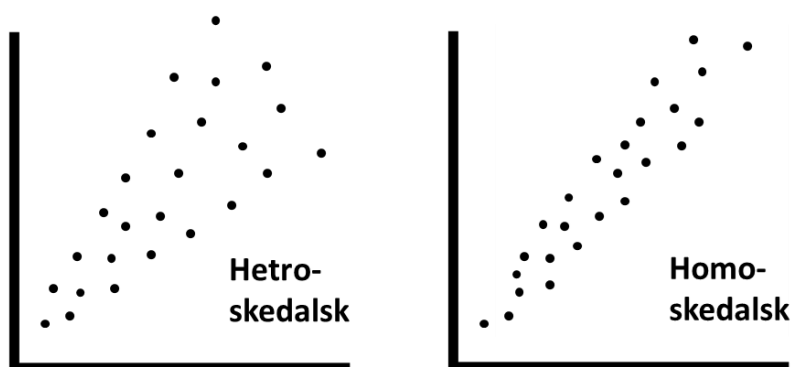
Konstantleddet forteller hva den forventede Y-verdien er når alle X-variablene er null. Regresjonskoeffisientene beskriver stigningstallene til de uavhengige variablene. Verdien tilsvarer hvor mye Y øker i gjennomsnitt når X øker med én verdienhet, og resterende X-variabler holdes konstante. Residuale er modellens usikkerhet og beskriver alle variasjoner i Y som modellen ikke klarer å forklare. Residualstørrelsen er forskjellen mellom observerte Y-verdier og predikerte Y-verdier utfra regresjonsmodellen.

Hensikten med en multipel regresjonsanalyse er å finne en funksjon som beskriver den observerte sammenhengen mellom en avhengig variabel og flere uavhengige variabler. Metoden tillater å etablere en mest mulig fullstendig forklaringsmodell, ved å ta med alle faktorer som påvirker den avhengige variabelen.

En regresjonsanalyse kan også benyttes for å undersøke effekten av en årsaksvariabel. Ved å kontrollere for konfunderende (bakenforliggende) variabler vil man unngå å over- og/eller under- estimere årsakssammenhenger. Analysen krever en viss domenekunnskap om hvordan observerte variabler samvarierer.

Regresjonsanalysens variabelseleksjon bestemmes etter modellens konfidensintervall. Dersom en variabel er statistisk signifikant, med p-verdi utenfor forkastningsområdet, forkastes nullhypotesen, og den aktuelle variabelen benyttes videre i regresjonsmodellen. Nullhypotesen tilsier at det ikke er noe sammenheng mellom X og Y. Hvor godt regresjonsfunksjonen beskriver variansen i den avhengige variabelen er uttrykt gjennom R-tallet, benevnt R^2 . R-tallet kan variere mellom 0 % og 100 % forklaringsevne (Frøslie, 2018).

Modellens presisjonsnivå kan dog øke ved å transformere en eller flere av variablene. Transformasjonen bidrar til å samle datapunkter som er spredd i en «kjegleform». På fagspråket sier vi at datagrunnlaget går fra å være hetroskedalsk til homoskedalsk.



Figur 8. Hetroskedalsk vs. homoskedalsk fordeling.

2.6.4 Ekstremverdianalyse

Gumbelfordelingen, ofte omtalt som «den generaliserte ekstrem verdi fordelingen - Type 1», er et statistisk verktøy benyttet for å modellere maksimums- eller minimumsantallet av dataverdier av forskjellige fordelinger. Metoden benyttes i en rekke ingeniørtekniske fagfelt, eksempelvis for å bestemme hyppighetsintervallet av ekstreme jordskjelv, ekstreme vannføringer i elver, ekstreme snømengder og andre naturskapt katastrofer (UIO, 2019).

Sannsynlighetsfordelingen for gumbelfordelingen er gitt som:

$$f(x) = \frac{1}{\beta} e^{-\left(\frac{x-\mu}{\beta} + e^{\frac{x-\mu}{\beta}}\right)} \quad (22)$$

hvor,

μ = Gjennomsnittsverdien

β = Konstantleddet (skaleringsfaktoren)

$f(x)$ er sannsynligheten for at den målte verdien er mindre eller lik X. Videre er den kumulative distribusjonsfordelingen gitt etter formel 23.

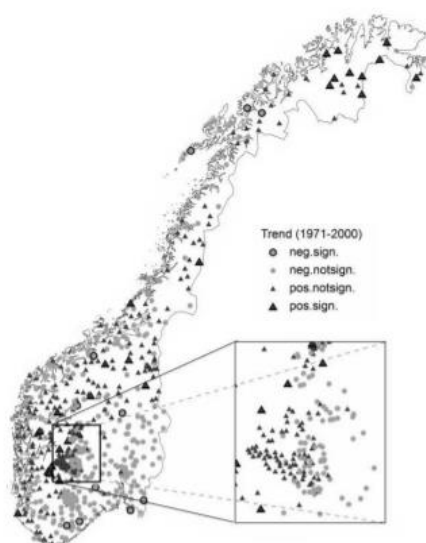
$$f(x) = e^{-e^{\frac{(x-\mu)}{\beta}}} \quad (23)$$

Ut fra denne fordelingen er det mulig å lese av den forventede returperioden av observasjonene. Returperioden beskriver det gjennomsnittlige gjentakintervallet for en gitt hendelse.

2.7 Klimaendringer

Snø dannes når varm fuktig luft kjøles raskt ned og vanninnholdet kondenserer og fryser til snøkrystaller. Dette kan skje når varm luft fra kystregioner transporterer med seg fuktighet til områder med kaldere luft, enten i høyden eller til et kaldere innlands klima. Ettersom luftfuktigheten er høyere i varm luft enn i kald luft, vil varme vintre potensielt akkumulere mer nedbør enn kalde vintre. Hvorvidt nedbøren kommer som regn eller snø avhenger av om temperaturene er over eller under 0°C.

I en undersøkelse gjort av Hydrology Research (Dyrrdal et al., 2013) ble den årlige maksimale snødybden (SD) sammenlignet for ulike områder i Norge i tidsrommet 1961 til 2010. Undersøkelsen viste at områder i høyfjellet og i Nord-Norge har en positiv trend i snødybde, mens i lavlandet, Sør-Norge og langs kystregioner ble trenden funnet til å være negativ. Positiv trend er her forstått som at snølastene i gjennomsnitt har økt mellom 1961 og 2010, mens negativ trend betegner det motsatte. I tillegg ble det funnet en positiv sammenheng mellom økende temperaturer og mengden akkumulert nedbør.

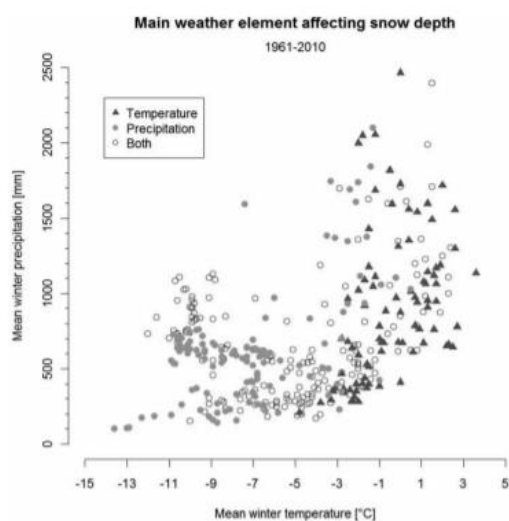


Figur 9. Trendbilde for maksimal snødybde fra år 1971 til 2000 (Dyrrdal et al., 2013, s. 174).

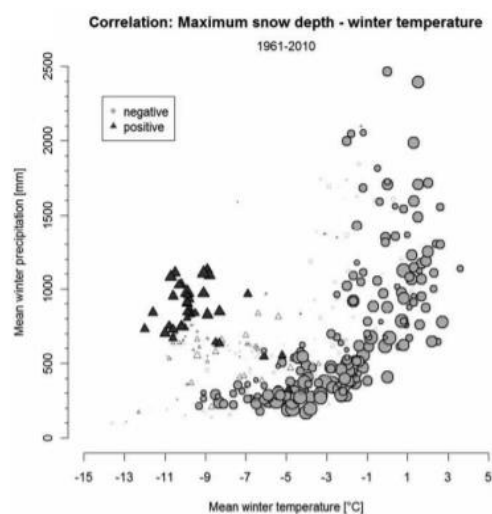
I innlandet og fjellområder med gjennomsnittlig vintertemperatur noen få grader under frysepunktet, ble det funnet en generell positiv samvariasjon mellom snødybde og akkumulert nedbør, som vist i Figur 11. Figuren viser også at styrken på forholdet økte for områder med lavere gjennomsnittlig vintertemperatur. Disse områdene ble derfor definert som nedbørsdominerte.

For de aller kaldeste områdene ble det også funnet tegn til at snødybden økte parallelt med økende temperaturer, som vist ved positiv korrelasjon i Figur 10. Årsaken til dette ble forklart ved at høyere temperaturer ga mer nedbør, men at temperaturene fortsatt var lave nok til at nedbøren falt som snø.

I lavlandet og i kystregioner, karakterisert av varme vintre med vintertemperaturer rundt 0°C, ble det funnet tegn til at utetemperaturen var den dominerende faktoren for maksimal snødybde. Disse områdene ble derfor definert som temperaturdominerte. Her viste resultatene fra Figur 10 at en økning i temperatur ga mindre snølaste.



Figur 11. Fordelingen av temperaturdominerte områder (trekant), nedbørdominerte områder (lukket sirkel) og begge (åpen sirkel). Figuren er hentet fra (Dyrrdal et al., 2013, s. 178).



Figur 10. Korrelasjonsplott mellom snødybde og temperatur. Figuren er hentet fra (Dyrrdal et al., 2013, s. 177)

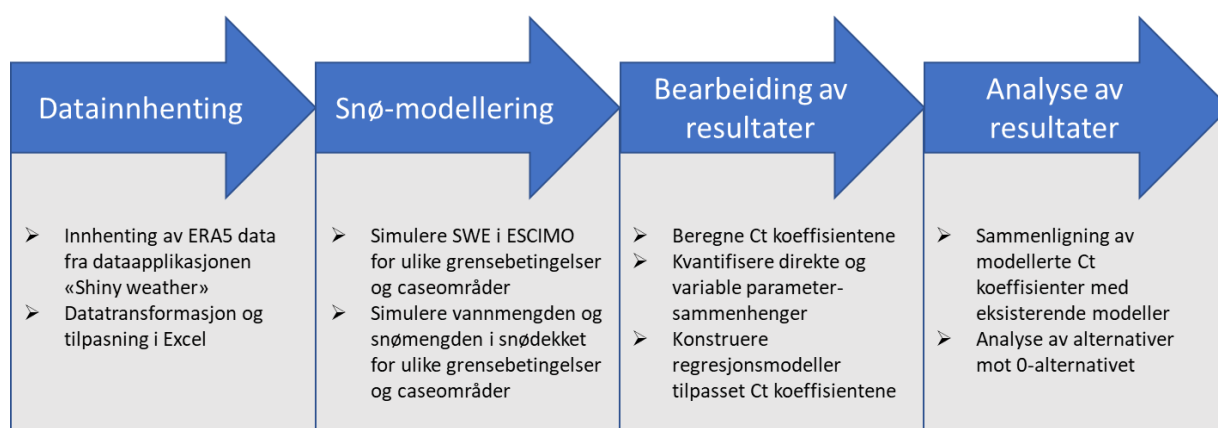
Resultatene framlagt av Hydrology Research indikerer at mange områder i Norge kan forvente en reduksjon i maksimal snødybde de kommende årene, men at enkelte områder i innlandet og fjellområdene, med de laveste temperaturene, må forvente en økning i snødybde som følge av klimaendringene.

3 Metode

Som følge av begrensninger i oppgavens omfang fokuseres det på å belyse de mest vesentlige forskjellene mellom tre modelleringsområder i Norge for å finne svar på forskningsspørsmålene. Disse områdene er i Oslo, Bergen og Tromsø. Snømodellen er utviklet i Excel av «Geoscientific Model Development» i 2016. Resultatene fra simuleringene er behandlet og visualisert i R-studio, Matlab og Excel, og sammenstilt i de endelige resultatene som er framstilt i kapittel 4 - Resultater.

På bakgrunn av disse resultatene var målet å utvikle en generell metode for estimering av den termiske koeffisienten C_T . Den generelle metoden benyttes videre i beregningen av C_T for 10 tilleggsområder, presentert i kapittel 5. Ytterligere analyser er ikke gjennomført av disse områdene.

Figur 12 viser arbeidsgangen i metoden, fra innhenting av rådata, til analyse av resultatene. Gjennomføringen av metoden var en stegvis prosess, hvor resultatene fra innledende simuleringer og analyser ga grunnlaget for videre arbeid og fokusområder. Innledningsvis ble det gjennomført korrelasjonsanalyser av alle de metrologiske variablene som ble benyttet i simuleringene for å undersøke om det var noen faktorer som hadde sterke innbyrdes sammenhenger. På bakgrunn av resultatene fra disse analysene ble det gjennomført en mer strategisk variabelseleksjon for videre analyse.



Figur 12. Generell beskrivelse av arbeidsgangen i metoden.

3.1 Den kvantitative metoden

Denne oppgaven baserer seg på bruken av kvantitativ metode for å besvare forskningsspørsmålet. Metoden går ut på å samle inn og evaluere målbare og verifiserbare data, for å forstå et fenomen bedre. Estimeringer og tolkninger som er gjort i denne oppgaven er hovedsakelig forankret i deskriptive analyser, samt noe prediktive analyser for fremtiden.

Datagrunnlaget er basert på empiriske målinger av værdata over et tidsrom på 40 år, fra 1980 til 2020. Empiriske analyser og dets kvantitative bevis gjør seg stadig mer gjeldende for å skifte konsensus i vitenskap og forskning (Mamre, 2020). I tillegg er den teoretiske analysen også viktig for å forstå det store bildet og sette data i sammenheng.

I søken etter gode svar på oppgavens forskningsspørsmål, er det benyttet registerdata (ERA5) hentet fra databaseapplikasjonen «Shiny Wether». Datagrunnlaget er framstilt som tidsserier, hvor samme meteorologiske størrelsesenhet følges over tid, dvs. én måling i timen.

3.2 Modellbeskrivelse: Snømodellen

Snømodellen i ESCIMO er en «kombinert modell» som både beregner energibalansen og massebalansen til et flatt snødekke. I dette studiet ble ERA5 data benyttet i simuleringene, nærmere beskrevet i delkapittel 3.3.3.

Modellen er konstruert slik at tilført varmeenergi gir mindre kuldeinnhold mens avgitt varmeenergi gir økt kuldeinnhold. Kuldeinnholdet er ekvivalent med mengden snø som kan akkumuleres i mm SWE, som beskrevet i delkapittel 2.5.2. Dersom andelen snø øker, øker i tillegg vannbeholdningskapasiteten til snødekket. Variasjoner i snøens metamorfose og struktur er ikke hensyntatt i analysen, men dog vet vi fra tidligere forskning at dette kan ha en effekt på snøens fysiske egenskaper, smelteevne og varmemotstand (Nuijten, 2018).

Hvor mye snø som akkumulerer på bakken og på taket er avhengig av svært mange forskjellige variabler. Eksempelvis beskriver Iver Frimannslund i sin masteroppgave hvordan varme- og fuktighetsgradienten er med på å bestemme sublimeringsraten til snø, og hvordan dette i sammenheng med indusert varme fra solceller kan redusere snølastene som opptrer på tak (Frimannslund, 2017). På samme måte vil det alltid være en jevn og stabil varmemotstand fra bakken som bidrar til snøsmelting. Gjennom tak vil varmetransportens størrelse og retning

avhenge av både innnetemperaturen og takets U-verdi. Her vil høye innnetemperaturer bidra til oppvarming av snødekket og lave innnetemperaturer bidra til nedkjøling av snødekket.

Varmefluksen fra bakken ble skrudd av og på for simuleringer av henholdsvis taklaster og marklaster. I denne modellen ble det valgt en konstant markvarmefluks, gjengitt i Tabell 7. I tillegg ble innnetemperaturen variert på for ulike alternativer. Alternativer er her forstått som bruksalternativer med ulike krav til operasjonell innnetemperatur. Modellen er kun gyldig for flate tak, uten hindringer og andre installasjoner som for eksempel solceller. I tillegg anses alle takene som kompakte.

3.2.1 Antakelser

ESCIMO er et verktøy kalibrert for presise snømodelleringer. En forutsetning for dette er at innregistrerte grensebetingelser og konstanter er presise. Av den grunn er det viktig å redegjøre for de antakelser som er gjort underveis i prosessen.

De matematiske kalkulasjonene og formlene bak snømodelleringen baserer seg på vel etablerte sannheter, mens fysiske konstanter og grensebetingelser vil være opp til den enkelte bruker å definere. De aller fleste konstanter er forhåndsdefinerte av programmet ved oppstart, mens andre må defineres selv. Tabell 7 viser noen av de viktigste konstantene som er gitt programmet, samt de representative størrelsene.

Tabell 7. Noen forhåndsdefinerte konstanter i ESCIMO (ESCIMO.spread (v2), 2016).

| Konstant/grensebetingelse | Størrelse | Forklaring |
|-------------------------------|--------------------|--|
| Grunnvarme | 2 W/m ² | Indusert varme fra mark. Varmefluksen vil i realiteten variere mye |
| Vannholdende kapasitet | 0,1 % | Absorpsjonskapasiteten til snø |
| Snø emissivitet | 0,99 | Snøens strålingsevne |
| Terskel for betydelig snøfall | 0,5 mm/h | Den laveste grenseverdien for snøfall pr. time som medberegnes |

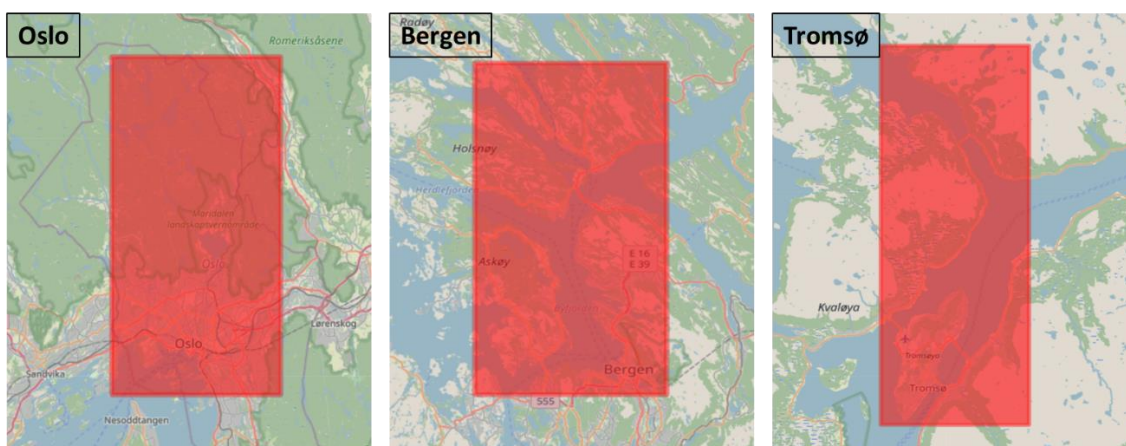
Videre antas konstante innnetemperaturer og U-verdier, selv om dette i realiteten vil variere. U-verdien til en bygningsfasade varierer naturlig grunnet skiftende uteklime og fuktighetsinnhold i fasaden (omtalt som den dynamiske U-verdien). I tillegg vil U-verdien svekkes over tid når materialenes varmeisolerende egenskaper avtar. Innnetemperaturene i et bygg vil variere med årstid, brukerens tilstedeværelse og brukerens preferanse.

3.3 Caseområdene og alternativene

I dette kapittelet gjennomgås valg av caseområder, bruksalternativer og taktyper benyttet i analysene. I tillegg gir kapittelet en kort innføring i hvilke datagrunnlag som er benyttet i simuleringene.

3.3.1 Caseområdene

Caseområdene er markert i Figur 13, og angir de geografiske grensene for oppgavens datainnsamling. Områdene på 30*30 kilometer består hovedsakelig av boligområder, havområder og grøntarealer, i tillegg til noen nærings- og industriområder. De aktuelle caseområdene ble valgt for å gi mest mulig variasjon i de klimatiske forholdene, jf. Figur 7. Tabell 8 viser hvordan noen meteorologiske variabler varierer mellom caseområdene. Alle caseområdene grenser til åpent vann, men for Oslo er lendet mer kupert og variert enn for Bergen og Tromsø. Caseområdenes varierte topografi er med på å skape en viss usikkerhet i datagrunnlaget, som beskrevet nærmere i kapittel 3.3.3.



Figur 13. Caseområdene. Illustrasjoner hentet fra (Rokka, 2021) og sener modifisert av forfatter.

Tabell 8. Noen gjennomsnittlige meteorologiske variabler for vintermånedene (des-feb). Verdiene er frembrakt på bakgrunn av ERA5-data.

| Vintermånedene (des - feb) | Oslo | Bergen | Tromsø |
|---------------------------------|-------|--------|--------|
| Middelverdi temperatur [°C] | -4,1 | 1,8 | -7,2 |
| Middelverdi nedbør [mm] | 202,5 | 751,4 | 322,4 |
| Middelverdi vind [m/s] | 2,7 | 4,9 | 2,9 |
| Middelverdi luftfuktighet [%RF] | 86 | 81,4 | 77,3 |

Tromsø ligger 69,75 breddegrader mot nord og har et «subarktisk klima» (Dfc) i henhold til Köppens klimaklassifisering. Klimaet defineres som kaldt og temperert, og har en god del nedbør i løpet av året. Gjennomsnittlig årstemperatur ligger på -0,2 °C, og gjennomsnittlig årlig nedbør er 1280mm.

Bergen ligger 60,5 breddegrader mot nord og har et «havklima» (CFb) i henhold til Köppens klimaklassifisering. Klimaet defineres som generelt varmt og temperert, med mye nedbør i løpet av året, selv i de tørreste månedene. Årsaken til det varme klimaet langs vestkysten er på grunn av de varme havstrømmene som tar med seg varmeenergi fra sydligere strøk. I Bergen er gjennomsnittlig årstemperatur 6,5 °C, og gjennomsnittlig årlig nedbør er 2461mm.

Oslo ligger tilnærmet like langt nord som Bergen, men er i større grad skjermet fra det varme og fuktige kystklimaet av langsgående fjellkjeder. Oslo har et «varmt fuktig kontinentalt klima» (Dfb) i henhold til Köppens klimaklassifisering. Klimaet defineres som kaldt og temperert, med betydelige mengder nedbør i løpet av året. Gjennomsnittlig årstemperatur er 5,9 °C, og gjennomsnittlig nedbør er 1010mm (climate-data.org, u.å.).

3.3.2 Alternativene

I dette kapittelet presenteres de ulike bruksalternativene benyttet i snømodellen for overnevnte caseområder. Hensikten er å undersøke variasjonene i akkumulert SWE på bygg av ulik bruk. Effekten bruksalternativene har på akkumulert snømengde evalueres så videre i kapittel 6. Bruksalternativene differensierer mellom referansealternativet (0-alternativet) og øvrige alternativer (alternativ 1, 2, 3 og 4). 0-alternativet benyttes som referansegrunnlag for å analysere og identifisere effekten av øvrige alternativer. I hovedsak blir effekten beskrevet som en endring sammenlignet med 0-alternativet. Alternativene er i denne oppgaven begrenset til å gjengi forholdene i et boligbygg, et fryselager, et kjølelager, for åpne konstruksjoner uten vegger og på mark.

Først presenteres 0-alternativet som angir lastsituasjonen på mark. 0-alternativet differensierer mellom de ulike caseområdene. Deretter presenteres alternativ 1 – 4, som gjenspeiler bruken av et boligbygg, fryselager, kjølelager og tak uten vegger (eksempelvis togperrong), med ulike innnetemperaturer. Disse bruksalternativene grupperes så inn i forskjellige taktyper av ulik U-verdi. Todelingen av parameterne (innnetemperatur og U-verdi) er gjort for å undersøke

innvirkningen av differensierende U-verdi og innetemperatur for ulike klimasoner. I virkeligheten vil innetemperaturen variere over året og takets U-verdi svekkes over tid, men det er gjort en antakelse om konstant innetemperatur og U-verdi for alle alternativer i dette studiet.

0-alternativet representerer referansesituasjonen for videre analyser, og gjenspeiler lastsituasjonen på mark. 0-alternativet skiller seg fra øvrige alternativer gjennom den induuerte markvarmen, som vist i Tabell 7.

Alternativ 1 gjenspeiler bruken av et boligbygg med kompakt tak. Innetemperaturen er satt til å være 25 °C, mens U-verdien på taket varierer mellom 0,09 W/m²K og 1,2 W/m²K, jf. Tabell 9.

Alternativ 2 og 3 gjenspeiler bruken av et fryselager og kjølelager med kompakte tak. Innetemperaturen er satt til å være henholdsvis konstant -28 °C og 4 °C, mens U-verdien på taket varierer mellom 0,09 W/m²K og 0,46 W/m²K, jf. Tabell 9.

Alternativ 4 forsøker å gjengi bruken av åpne konstruksjoner uten vegger. Innetemperaturen er satt til å være lik utetemperaturen, mens U-verdien på taket varierer mellom 0,09 W/m²K og 0,46 W/m²K, jf. Tabell 9.

Taktypene baserer seg på variasjoner i krav til U-verdi som følge av skiftende lovverk, jf. Tabell 1. I realiteten vil enkelte bygninger med lav innetemperatur være fritatt gjeldende minimumskrav (DiBK, 2017). Dette ses bort ifra i denne oppgaven. Ifølge kapittel 2.1.1 differensierer også byggeforskriften av 1969 på krav til U-verdi avhengig av byggets lokasjon og innetemperatur. For enkelhets skyld settes denne verdien lik middelveiden 0,46.

Tabell 9. Bruksalternativer og ulike taktyper.

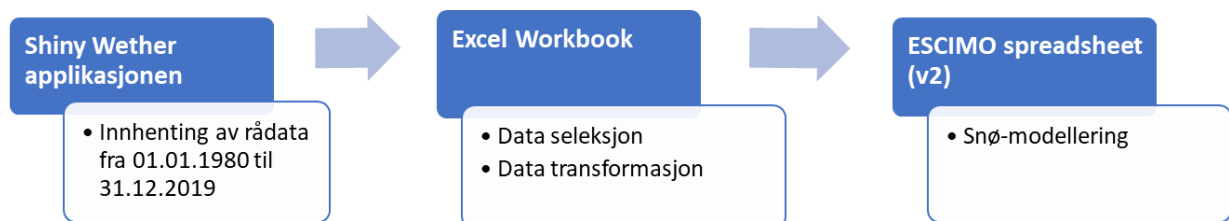
| Bruksalternativ | Beskrivelse | Taktype (Forskrift) | U-verdi |
|-----------------|-------------|---------------------|---------|
| 0-alternativet | Mark | - | - |
| 1 | Bolig | TEK17 | 0,13 |
| | | NS 3700 | 0,09 |
| | | Byggeforskrift 1969 | 0,46 |
| | | Glasstak | 1,2 |

| | | | |
|---|-----------------|---------------------|------|
| 2 | Fryselager | TEK17 | 0,13 |
| | | NS 3700 | 0,09 |
| | | Byggeforskrift 1969 | 0,46 |
| 3 | Kjølelager | TEK17 | 0,13 |
| | | NS 3700 | 0,09 |
| | | Byggeforskrift 1969 | 0,46 |
| 4 | Tak uten vegger | TEK17 | 0,13 |
| | | NS 3700 | 0,09 |
| | | Byggeforskrift 1969 | 0,46 |

3.3.3 Datagrunnlaget

ERA5 data ble benyttet som input for modelleringene. Datagrunnlaget er hentet fra dataapplikasjonen «Shiny weather data» og er produsert av «European Centre for Medium-Range Weather Forecastes», forkortet til ECMWF. ERA5 kombinerer store mengder historiske observasjoner med globale estimater ved hjelp av avanserte modellerings- og dataassimileringssystemer (Hersbach & al., 2020). Datasettets romlige oppløsning er på 30 * 30 kilometer, og inkluderer værdata tilbake til 1979. Siden de metrologiske størrelsene gjengir gjennomsnittsverdiene innenfor den valgte gridcellen, kan værmålinger gjort fra en målestasjon innenfor gridcellen avvike fra datagrunnlaget. Dette gjelder i særlig grad områder med mye varierende topografi.

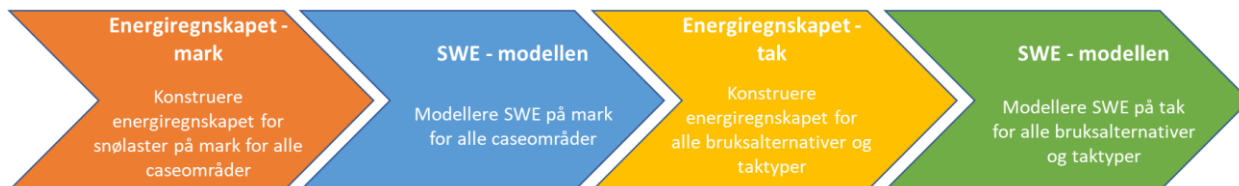
ESCIMO benytter timesdata for lufttemperatur, relativ fuktighet, vindhastighet, nedbør, kortbølget stråling og langbølget stråling. Datagrunnlaget ble sortert og transformert til riktige benevninger i Excel før det ble benyttet i ESCIMO. Det ble hentet inn data fra 40 år med målinger for de aktuelle caseområdene, fra 01.01.1980 til 31.12.2019.



Figur 14. Generell beskrivelse av klargjøring av data for snøsimulering. Programvare/applikasjon øverst med tilhørende operasjon under.

3.4 Snøsimulering

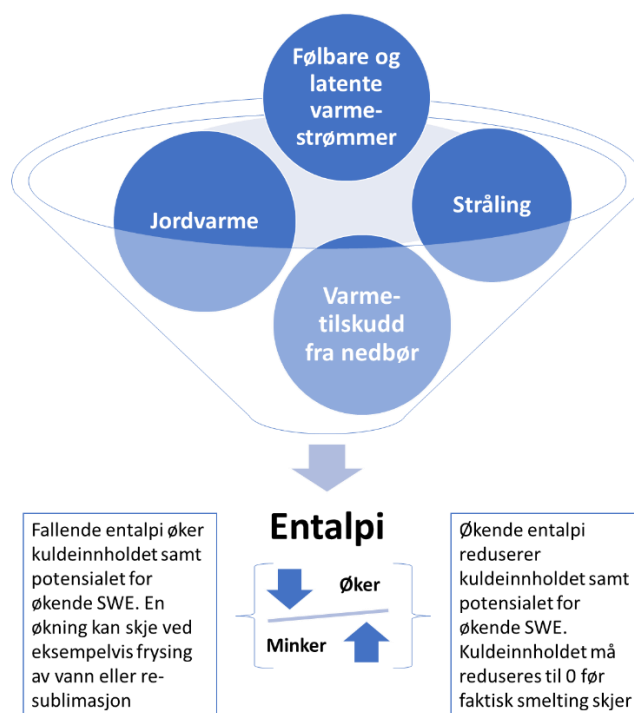
For å simulere snøakkumulasjonen på en flate over tid, må vi vite hvor mye snø som forsvinner og legges til som følge av nedbør, smelting, frysing, sublimasjon og resublimasjon. Dette kapitlet gjennomgår en generell beskrivelse av framgangsmåten for simulering av snølaste.



Figur 15. Generell beskrivelse av prosessen for snømodellering.

3.4.1 Energibalansen

Energibalansen til et snødekke er med på å påvirke den totale akkumulasjonen av SWE. Akkumulasjonspotensialet avhenger av hvorvidt snø smelter eller om vann fryser. Som tidligere nevnt er dette i ESCIMO uttrykt som funksjon av kuldeinnholdet. Ved negativ energibalanse øker kuldeinnholdet i snødekket og ved positiv energibalanse reduseres kuldeinnholdet. Hvorvidt energibalansen er positiv eller negativ avhenger av om energitilskuddet øker eller reduseres fra forrige tidsintervall, jf. formel 14. Formelen beskriver energibalansen for snø på mark, men for beregning av energibalansen for snø på tak må også varmetapet gjennom taket bestemmes.



Figur 16. Energibalansen i et snødekke på mark.

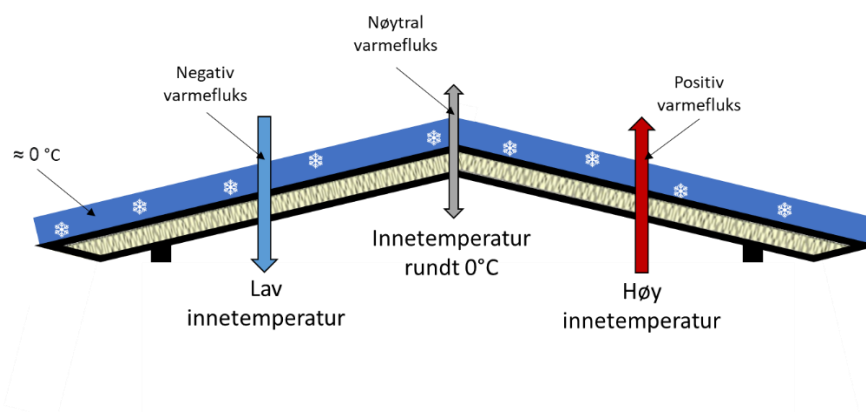
3.4.2 Implementering av varmetransport gjennom tak

Energibalansen til snødekket på taket ble beregnet ved å bytte ut varmekraften fra bakken med varmekraften gjennom taket (H_T). Den nye energimengden tilgjengelig for smelting (H) er uttrykt ved formel 24. Den aktuelle varmekraften gjennom taket ble beregnet som funksjon av innetemperaturen, takets varmegjennomgangskoeffisient og den timesvise snøtemperaturen, jf. Fourier's lov, formel 13. Den løpende snøtemperaturen beregnes for hvert tidsintervall av ESCIMO, i henhold til formell 15.

$$H_Q + H_L + H_F + H_R + H_T = H \quad (24)$$

Ved innetemperaturen i nærheten av frysepunktet er varmekraften gjennom taket mer eller mindre 0 W/m^2 . Dette skyldes at snø eksisterer i nærheten av eget smeltepunkt, og ved liten temperaturdifferanse mellom innetemperaturen og snøens temperatur blir varmeledningen gjennom taket liten. Derimot vil innetemperaturen langt på minussiden eller langt på plussiden gi store temperaturdifferanser samt høy varmeledning.

Begrepene «positiv» og «negativ» varmekraft er i denne oppgaven benyttet som terminologi for å betegne den generelle retningen til varmetransporten gjennom et tak. Positiv varmekraft er forstått som transport av varmeenergi fra innsiden av bygget til snødekket over takt, mens negativ varmekraft beskriver prosessen når varmeenergi går fra snødekket og inn i bygget.

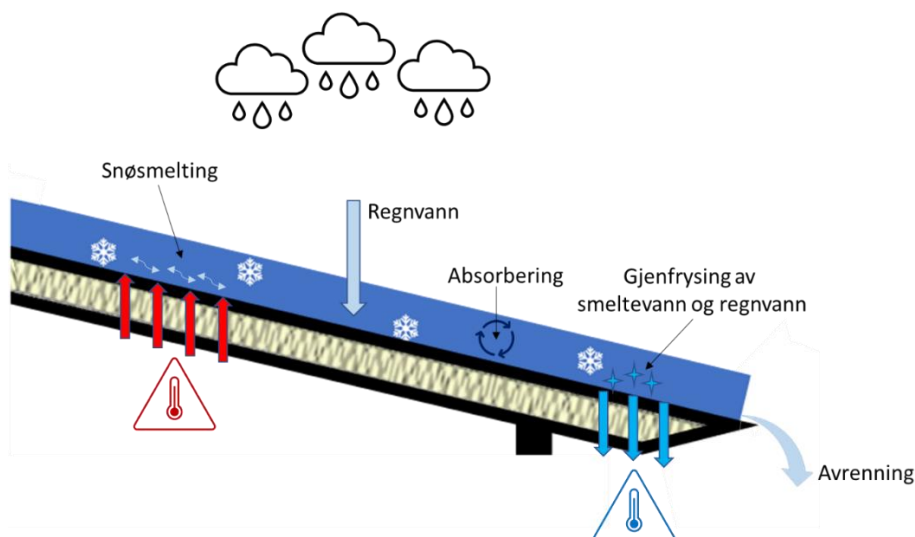


Figur 17. Varmetransporten gjennom et tak avhenger av innetemperaturen, snøtemperaturen og takets varmemotstand.

3.5 Effekten av flytende nedbør

Med bakgrunn i forskningsspørsmål 1: «Hvilke faktorer har den største innflytelsen på akkumulert snømengde på et tak?» ble det innledningsvis laget en korrelasjonsmatrise for å kartlegge eventuelle sammenhenger mellom de klimatiske parameterne benyttet i simuleringene. Matrisen viste blant annet en sterk positiv korrelasjon mellom akkumulert nedbør, akkumulert SWE og C_T koeffisienten.

Det er et faktum at fast nedbør bidrar til mer SWE. Det er derfor interessant å analysere hvilken effekt flytende nedbør har for SWE-mengden for de ulike caseområdene og bruksalternativene. I dette kapitlet beskrives framgangsmåten for beregning av akkumulert regnvann i SWE som funksjon av frysing, absorbering og avrenning. Metoden er konstruert med bakgrunn i teorigrunlaget presentert i delkapittel 2.5.2 og beregningene er gjort i R-studio.



Figur 18. Vannbeholdningens kretsløp i et snødekke på et tak.

Forenkling: Det antas en homogen fordeling av regnvann og smeltevann i snødekket. Forenklingen gjør det mulig å beregne andelen regnvann som inngår i de ulike prosessene (avrenning, absorbering og frysing) som en prosentandel av SWE.

3.5.1 Avrenning av regnvann

Hvor mye vann som renner av et tak med snø avhenger av hvor mye vann som er i snødekket samt hvor mye vann snødekket klarer å holde på. Dersom den akkumulerte vannmengden overstiger vannbeholdningskapasiteten vil det overflødig vannet renne av, gitt følgende betingelse:

$$\frac{\text{Akkumulert vann}}{\text{Vannbeholdningskapasiteten}} > 1 \leftrightarrow \text{Avrenning} \quad (25)$$

hvor,

$$\text{Akkumulert vann} = \text{Vannbeholdning}_{n-1} + \text{Flytende nedbør}_n + \text{Smeltevann}_n$$

$$\text{Vannbeholdningskapasiteten} = \text{Frysekapasiteten}_n + \text{Absorpsjonskapasiteten}_n$$

Vi antar videre at andelen akkumulert regnvann og smeltevann opptar en kumulativ lik fordeling av vannbeholdningen. Ved å subtrahere den totale mengden akkumulert vann fra vannbeholdningskapasiteten, får vi den totale vannmengden som renner av for et gitt tidsintervall n :

$$\begin{aligned} \text{Avrenning}_{TOT_n} = & (\text{Vannbeholdning}_{n-1} + \text{Flytende nedbør}_n + \text{Smeltevann}_n) \\ & - (\text{Frysing}_n + \text{SWE}_{n-1} * 0,1) \end{aligned} \quad (26)$$

hvor,

$$\text{Avrenning}_{TOT_n} \in [0, \rightarrow]$$

$$\text{Flytende nedbør} = \text{Summen av akkumulerte regnbyger [mm]}$$

$$\text{Smeltevann} = \text{Andelen SWE som gjennomgår en faseovergang fra fast stoff til væske [mm]}$$

$$\text{Frysing} = \text{Andelen SWE som gjennomgår en faseovergang fra væske til fast stoff [mm]}$$

$$(\text{SWE} * 0,1) = \text{Andelen vann som absorberes [mm]}. \text{ Se kapittel 2.5.2.}$$

Andelen regnvann som renner av antas å være proporsjonal med andelen regnvann som inngår i total SWE. Forholdet mellom disse størrelsene multiplisert med den totale avrenningen beskriver hvor mye regnvann som renner av taket ved tidsintervall n , gitt følgende formel:

$$\begin{aligned}
Avrenning_{regnvann_n} &= \frac{\text{Akkumulert regnvann ved tidspunkt } n}{SWE_n} * Avrenning_{TOT_n} \\
&= \frac{\sum_0^{n-1} \text{Regnvann avsatt} - \sum_0^{n-1} Avrenning_{regnvann}}{SWE_n} * Avrenning_{TOT_n}, \quad SWE_n > 0
\end{aligned} \tag{27}$$

hvor,

Regnvann avsatt = Mengden regnvann som forblir på taket etter en regnbyge [mm]

Formel 27 tilsier at andelen regnvann som renner av ved tidsintervall n avhenger av andelen regnvann i snøpakken ved foregående tidsintervall, $n-1$. Regnvannet som ikke renner av adderes til den total SWE-mengden i form av enten absorbert vann eller fryst vann.

3.5.2 Absorbering av regnvann

Dersom det finnes snø på en overflate vil flytende nedbør kunne absorberes av snødekket, hvilket gir høyere SWE. Absorpsjonsprosessen oppstår fordi kapillære krefter i snøens porer suger opp vannet. Dette forutsetter at snøen ikke allerede er mettet av eksempelvis tidligere nedbør eller snøsmelting. Snøsmelting bidrar også til mindre vannbeholdningskapasitet. Mengden regnvann som absorberes av et snødekke under nedbør er derfor avhengig av hvor mye vann som allerede er absorbert, gitt følgende formel:

$$\text{Absorbert flytende nedbør}_n = \min \left\{ \begin{array}{l} SWE * 0,1 - \text{Vannbeholdning} \\ \text{Flytende nedbør}_n \end{array} \right. \tag{28}$$

Andelen flytende nedbør som inngår i total SWE ved tidspunkt n , kan beregnes som en prosentvis andel av den totale vannbeholdningen og SWE-mengden:

$$\begin{aligned}
\text{Andelen flytende nedbør i SWE} &= \frac{\text{Akkumulert regnvann ved tidspunkt } n}{SWE_n} * \text{Vannbeholdning}_n \\
&= \frac{\sum_0^{n-1} \text{Regnvann avsatt} - \sum_0^{n-1} Avrenning_{regnvann}}{SWE_n} * \text{Vannbeholdning}_n, \quad SWE_n > 0
\end{aligned} \tag{29}$$

3.5.3 Frysing av regnvann

Frysing av vann er en eksoterm prosess som inntreer når varmeenergi trekkes ut av systemet. Slike prosesser skjer ikke spontant, men over tid, hvilket betyr at kun regnvann som allerede er absorbert i snø kan fryse. Ved frysing blir noe av det absorberte vannet gjort om til fast stoff. Prosessen frigjør plass for at nytt vann kan absorberes, samtidig som det danner mer snø med absorberende egenskaper. Frysing kan bare skje ved negativ energibalanse, og mengden vann som kan fryse er gitt etter formel 30 nedenfor.

$$Frysing = \frac{E_{balansert}}{l_s} \quad (30)$$

hvor,

$E_{balansert}$ = systemets totale energibalanse [J]

l_s = den spesifikke smeltevarmen til vann [J/kg]

$E_{balansert}$ er summen av all energitransport til og fra systemet. Den faktiske vannmengden som fryser ved tidsintervall n er avhengig av systemets totale vannbeholdning gitt formel 31. Formelen beskriver hvor mye vann som faktisk fryser, uavhengig av vannets opprinnelse.

$$Frysing_n = \min \left\{ \begin{array}{ll} Vannbeholdning_n, & E_{balansert} < 0 \\ \frac{E_{balansert_n}}{l_s}, & E_{balansert} < 0 \end{array} \right. , \quad (31)$$

Andelen fryst regnvann som inngår i total SWE ved tidspunkt n, kan beregnes som en prosentvis andel av fast SWE og total SWE, kalkulert i henhold til formel 32.

$$\begin{aligned} Frysing_{regnvann} &= \frac{\text{Akkumulert regnvann ved tidspunkt } n}{SWE_n} * (SWE_n - Vannbeholdning_n) \\ &= \frac{\sum_0^{n-1} \text{Regnvann avsatt} - \sum_0^{n-1} \text{Avrenning}_{regnvann}}{SWE_n} * (SWE_n - Vannbeholdning_n) \end{aligned} \quad (32)$$

hvor,

$(SWE_n - Vannbeholdning_n)$ = Total beholdning av fast SWE ved tidsintervall n [mm]

3.6 Den termiske koeffisienten

I dette kapittelet gjennomgås bearbeidingen av rådata fra snømodellens resultater til kvantitative verdier som beskriver C_T .

Estimeringen av C_T baserer seg på de samme prinsippene som beskrevet i Annex A i forslaget til ny snølaststandard - prEN1991-1-3 (CEN/TC 250, 2020a, s. 31-32). I spesielt stor grad framstår avsnitt A.3 ledd (5) – (10) som relevante for Norge. Punktene er gjengitt nedenfor, i eget format, tilpasset C_T beregningen:

(5) For klima med stabile og kontinuerlige snølaste over hele vintersesongen, kan årlige maksimale snølaste betraktes som et passende grunnlag for ekstremverdistatistikk. For klima preget av flere uavhengige perioder med snølaste, kan den statistiske stabiliteten økes ved å bruke snølaste over en bestemt grenseverdi. POT – metoden (peak over threshold) anbefales som en passende metode.

(6) For klima som ikke har snø hvert år (omtalt som 0-år), bør de aktuelle 0-årene ekskluderes fra lastberegningene og C_T predikeringen. 0-årene bør likevel inkluderes i sannsynlighetsfordelingen for returlaste og returperioder.

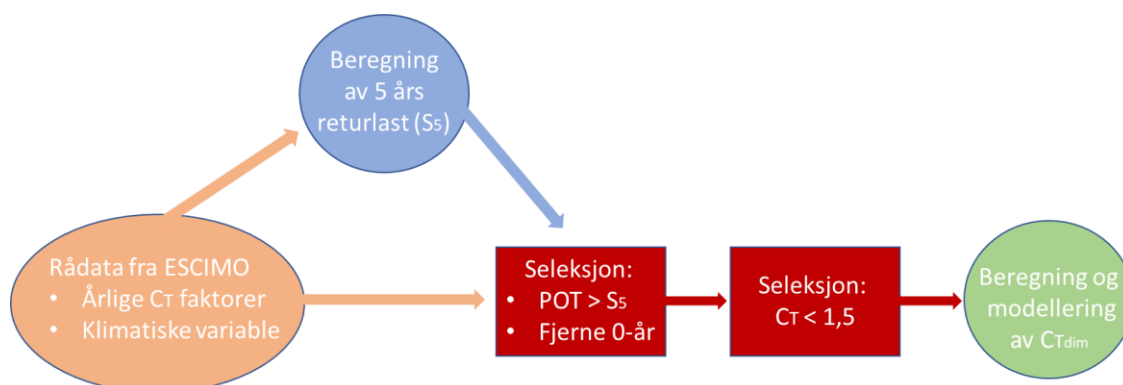
(7) Sannsynlighetsfordelingen for identifisering av årlig maksimal marklast bør være så presis som mulig. Generell erfaring viser at gumbelfordelingen eller en log-normalfordeling gir gode sannsynlighetsfordelinger.

(8) Ved unormalt store C_T verdier og snølaste (utenforliggere) bør ytterligere analyser gjennomføres for å kontrollere verdienes validitet.

(9) Hvis forholdet mellom årlig maksimal taklast og sanntids marklast overstiger 1.5, anses verdien som en eksepsjonell verdi. Eksepsjonelle verdier bør ses bort ifra ved beregningen av C_T koeffisienten.

(10) Resultatene fra sannsynlighetsfordelingen av marklaste, samt andre former for parameterestimeringer, bør benyttes til å kvantifisere usikkerheten i C_T , samt benyttes i utformingen av mer presise modeller for estimering av C_T . Slike modeller kan eksempelvis konstrueres gjennom regresjonsanalyser.

Til tross for at overnevnte anbefalinger i realiteten tilknyttet revisjon av nytt snølastkart, anses de som relevante også for dette studiet. Antakelsen er gjort fordi snølasten på tak ofte ligner snølasten på mark. Overnevnte kriterier refereres til underveis i de neste kapitlene.



Figur 19. Generell beskrivelse av bearbeidingen av rådata fra ESCIMO til dimensjonerende C_T .

3.6.1 Beregning av den termiske koeffisienten

Den termiske koeffisienten beskriver det relative forholdet mellom modellerte taklasten og marklasten, og angir hvor mye den aktuelle marklasten må skaleres for å gjenspeile lastsituasjonen på taket. Den «årlige termiske koeffisienten» beskriver dette forholdstallet for hvert simuleringsår, og beregnes etter formel 33 basert på snømodellens resultater.

$$C_T = \frac{SWE_{tak\ MAX}}{SWE_{mark}} \quad (33)$$

hvor,

$SWE_{tak\ MAX}$ = maksimal SWE på taket for det gitte året [mm]

SWE_{mark} = SWE på mark ved samme tidspunkt som $SWE_{tak\ MAX}$ [mm]

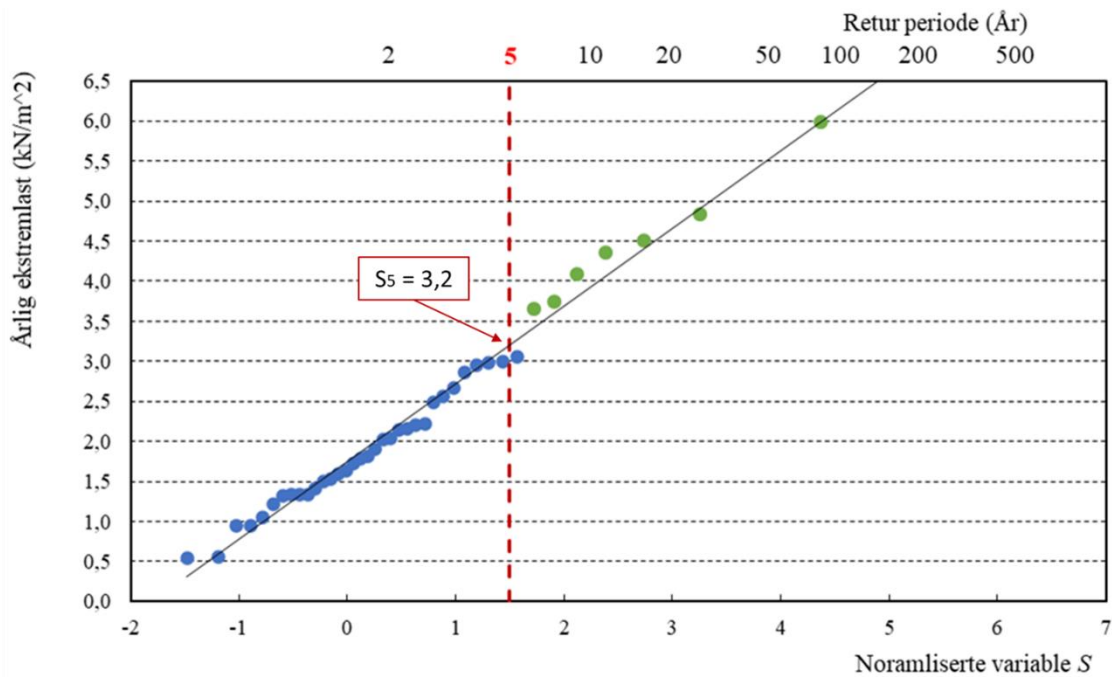
For å konstruere valide C_T faktorer, bør de frembringes på bakgrunn av år med relativt mye snø, slik at de mest kritiske lastsituasjonene blir tatt høyde for. I tillegg er risikoen høy for at år med lite snø gir uforholdsmessig høye C_T faktorer, spesielt for tak med lave innnetemperaturer. Årsaken skyldes hvordan C_T beregnes, samt forskjellene i snøens akkumulasjonstid på mark og tak. For år med lite snø kan maksimal taklast inntreffe tilnærmet samtidig som bar mark. Dette skjer når snø smelter umiddelbart på bakken, samtidig som snø akkumulerer på taket. Fenomenet inntreffer når varmekraften gjennom taket er mye lavere enn den induerte

jordvarmen. Tilsvarende vil bygg med negative inne-temperaturer ha negativ varme-fluks, hvilket tillater snø å ligge på taket lenge etter at nedsmeltingen på bakken har begynt. Dette kan medføre at forholdet mellom den maksimale taklasten og sanntids marklasten blir uforholdsmessig stort, spesielt for år med lite snø. Ifølge formel 33 er C_T faktoren nettopp et uttrykk for dette forholdstallet. Tabell 10 illustrerer hvordan fenomenet utspiller seg i praksis for et frysela-ger i Oslo i perioden 2010 – 2019. Legg merke til at årlig C_T faktor generelt er høyere for år med lite snø, enn år med mye snø.

Tabell 10. Modellerte årlige C_T verdier fra 2010 – 2019 for Oslo – Frysela-ger: TEK17 standard.

| År | C_T | Maksimal SWE mark [mm] |
|------|-------|------------------------|
| 2010 | 1,0 | 97,3 |
| 2011 | 1,0 | 126,1 |
| 2012 | 1,6 | 38,8 |
| 2013 | 4,1 | 24,6 |
| 2014 | 1,1 | 71,6 |
| 2015 | 1,2 | 45,3 |
| 2016 | 1,0 | 41,1 |
| 2017 | 1,2 | 22,1 |
| 2018 | 1,1 | 218,2 |
| 2019 | 1,1 | 221,6 |

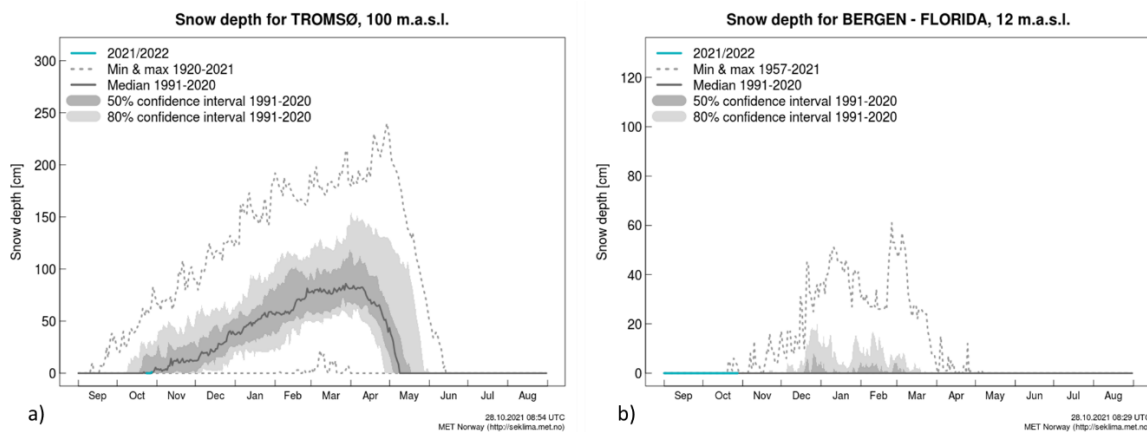
For å unngå uforholdsmessig høye C_T faktorer, er koeffisienten beregnet med forbehold om at SWE_{mark} er større enn eller lik 5-års returlasten (S_5). Dette er gjort for å påse at den termiske faktoren ikke kalkuleres på bakgrunn av år med relativt lite snø. I samsvar med kriteriet (5) og (6) i forslaget til ny snølaststandard, ble ekstremverdianalysen POT benyttet for å differensiere mellom gyldig og ugyldige år basert på den gitte terskelverdien (S_5). Figur 20 illustrerer hvordan den log-normaliserte sammenhengen mellom marklaster og returperioder varierer for Tromsø, samt hvilke marklaster som er forventet å inntreffe en gang hvert 5. år, dvs. 5-års returlasten. Metoden som er benyttet for å beregne S_5 er beskrevet i neste kapittel.



Figur 20. Den log-normaliserte regresjonslinjen for marklaster og returperioder for Tromsø. Alle verdier over S_5 betegnes som gyldige (markert i grønn), mens alle verder under betegnes som ugyldige (markert i blå). Ugyldige verdier ekskluderes fra videre beregninger. Figuren er laget med bakgrunn i ERA5 data.

3.6.2 Variasjoner i snølast og beregning av returlaster

Snølastene på tak og mark er vanligvis tett relaterte, og avhenger av flere ulike parametere som luftfuktighet, vind, nedbør, langbølget- og kortbølget stråling samt utetemperaturen. Figur 21 viser hvordan snø akkumulerer i områder med lange og kalde vintre a), og i områder med høye vintertemperaturer og større variasjon i luftfuktighet og stråling b). Kalde klima tillater snølastene å bygge seg opp gradvis før en hurtig nedsmelting skjer mot slutten av vinterhalvåret. Dette er typisk for nordlige områder i Norge, eksempelvis i Tromsø. I varmere klima klarer ikke snødekket å bygge seg opp over lengre tid, før nedsmelting skjer. Det vil dog være mange individuelle perioder med snøakkumulering etterfulgt av hurtig nedsmelting som preger vinterhalvåret. Vintre som dette er normalt langs Norges vestkyst, for eksempel i Bergen.



Figur 21. Akkumulert snødybde for stabilt kaldt klima a) og varmt kystklima b). Figurene er hentet fra (Meteorologisk Institutt, 2021).

Siden akkumulert snømengde varierer for ulike klima, vil også returlastene variere. Returlastene er framskaffet ved å gjennomføre en ekstremverdianalyse av de årlige maksimale marklastene for et område. Alle marklaster er simulert i ESCIMO. Analysemetoden kalles for gumbelfordelingen, og er nærmere beskrevet i kapittel 2.6.4. Ifølge kriteriet (7) gir gumbelfordelingen en god sannsynlighetsfordeling for årlig maksimal marklast. Den maksimale snølasten som forventes å inntreffe i løpet av 5 år, omtales som fem-års returlasten, og benevnes S_5 . Tilsvarende benevnes femti-års returlasten S_{50} . I Tabell 16 på side 65 vises de modellerte returlastene S_5 og S_{50} for caseområdene. Verdiene er basert på data fra ERA5 og kan variere fra andre datakilder.

3.6.3 Ekstremverdikorrigeringer i fastsettelse av endelig C_T faktor

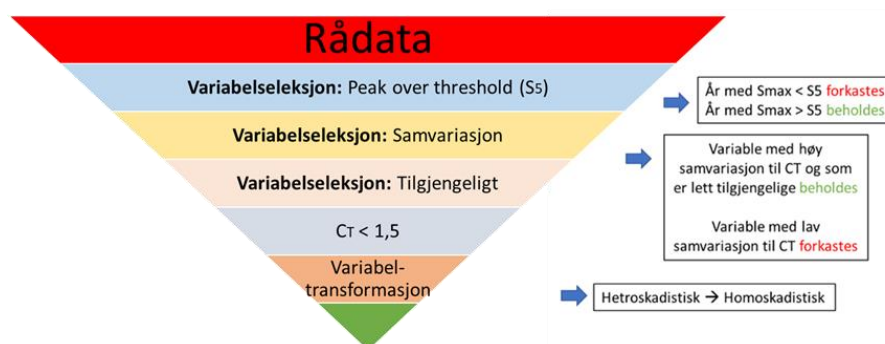
Tiltak (9) på side 41 anbefaler at forholdet mellom størst taklast og tilsvarende marklast ikke overstiger 1.5. Verdier over 1,5 anses som eksepsjonelle verdier og annulleres fra beregningene. Bakgrunnen for antakelsen er at maksimal snølast på tak tilnærmet aldri overstiger 150 % av tilsvarende snølast på mark. I tilfeller hvor den termiske koeffisienten overstiger 1,5 har snødekket ligget på taket over lengre tid, mens snøen på bakken har smeltet gradvis. Dette kan bare skje på bygg med svært lave innnetemperaturer, som for eksempel et fryselager. I teorien kan den termiske koeffisienten bli uendelig dersom snømengden på bakken smelter til null samtidig som snødekket på taket opprettholdes.

Gyldige år tilsvarer datagrunnlaget som er igjen etter at rådataen er bearbeidet på bakgrunn av overnevnte kriterier. Den dimensjonerende C_T faktoren (C_{Tdim}) beregnes som gjennomsnittet av alle gyldige år. Gjennomsnittet angir den «mest typiske» verdien for C_T . Med dimensjonerende

C_T menes den aktuelle C_T koeffisienten som skal benyttes i dimensjonerende snølastberegninger, beskrevet i kapittel 2.2.2.

3.6.4 Regresjonsanalysen

For å gi en mer generell beskrivelse av variasjonene i den termiske koeffisienten ble det også laget flere multiple regresjonsanalyser, jf. kriterie (10). Rådatagrunnlaget for analysene ble bearbeidet i henhold til Figur 22. Programvarene benyttet i analysene var Matlab og Excel.



Figur 22. Generell beskrivelse av seleksjonsprosessen og bearbeidingen av datagrunnlaget for regresjonsanalysene.

Seleksjonsprosessen av forklaringsvariabler

Forklaringsvariablene benyttet i analysene ble selektert med bakgrunn i resultatene fra innledende korrelasjonsanalyser. Korrelasjonsanalysene ble benyttet for å vurdere hvilke variabler som i størst grad forklarte variansen til C_T . I tillegg ble det gjennomført en eksplorativ analyse basert på studentens domenekunnskap, hvor både samvariasjoner og innbyrdes sammenhenger mellom variablene gjorde seg gjeldende i variabelseleksjonen.

Den endelige regresjonsmodellen må også være enkel å anvende for brukeren, med forklaringsvariabler som er lett tilgjengelige. Av den grunn ble flere kompliserte variabler luket ut. Tabell 11 viser hvilke variabler som ble tatt med videre, og ikke, basert på overnevnte seleksjonskriterier.

Tabell 11. Potensielle og selekterte variabler for regresjonsanalysen. Selekterte variabler er markert i grønt.

| Symbol | Forklaring |
|------------------------------------|---|
| U | Takets varmegjennomgangskoeffisient |
| T | Middelverdi temperatur |
| F | Middelverdi fuktighet |
| V | Middelverdi vind |
| $A_k S$ | Akkumulert fast nedbør |
| $A_k L$ | Akkumulert flytende nedbør |
| $\Phi_{termisk}$ | Gjennomsnittlig termisk varmefluks gjennom taket |
| Q_k | Normalisert innkommende kortbølget stråling |
| Q_l | Normalisert innkommende langbølget stråling |
| S_{max} | Maksimal markklast |

Til tross for at mange potensielle forklaringsvariabler ses bort ifra, har de likevel sterke innbyrdes sammenhenger med de selekterte variablene. På sett og vis kan man si at variablene gjenspeiler hverandre. Dette er en viktig bemerkning som kan berettigje valget å ekskludere noen variabler. Interne sammenhenger kan avleses i korrelasjonsmatrisene i kapittel 4.1, og diskuteres videre i kapittel 5.

Regresjonsmodellen

En «Stepwisefit»-analyse ble benyttet for å finne kombinasjonen av selekterte variabler som forklarte C_T best. «Stepwisefit» er en innebygd funksjon i Matlab som gjør stegvise lineære regresjonsanalyser av hver forklaringsvariabel. Analysen opererer med et signifikansnivå på 0,05. Deretter ble noen av de selekterte variablene transformert for å gjøre dataspredningen mer homoskedalsk. De aktuelle variablene ble enten rot-transformert eller log-transformert avhengig av datapunktene's spredning mot C_T .

Avslutningsvis ble de endelige variablene benyttet i regresjonsmodellen, i den eventuelle transformerte formen, som forklaringsvariabler.

4 Resultater

I dette kapitlet presenteres et utvalg av de bearbejdede resultatene fra totalt 182 simuleringer. Resultatene er bearbejdet ved bruk av grafiske verktøy i Excel og R-studio, og blir videre diskutert i kapittel 6. Øvrige resultater fra simuleringene finnes i kapittel 5.

I delkapittel 4.1 presenteres resultatene fra korrelasjonsanalysene. Korrelasjonsanalysene ble hovedsakelig benyttet som verktøy i seleksjonsprosessen av forklaringsvariabler for regresjonsanalysene. I tillegg indikerer korrelasjonsanalysen hvilke meteorologiske faktorer som har størst innvirkning på akkumulert SWE. Resultatene benyttes videre i tolkninger og analyser gjort i kapittel 6.

I delkapittel 4.2 blir den årlige maksimale SWE-mengden for ulike bruksalternativer og taktyper sammenlignet med marklasten (0-alternativet) for de ulike caseområdene. Grafene forsøker å illustrere samt kvantifisere forskjellene i akkumulert SWE.

Delkapittel 4.3 forsøker å svare på hvordan regnvann påvirker akkumulasjonsprosessen av SWE for ulike bruksalternativer og taktyper. Kapitlet skiller mellom total regnvannandel i SWE, absorbert regnvann og fryst regnvann.

I delkapittel 4.4 presenteres et sett med multiple regresjonsanalyser. Regresjonsanalysene forsøker å predikere den termiske koeffisienten, ved hjelp av de selekterte variablene, for hvert bruksalternativ. Selektionsprosessen er gjort i tråd med beskrivelsene i kapittel 3.6.4.

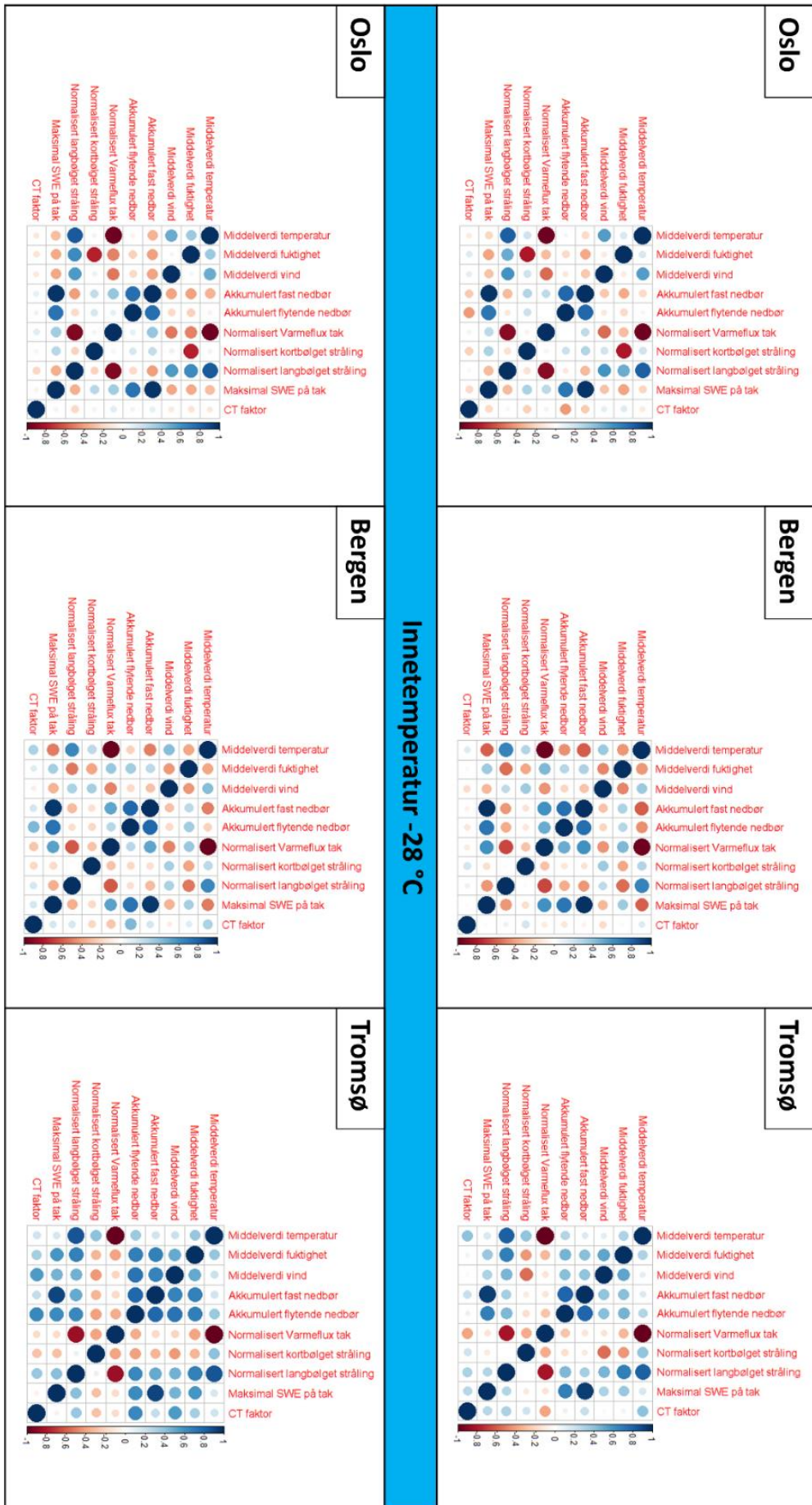
I delkapittel 4.5 presenteres de endelige termiske koeffisientene frembrakt av ESCIMO for alle bruksalternativer og caseområder. I tillegg er den kumulative prosentfordelingen over gyldige C_T verdier illustrert for fryselaire og bolighus. I kapittel 5 er C_T verdiene for ytterligere 9 områder i Norge (og ett i utlandet) presentert.

I delkapittel 4.6 sammenlignes eksisterende verdier for den termiske koeffisienten med modellerte verdier. Grafene viser også variasjonen mellom C_T og modellert S_{50} .

4.1 Korrelasjonsanalyser

Det ble laget to korrelasjonsmatriser for hvert caseområde, som vist i Figur 23. Korrelasjonsmatrisene viser til samvariasjonen mellom 7 meteorologiske variabler (temperatur, fuktighet, vind, fast nedbør, flytende nedbør, langbølget stråling og kortbølget stråling), den maksimale SWE-mengden på et tak, varmefluksen gjennom taket og den årlig modellert C_T faktoren. Alle korrelasjonsmatrisene gjelder for tak av TEK17 standard med innetemperatur lik -28 °C eller 25 °C . Sirklenes størrelse viser til korrelasjonens styrke, mens fargen viser til korrelasjonens fortegn.

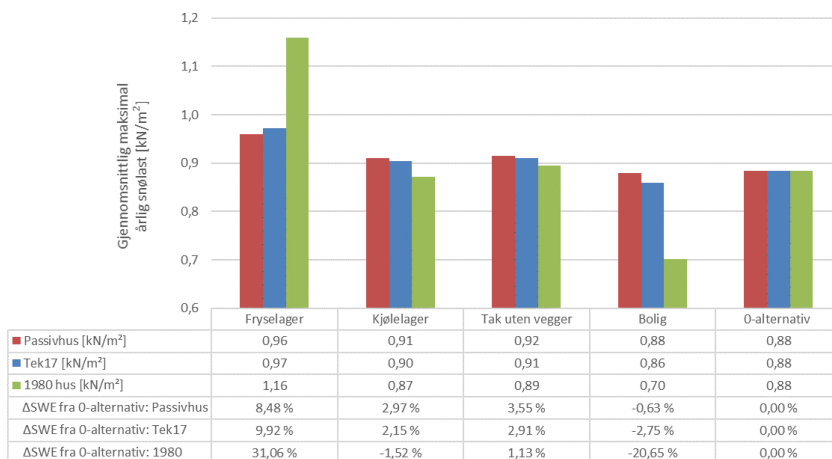
Innetemperatur 25 °C



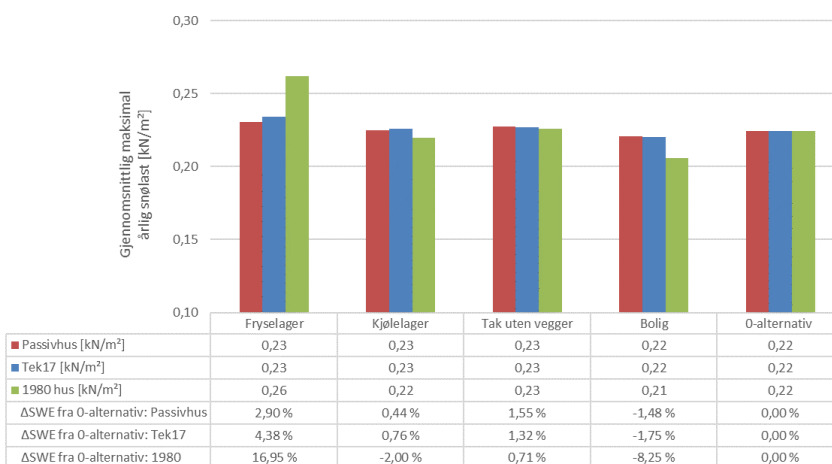
Figur 23. Korrelasjonsmatrisene.

4.2 SWE variasjoner

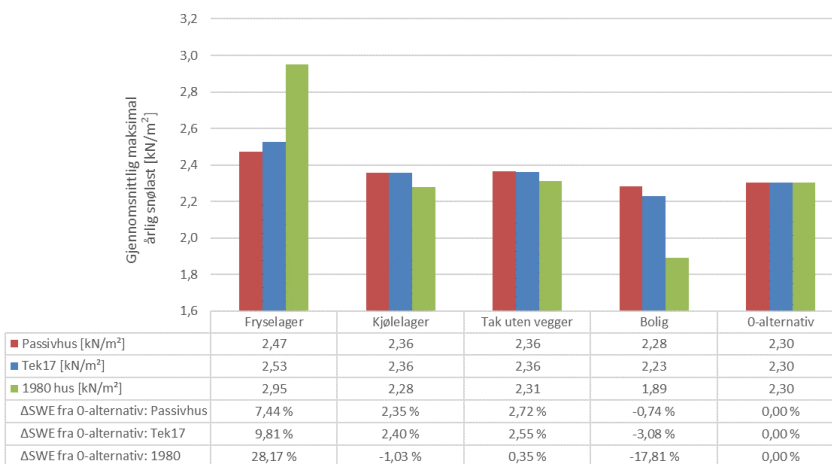
Figur 24 til Figur 26 viser hvordan den gjennomsnittlige maksimale årlige snølasten varierer mellom ulike bruksalternativer og taktyper for caseområdene. Alle år med snølast fra 1980 til 2020 er inkludert. Δ SWE viser til den prosentvise endringen i SWE sammenlignet med 0-alternativet.



Figur 24. Gjennomsnittlig maksimal årlig snølast – Oslo.



Figur 25. Gjennomsnittlig maksimal årlig snølast – Bergen.

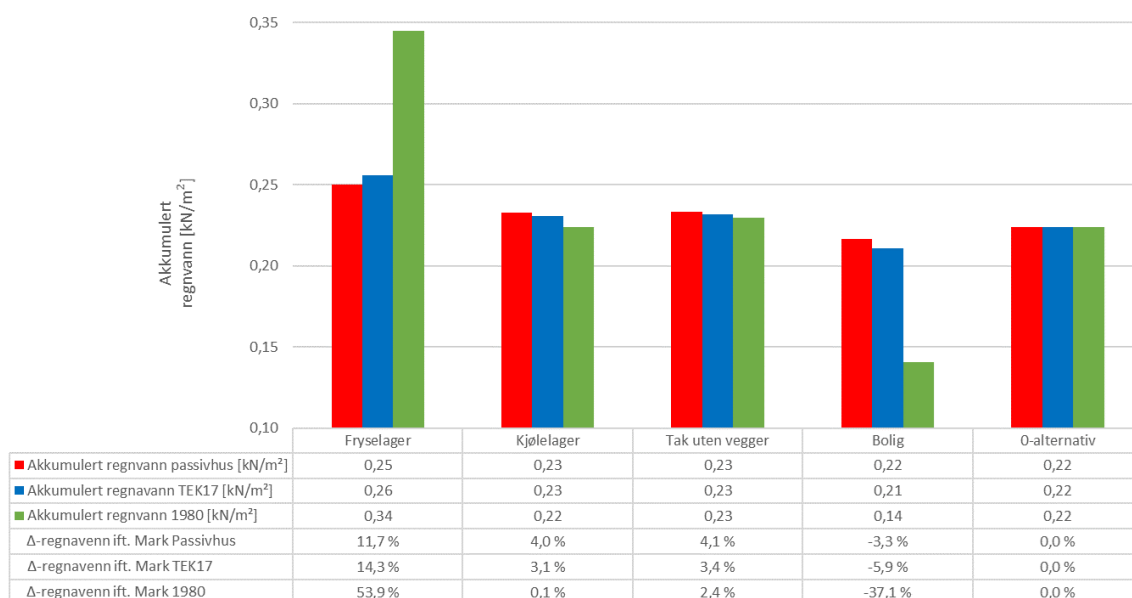


Figur 26. Gjennomsnittlig maksimal årlig snølast – Tromsø.

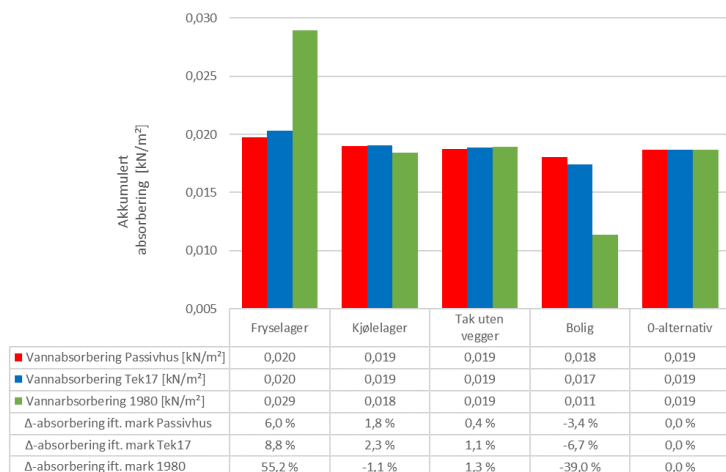
4.3 SWE påvirkning av regnvann

En grundigere analyse av regnvannets effekt på akkumulert SWE ble utført. Hensikt var å kartlegge eventuelle variasjoner mellom forskjellige bruksalternativer, taktyper og caseområder. Resultatene er presentert i Figur 27 til Figur 35. Den prosentvise endringen i akkumulert regnvann på tak er sammenlignet med mark, er uttrykt som Δ -regnvann. Siden marklasten inngår i beregningen av C_T (se formel 33) er det av interesse å vite hvordan akkumulert regnvann varierer mellom taklaster og marklaster. Tilsvarende blir den prosentvise forskjellen i fryst og absorbert regnvann mellom tak og mark uttrykt som hhv. Δ -absorbering og Δ -frysing.

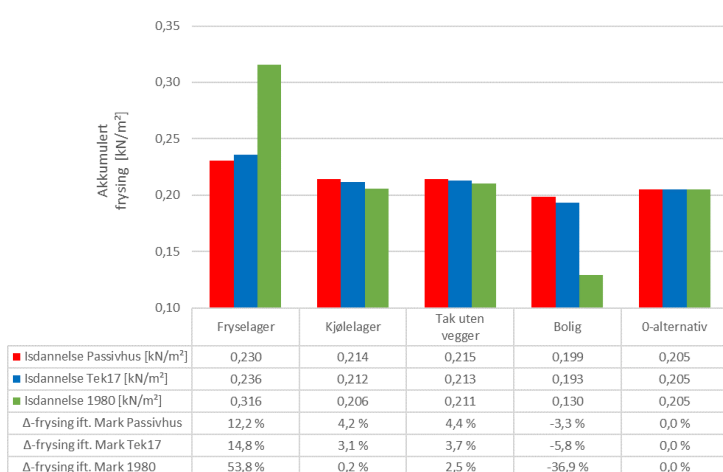
4.3.1 Oslo



Figur 27. Gjennomsnittlig regnvannandel i maksima SWE for Oslo.

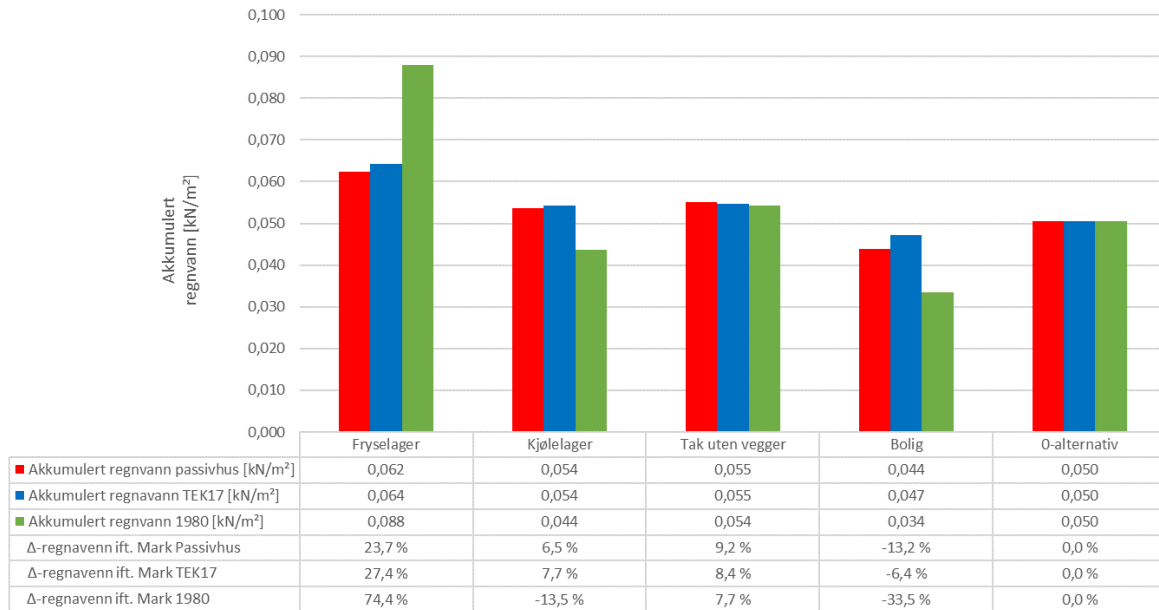


Figur 28. Gjennomsnittlig absorbert regnvannandel i maksimal SWE for Oslo.

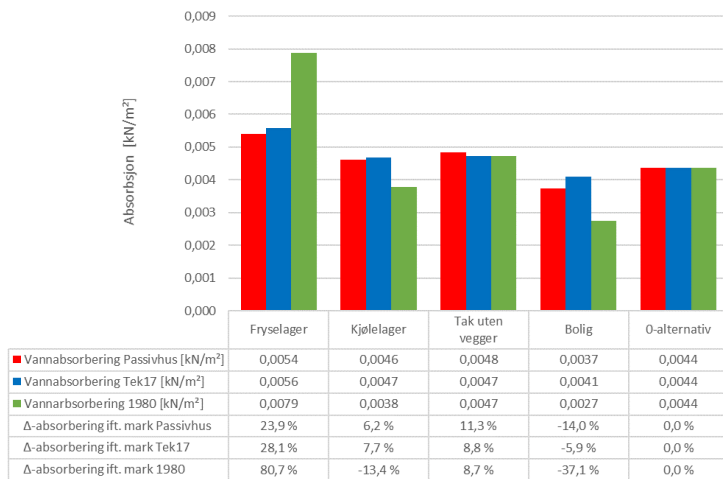


Figur 29. Gjennomsnittlig fryst regnvannandel i maksimal SWE for Oslo.

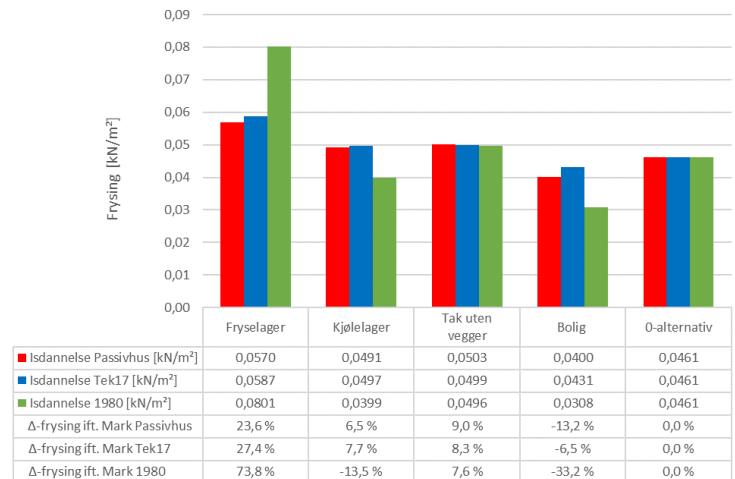
4.3.2 Bergen



Figur 30. Gjennomsnittlig regnvannandel i maksima SWE for Bergen.

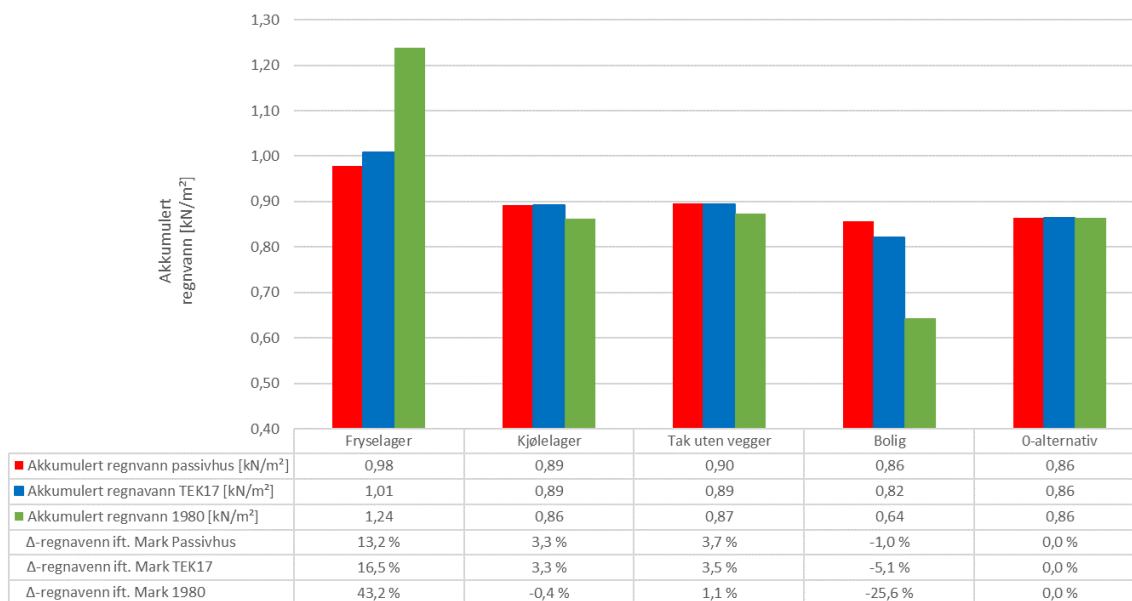


Figur 31. Gjennomsnittlig absorbert regnvannandel i maksimal SWE for Bergen.

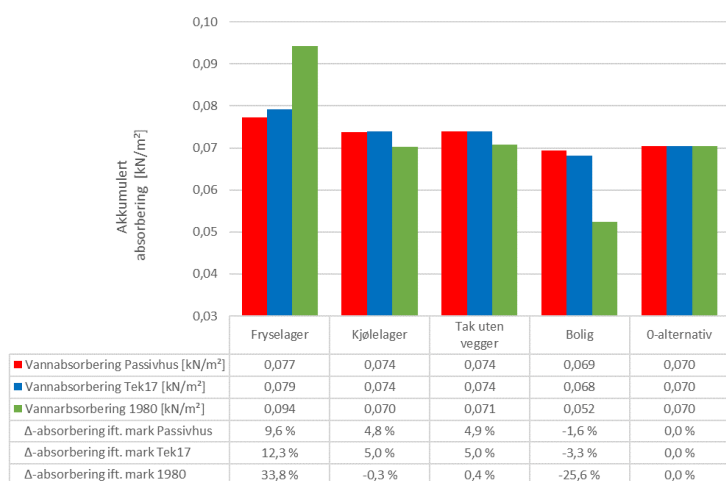


Figur 32. Gjennomsnittlig fryst regnvannandel i maksimal SWE for Bergen.

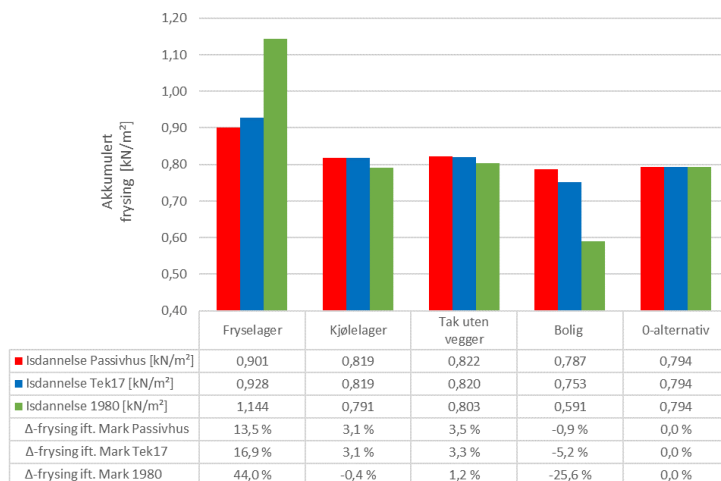
4.3.3 Tromsø



Figur 33. Gjennomsnittlig regnvannandel i maksima SWE for Tromsø.



Figur 34. Gjennomsnittlig absorbert regnvannandel i maksimal SWE for Tromsø.



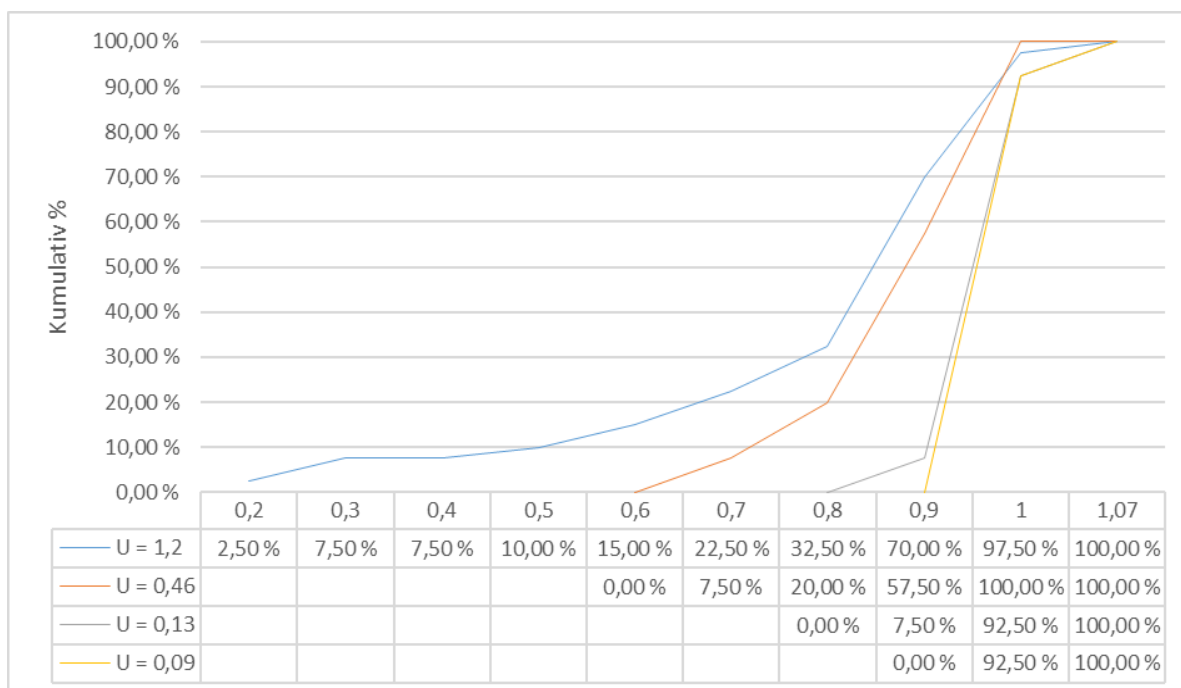
Figur 35. Gjennomsnittlig fryst regnvannandel i maksimal SWE for Tromsø.

4.4 C_{Tdim} faktorene

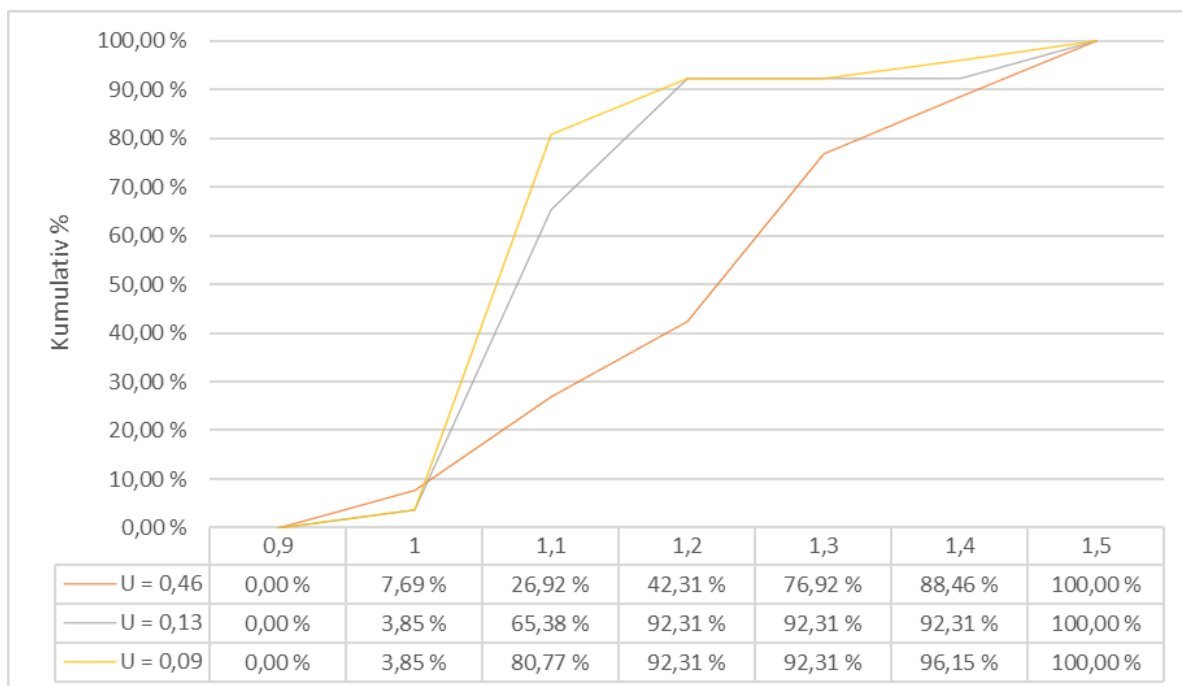
I dette kapittel presenteres de tabulerte C_{Tdim} verdene for hvert caseområde. Framgangsmåten for beregning av C_{Tdim} er beskrevet i kapittel 3.6. I tillegg er det utarbeidet tilsvarende tabeller for 10 ekstra områder i kapittel 5.

Innledningsvis i hvert delkapittel presenteres den kumulative prosentfordelingen av alle årlige C_T verdier for bruksalternativene bolig og fryselager. Årlige C_T verdier over 1,5 er ekskludert, og intervallbredden er satt lik 0,1. Stigningstallet beskriver frekvensen av årlige observerte C_T verdier, hvor høyere stigningstall tilsier flere observasjoner. Den «mest typiske» C_T verdien forekommer i intervallet med høyest stigningstall. Denne kunnskapen benyttes for å kontrollere hvorvidt majoriteten av årlige observerte C_T verdier er gjort over, under eller i samme intervall som beregnet C_{Tdim}. Avhengig av resultatet vil validiteten til dimensjonerende C_T enten svekkes eller styrkes.

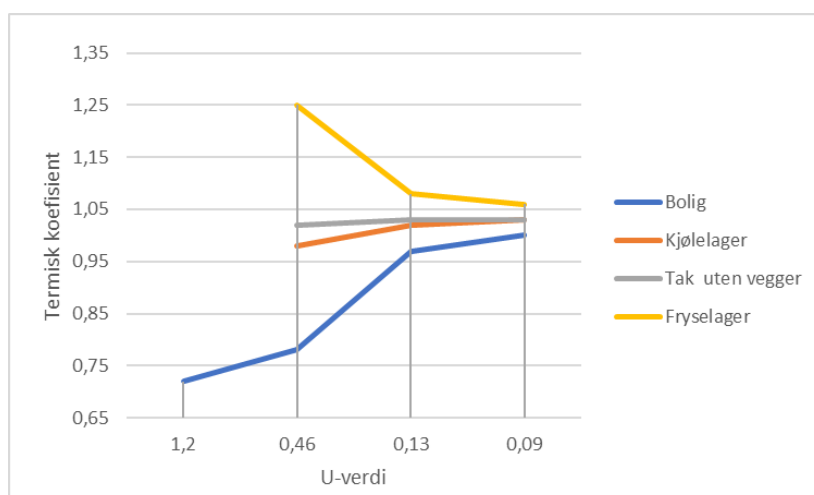
4.4.1 Oslo



Figur 36. Kumulativ prosent fordeling over årlige C_T verdier i Oslo: Bolig.



Figur 37. Kumulativ prosent fordeling over årlige C_T verdier i Oslo: Fryselager.

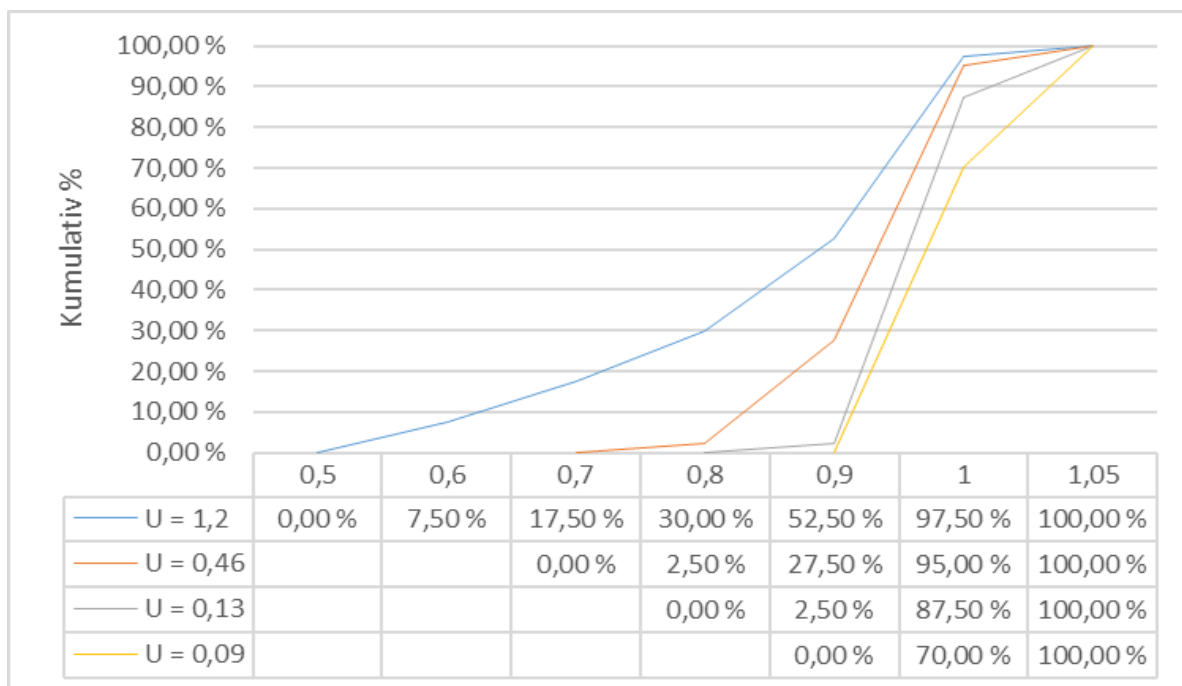


Figur 38. Variasjonen i C_{Tdim} mot taktype (U-verdi).

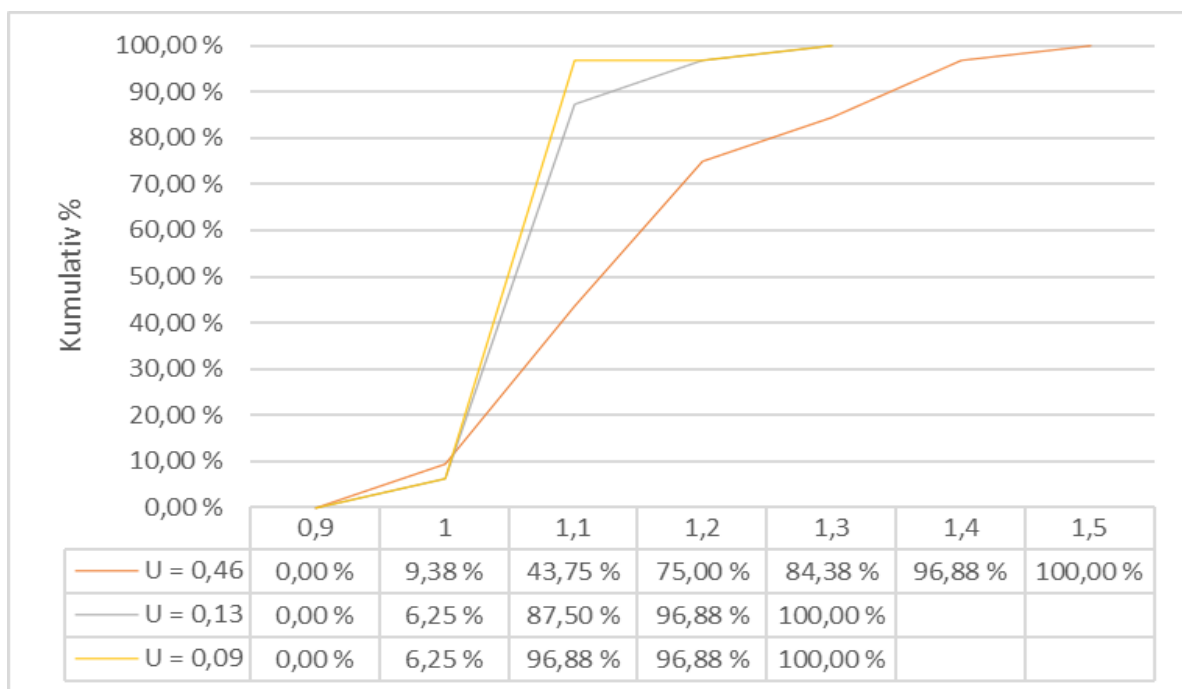
Tabell 12. C_{Tdim} for Oslo.

| Oslo | Fryselager [145,15K] | Kjølelager [277,15K] | Bolig [298,15K] | Tak uten vegger |
|--|-------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|
| Forskrift [U-verdi] | | | | |
| NS 3700 -- [0,09] | 1,06 | 1,03 | 1,0 | 1,03 |
| TEK17 -- [0,13] | 1,08 | 1,02 | 0,97 | 1,03 |
| Byggeforskrifter av 1.august 1969 -- [0,46] | 1,25 | 0,98 | 0,78 | 1,02 |
| Glasstak -- [1,2] | - | - | 0,72 | - |

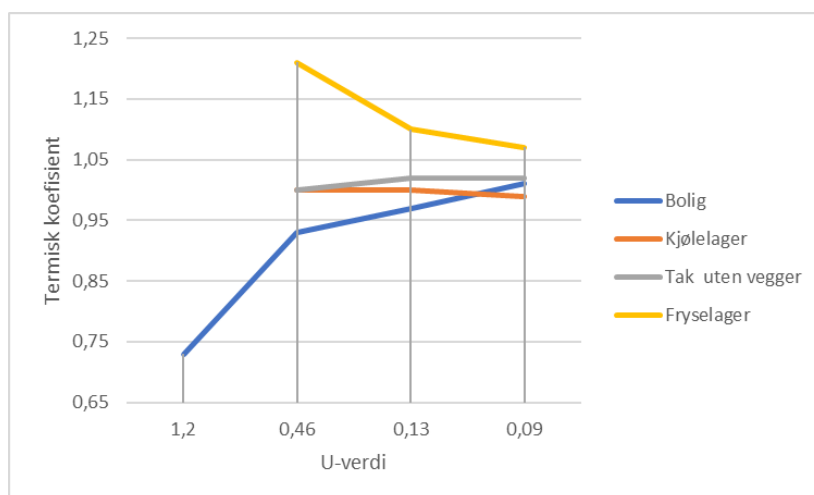
4.4.2 Bergen



Figur 39. Kumulativ prosent fordeling over årlige C_T verdier i Bergen: Bolig.



Figur 40. Kumulativ prosent fordeling over årlige C_T verdier i Bergen: Fryselager.

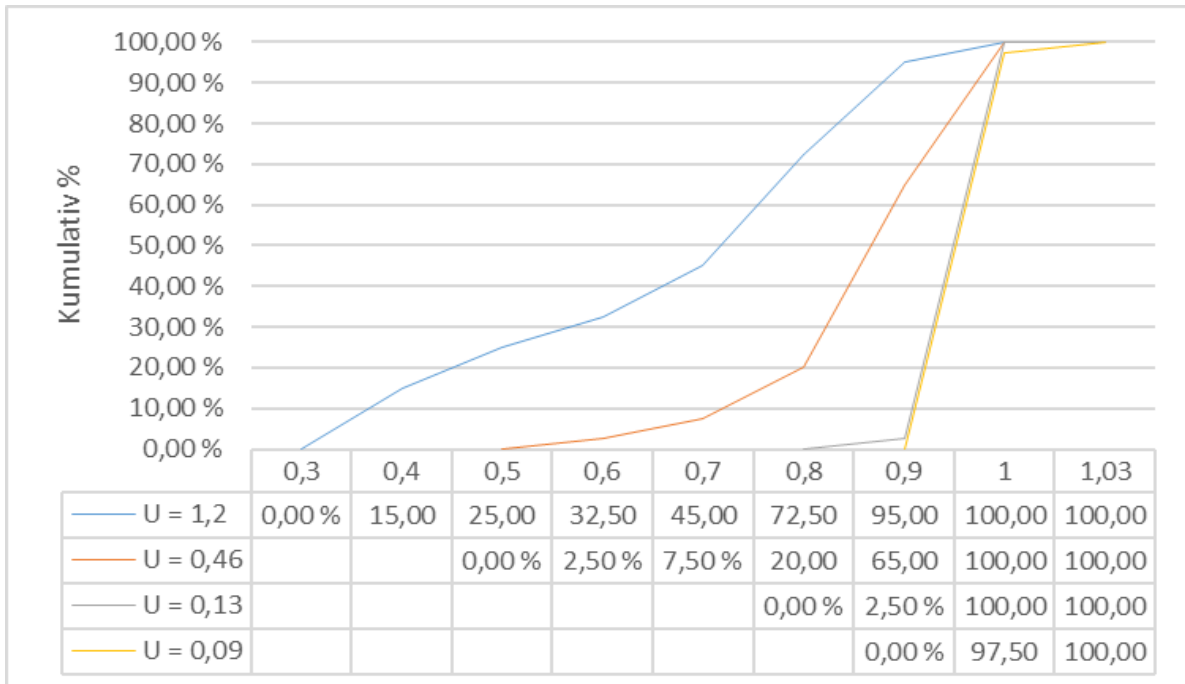


Figur 41. Variasjonen i C_{Tdim} mot taktype (U-verdi).

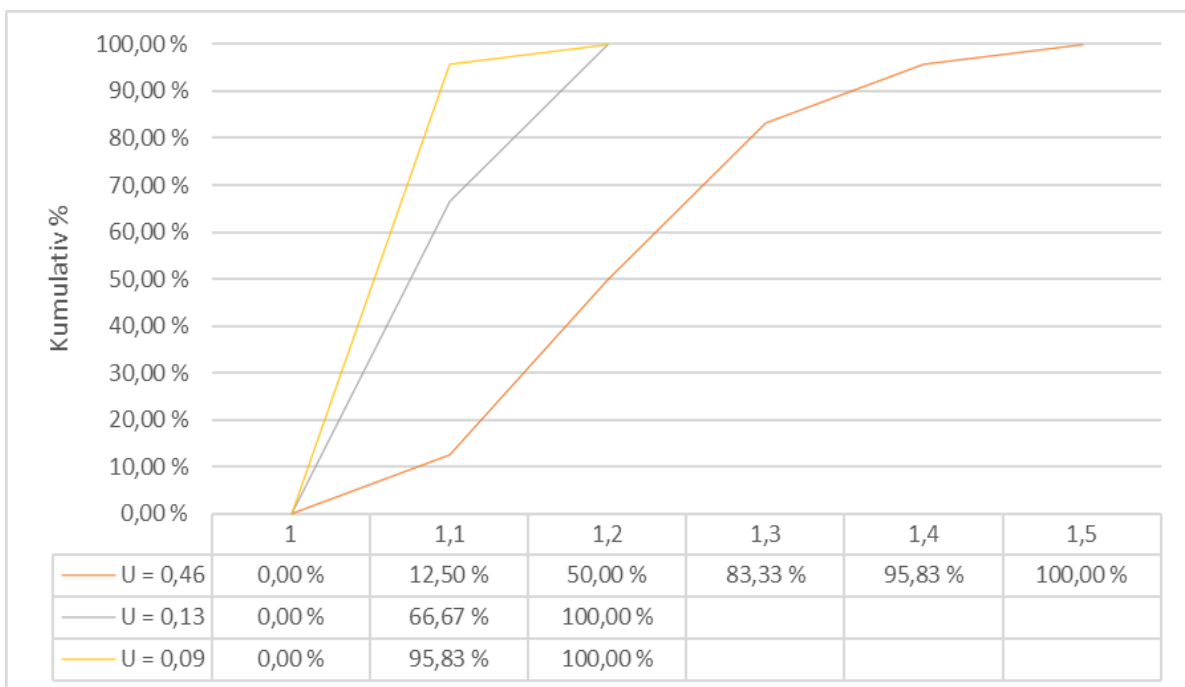
Tabell 13. C_{Tdim} for Bergen.

| Bergen | Fryselager [145,15K] | Kjølelager [277,15K] | Bolig [298,15K] | Tak uten vegger |
|--|-------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|
| Forskrift [U-verdi] | | | | |
| NS 3700 -- [0,09] | 1,07 | 0,99 | 1,01 | 1,02 |
| TEK17 -- [0,13] | 1,10 | 1,0 | 0,97 | 1,02 |
| Byggeforskrifter av 1.august 1969 -- [0,46] | 1,21 | 1,0 | 0,93 | 1 |
| Glasstak -- [1,2] | - | - | 0,73 | - |

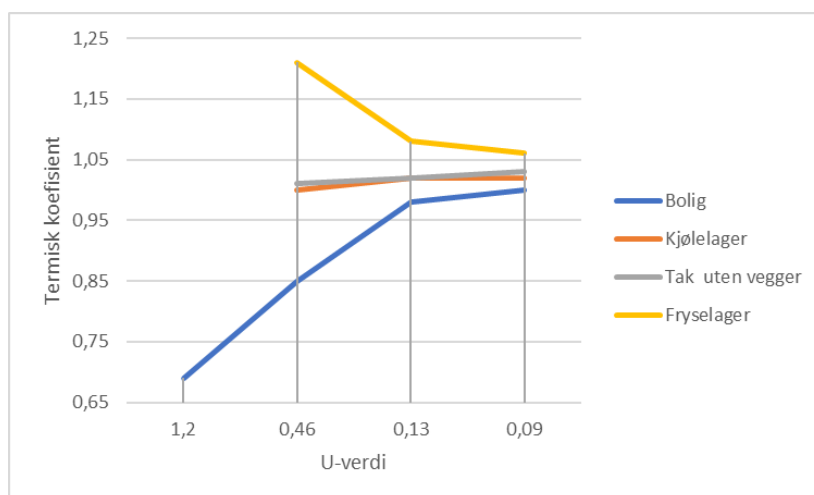
4.4.3 Tromsø



Figur 42. Kumulativ prosent fordeling over årlige C_T verdier i Tromsø: Bolig.



Figur 43. Kumulativ prosent fordeling over årlige C_T verdier i Tromsø: Fryselager.



Figur 44. Variasjonen i C_{Tdim} mot taktype (U-verdi).

Tabell 14. C_{Tdim} for Tromsø.

| Tromsø | Fryselager [145,15K] | Kjølelager [277,15K] | Bolig [298,15K] | Tak uten vegger |
|--|-------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|
| Forskrift [U-verdi] | | | | |
| NS 3700 -- [0,09] | 1,06 | 1,02 | 1,0 | 1,03 |
| TEK17 -- [0,13] | 1,08 | 1,02 | 0,98 | 1,02 |
| Byggeforskrifter av 1.august 1969 -- [0,46] | 1,21 | 1,0 | 0,85 | 1,01 |
| Glasstak -- [1,2] | - | - | 0,69 | - |

4.5 Regresjonsmodeller

I dette kapittelet presenteres ett sett med multiple regresjonsmodeller, konstruert for å predikere C_T koeffisientene. Værdata fra gyldige år i Oslo, Tromsø og Bergen er benyttet som uavhengige forklaringsvariabler i analysene. Det er til sammen laget 4 modeller, ett for hvert bruksalternativ. Modellene er gyldig for alle caseområder og alle taktyper. Modellens nøyaktighet avhenger av hvor godt de avhengige variablene samvarierer med øvrige uavhengige variabler, hvilket diskuteres videre i kapittel 6.

De aktuelle variablene som er benyttet i regresjonsanalysen er beskrevet i Tabell 11, gjengitt nedenfor. Av disse vil kun selekterte variabler og gyldige verdier bli benyttet i den endelige regresjonsmodellen. Selekeringsprosessen er beskrevet i kapittel 3.6.4.

Tabell 15. Selekterte variable for regresjonsanalysen.

| Symbol | Forklaring |
|------------------|---|
| U | Takets varmegjennomgangskoeffisient $\in [0.09, 1.2]$ |
| T | Middelverdi temperatur |
| $\Phi_{termisk}$ | Gjennomsnittlig termisk varmefluks gjennom taket |
| S_{max} | Maksimal marklast |

Takets U-verdi, utetemperaturen og den maksimale marklasten er verdier som er enkle å finne i forskjellige oppslagsverk. Den termiske varmefluksen gjennom taket må derimot beregnes i henhold til Fourier's lov, gitt temperaturdifferansen mellom snødekket på taket ($T_{snø}$) og innetemperaturen (T_{inne}):

$$\Phi_{termisk} = U_{verdi} * (T_{inne} - T_{snø}) \quad (34)$$

hvor,

$T_{snø}$ beregnes som funksjon av innetemperaturen, utetemperaturen og taket U-verdi, som vist på neste side. Funksjonsuttrykket er laget som en multippel regresjonsfunksjon av de modellerte snøtemperaturene i ESCIMO.

Forklaringsvariablene i Tabell 15 gjelder for tidsintervallet snø akkumulerer fra null til maks SWE på taket. Siden snø oftest akkumulerer samtidig på tak og mark, er det legitimt å benytte akkumuleringstiden for marklasten i fastsettelse av dette tidsintervallet. Akkumulasjonstiden for marklaster kan avleses Figur 21 for Tromsø og Bergen.

Den estimerte temperaturen til snø på tak kan beregnes etter følgende formel:

| Gyldighets- område | Multipel regresjons funksjon | Justert R-verdi |
|--------------------------|--|-----------------|
| Oslo Bergen Tromsø | $\widehat{T}_{snø} = -6,08 + 0,007T_{inne} + 0,916U + 1,01T_{ute}$ | 0,97 |

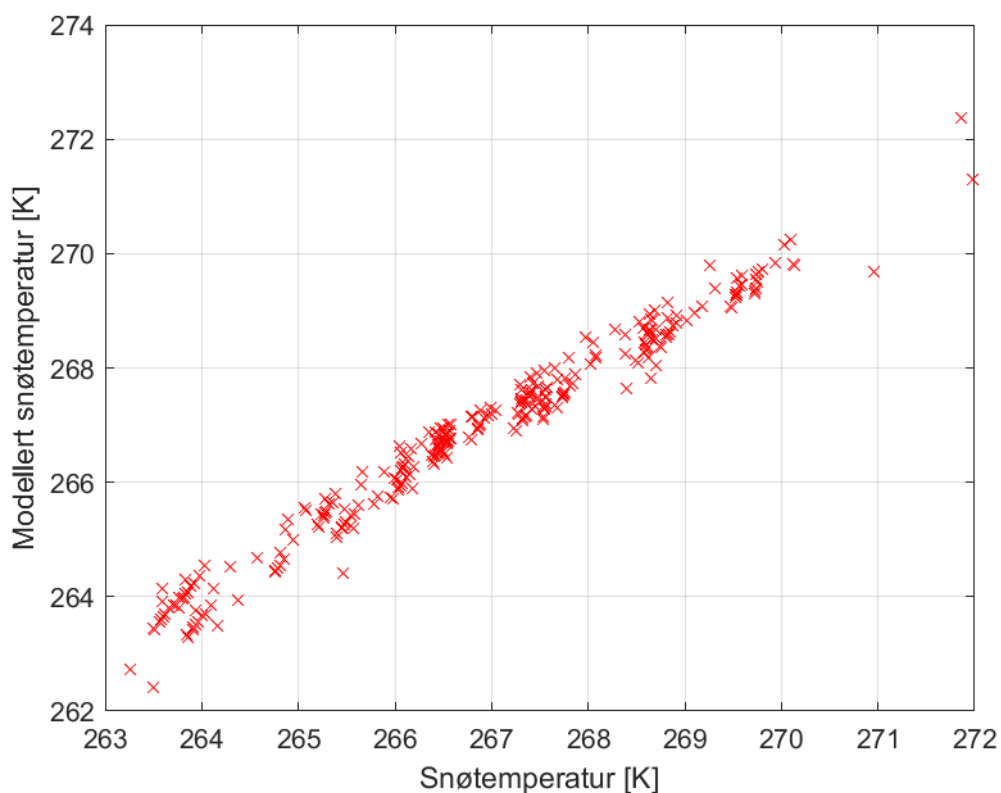
hvor,

$\widehat{T}_{snø}$ = Predikert gjennomsnittlig snøtemperatur [K]

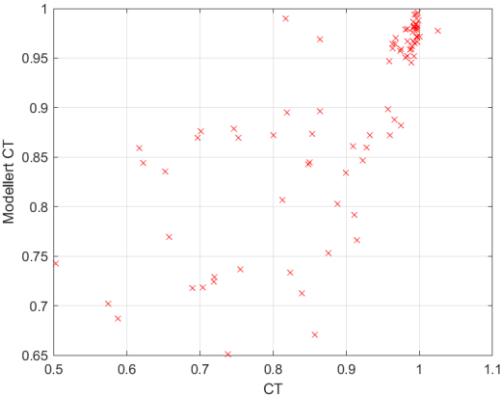
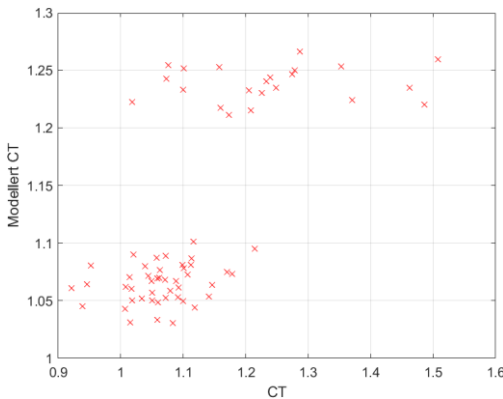
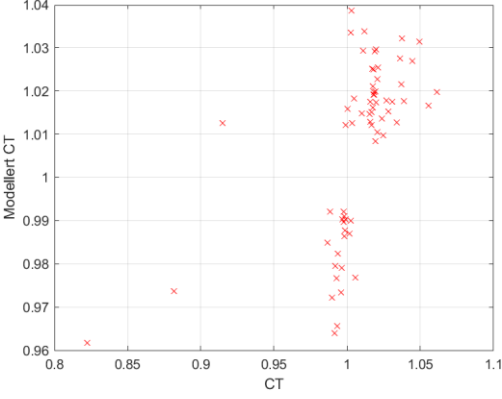
U = Takets varmegjennomgangskoeffisient [W/m^2K]

T_{ute} = Gjennomsnittlig utvendig lufttemperatur [K]

T_{inne} = Gjennomsnittlig innvendig lufttemperatur [K]



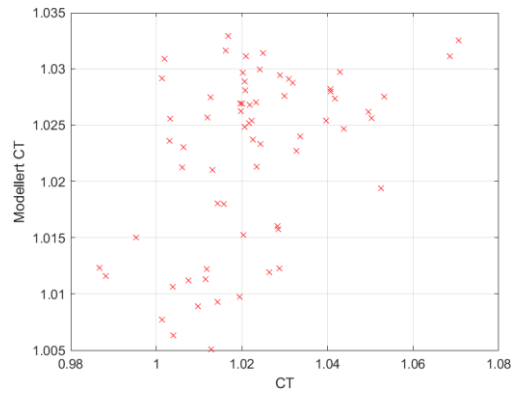
Figur 45. Modellert snøtemperatur mot virkelig snøtemperatur. En R-verdi på 0,97 indikerer høy tilpasning mellom data og trendlinje.

| Bruksalternativ | Multippel regresjonsmodell for estimering av C_T | Justert R-verdi |
|--|--|-----------------|
| Bolig | $\widehat{C_T} = 1,07 - 1,3\sqrt{U} + 0,18\sqrt{\Phi_{termisk}}$ | 0,57 |
|  | | |
| Fryselager | $\widehat{C_T} = -1,0025 + 0,42U + 0,008T - 0,003\Phi_{termisk} - 0,0006S_{max}$ | 0,43 |
|  | | |
| Kjølelager | $\widehat{C_T} = 1,003 - 0,011\Phi_{termisk} + 0,02S_{max}$ | 0,34 |
|  | | |

Tak uten
vegger

$$\widehat{CT} = 0,62 + 1,5 * 10^{-3}T - 0,027\Phi_{termisk}$$

0,18



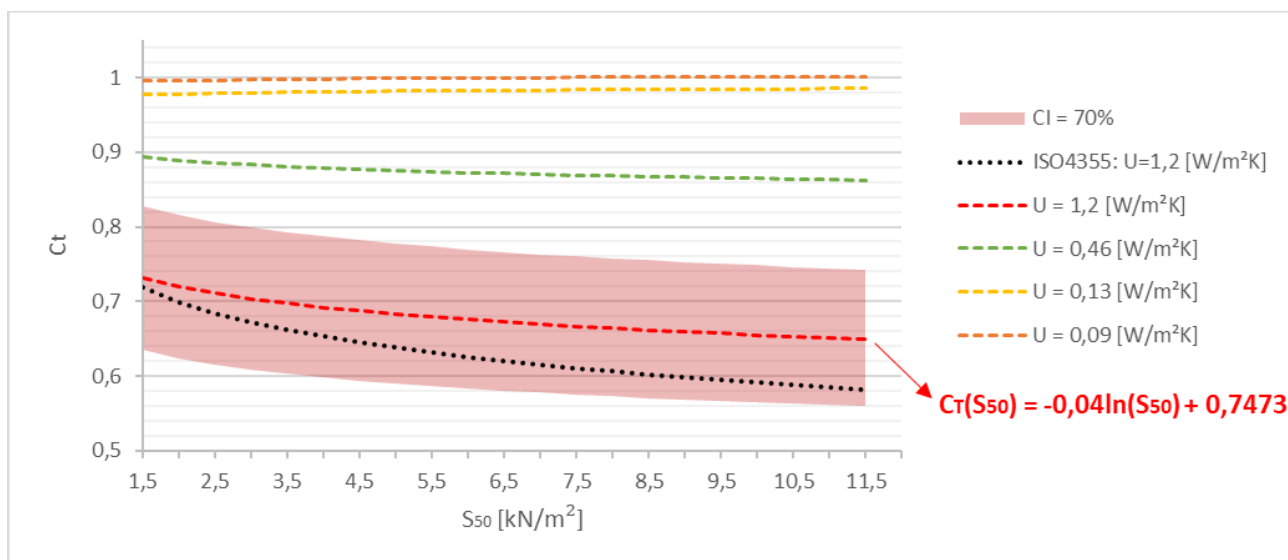
4.6 Variasjon av C_T mot marklast

I ISO4355 benyttes den karakteristiske marklasten som eneste variabel for å differensiere mellom klimatiske forskjeller i C_T . I dette kapittelet blir de modellerte C_T verdiene sammenlignet med samme variabel. Figurene er frembrakt på bakgrunn av de modellerte C_T verdiene fra kapittel 5 og de representative 50-års lastene (S_{50}) for hvert område. S_{50} er beregnet i samsvar med framgangsmåten beskrevet i kapittel 3.6.2 og listet i Tabell 17. Fra Tabell 16 framkommer det at differansen mellom modellert S_{50} og karakteristisk snølast kan være stor, hvilket blir videre diskutert i kapittel 6.

Figur 46 til Figur 49 viser den logaritmiske regresjonslinjen for ulike taktyper (U-verdier) og bruksalternativer. De faktiske C_T verdiene varierer mye utover modellens estimat, som vist ved store konfidensintervaller. Dette diskuteres vider i kapittel 6.

Tabell 16. 5 års returlaster, 50 års returlaster og karakteristiske snølaste.

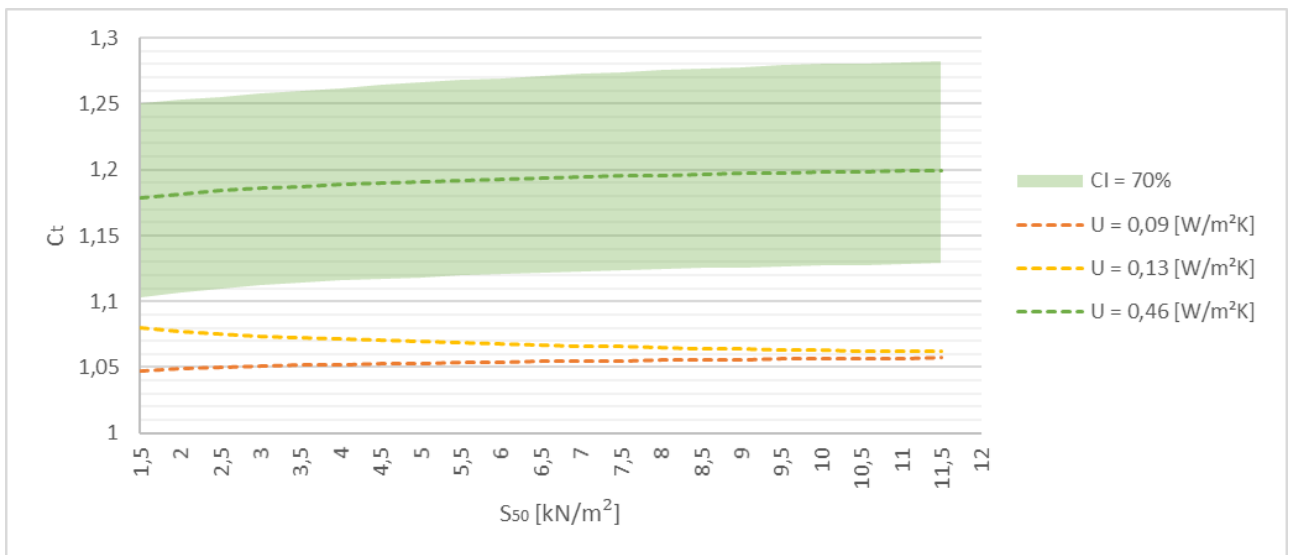
| Caseområde | S_5 [kN/m ²] | S_{50} [kN/m ²] | S_k [kN/m ²] |
|------------|----------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| Oslo | 1,4 | 2,7 | 3,5 – 6,5 |
| Bergen | 0,4 | 0,7 | 2,0 |
| Tromsø | 3,2 | 5,5 | 6,0 |



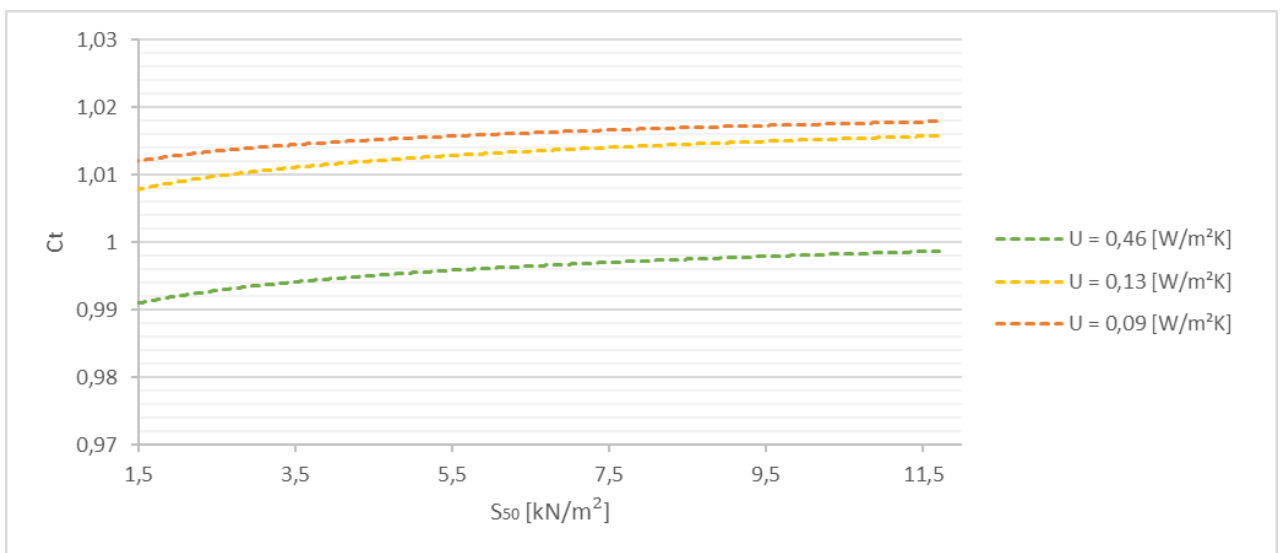
Figur 46. Logaritmisk regresjon ($C_T - S_{50}$) for innetemperatur = 25°C og takvinkel = 0°. Området markert i rødt representerer spredningen av modellerte C_T -faktorer for U-verdi = 1,2.

Regresjonsuttrykk for C_T for boligbygg med glasstak (U=1,2):

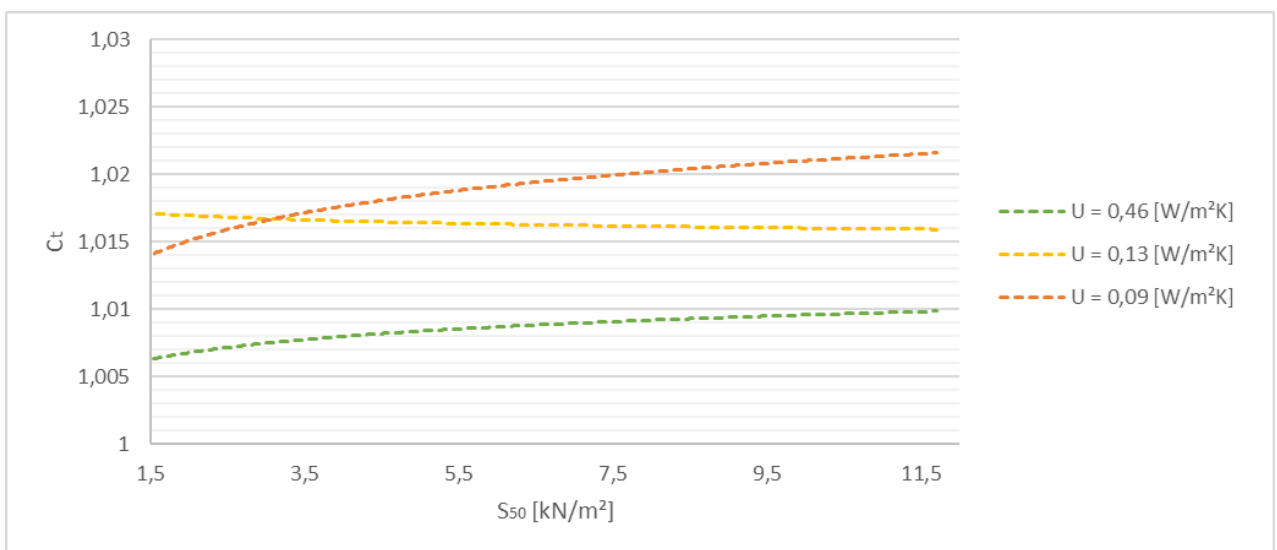
$$C_T(S_{50}) = -0,04 \ln(S_{50}) + 0,7473 \quad (35)$$



Figur 47. Logaritmisk regresjon ($C_t - S_{50}$) for innetemperatur = -28°C og takvinkel = 0° . Området markert i grønt representerer spredningen av modellerte C_T -faktorer for U -verdi = 0,46.



Figur 48. Logaritmisk regresjon ($C_t - S_{50}$) for innetemperatur = 4°C og takvinkel = 0° .



Figur 49. Logaritmisk regresjon ($C_t - S_{50}$) for innetemperatur = utetemperatur og takvinkel = 0° .

5 Øvrige C_{Tdim} faktorer

I dette kapittelet presenteres de øvrige C_{Tdim} koeffisientene for 10 ekstra områder, ni i Norge og ett i utlandet. Alle C_{Tdim} koeffisientene er frambrakt i samsvar med metoden beskrevet i kapittel 3.6. Verdiene i parentes () representerer dagens krav til C_T i henhold til ISO4355 for $U = 1.2$ og modellerte 50-års laster.

| Trondheim | Fryselager [145,15K] | Kjølelager [277,15K] | Bolig [298,15K] | Tak uten vegger |
|--|-------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|
| Forskrift [U-verdi] | | | | |
| NS 3700 -- [0,09] | 0,98 | 0,98 | 0,98 | 0,98 |
| TEK17 -- [0,13] | 1,05 | 0,98 | 0,94 | 1,01 |
| Byggeforskrifter av 1.august 1969 -- [0,46] | 1,24 | 0,99 | 0,74 | 0,96 |
| Glasstak -- [1,2] | - | - | 0,60 (0,72) | - |

| Kristiansand | Fryselager [145,15K] | Kjølelager [277,15K] | Bolig [298,15K] | Tak uten vegger |
|--|-------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|
| Forskrift [U-verdi] | | | | |
| NS 3700 -- [0,09] | 1,06 | 1,02 | 1,0 | 1,02 |
| TEK17 -- [0,13] | 1,08 | 1,01 | 0,98 | 1,02 |
| Byggeforskrifter av 1.august 1969 -- [0,46] | 1,12 | 0,99 | 0,93 | 1,01 |
| Glasstak -- [1,2] | - | - | 0,82 (0,73) | - |

| Lillehammer | Fryselager [145,15K] | Kjølelager [277,15K] | Bolig [298,15K] | Tak uten vegger |
|--|-------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|
| Forskrift [U-verdi] | | | | |
| NS 3700 -- [0,09] | 1,04 | 1,01 | 0,99 | 1,02 |
| TEK17 -- [0,13] | 1,05 | 1,01 | 0,98 | 1,02 |
| Byggeforskrifter av 1.august 1969 -- [0,46] | 1,15 | 0,99 | 0,90 | 1,01 |
| Glasstak -- [1,2] | - | - | 0,65 (0,66) | - |

| Geilo | Fryselager [145,15K] | Kjølelager [277,15K] | Bolig [298,15K] | Tak uten vegger |
|--|-------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|
| Forskrift [U-verdi] | | | | |
| NS 3700 -- [0,09] | 1,05 | 1,01 | 1,0 | 1,01 |
| TEK17 -- [0,13] | 1,05 | 1,01 | 0,99 | 1,01 |
| Byggeforskrifter av 1.august 1969 -- [0,46] | 1,14 | 1,0 | 0,90 | 1,0 |
| Glasstak -- [1,2] | - | - | 0,64 (0,63) | - |

| Karasjok | Fryselager [145,15K] | Kjølelager [277,15K] | Bolig [298,15K] | Tak uten vegger |
|--|-------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|
| Forskrift [U-verdi] | | | | |
| NS 3700 -- [0,09] | 1,09 | 1,02 | 0,99 | 1,03 |
| TEK17 -- [0,13] | 1,11 | 1,02 | 0,97 | 1,03 |
| Byggeforskrifter av 1.august 1969 -- [0,46] | 1,20 | 0,98 | 0,86 | 1,01 |
| Glasstak -- [1,2] | - | - | 0,65 (0,70) | - |

| Hammerfest | Fryselager [145,15K] | Kjølelager [277,15K] | Bolig [298,15K] | Tak uten vegger |
|--|-------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|
| Forskrift [U-verdi] | | | | |
| NS 3700 -- [0,09] | 1,03 | 1,02 | 1,0 | 1,0 |
| TEK17 -- [0,13] | 1,04 | 1,01 | 1,0 | 1,0 |
| Byggeforskrifter av 1.august 1969 -- [0,46] | 1,14 | 1,0 | 0,93 | 1,02 |
| Glasstak -- [1,2] | - | - | 0,69 (0,64) | - |

| Ås | Fryselager [145,15K] | Kjølelager [277,15K] | Bolig [298,15K] | Tak uten vegger |
|--|-------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|
| Forskrift [U-verdi] | | | | |
| NS 3700 -- [0,09] | 1,09 | 1,04 | 1,0 | 1,03 |
| TEK17 -- [0,13] | 1,15 | 1,02 | 0,98 | 1,03 |
| Byggeforskrifter av 1.august 1969 -- [0,46] | 1,33 | 0,99 | 0,88 | 1,02 |
| Glasstak -- [1,2] | - | - | 0,64 (0,71) | - |

| Ålesund | Fryselager [145,15K] | Kjølelager [277,15K] | Bolig [298,15K] | Tak uten vegger |
|--|-------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|
| Forskrift [U-verdi] | | | | |
| NS 3700 -- [0,09] | 1,06 | 1,01 | 1,0 | 1,01 |
| TEK17 -- [0,13] | 1,08 | 1,01 | 0,99 | 1,01 |
| Byggeforskrifter av 1.august 1969 -- [0,46] | 1,16 | 1,0 | 0,96 | 1,01 |
| Glasstak -- [1,2] | - | - | 0,87 (0,71) | - |

| Mo i rana | Fryselager [145,15K] | Kjølelager [277,15K] | Bolig [298,15K] | Tak uten vegger |
|--|-------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|
| Forskrift [U-verdi] | | | | |
| NS 3700 -- [0,09] | 1,04 | 1,01 | 1,0 | 1,02 |
| TEK17 -- [0,13] | 1,05 | 1,01 | 0,99 | 1,01 |
| Byggeforskrifter av 1.august 1969 -- [0,46] | 1,17 | 1,0 | 0,91 | 1,01 |
| Glasstak -- [1,2] | - | - | 0,74 (0,55) | - |

| Amsterdam | Fryselager [145,15K] | Kjølelager [277,15K] | Bolig [298,15K] | Tak uten vegger |
|--|-------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|
| Forskrift [U-verdi] | | | | |
| NS 3700 -- [0,09] | 1,01 | 1,01 | 0,98 | 1,0 |
| TEK17 -- [0,13] | 1,07 | 1,0 | 0,98 | 1,01 |
| Byggeforskrifter av 1.august 1969 -- [0,46] | 1,11 | 0,98 | 0,97 | 1,01 |
| Glasstak -- [1,2] | - | - | 0,88 (0,85) | - |

| Oslo (Caseområde) | Fryselager [145,15K] | Kjølelager [277,15K] | Bolig [298,15K] | Tak uten vegger |
|--|-------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|
| Forskrift [U-verdi] | | | | |
| NS 3700 -- [0,09] | 1,06 | 1,03 | 1,0 | 1,03 |
| TEK17 -- [0,13] | 1,08 | 1,02 | 0,97 | 1,03 |
| Byggeforskrifter av 1.august 1969 -- [0,46] | 1,25 | 0,98 | 0,78 | 1,02 |
| Glasstak -- [1,2] | - | - | 0,72 (0,69) | - |

| Bergen (Caseområde) | Fryselager [145,15K] | Kjølelager [277,15K] | Bolig [298,15K] | Tak uten vegger |
|--|-------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|
| Forskrift [U-verdi] | | | | |
| NS 3700 -- [0,09] | 1,07 | 0,99 | 1,01 | 1,02 |
| TEK17 -- [0,13] | 1,10 | 1,0 | 0,97 | 1,02 |
| Byggeforskrifter av 1.august 1969 -- [0,46] | 1,21 | 1,0 | 0,93 | 1 |
| Glasstak -- [1,2] | - | - | 0,73 (0,77) | - |

| Tromsø (Caseområde) | Fryselager [145,15K] | Kjølelager [277,15K] | Bolig [298,15K] | Tak uten vegger |
|--|-------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|
| Forskrift [U-verdi] | | | | |
| NS 3700 -- [0,09] | 1,06 | 1,02 | 1,0 | 1,03 |
| TEK17 -- [0,13] | 1,08 | 1,02 | 0,98 | 1,02 |
| Byggeforskrifter av 1.august 1969 -- [0,46] | 1,21 | 1,0 | 0,85 | 1,01 |
| Glasstak -- [1,2] | - | - | 0,69 (0,63) | - |

Tabell 17. Modellerte S_{50} for øvrige analyseområder.

| Område | S_{50} [kn/m²] |
|---------------|---|
| Amsterdam | 0,128 |
| Bergen | 0,698 |
| Kristiansand | 1,4 |
| Trondheim | 1,58 |
| Ås | 1,77 |
| Ålesund | 1,898 |
| Karasjok | 2,07 |
| Oslo | 2,655 |
| Lillehammer | 3,793 |
| Hammerfest | 4,687 |
| Geilo | 5,03 |
| Tromsø | 5,535 |
| Mo i rana | 11,7 |

6 Diskusjon

I diskusjonskapittelet blir resultatene fra kapittel 4 og 5 analysert og drøftet. Kapittelet er delt inn i underkapitler, organisert i forhold til forskningsspørsmålene stilt innledningsvis i oppgaven. Kapitlene henviser til relevant teori og relevante resultater i besvarelsen av hvert forskningsspørsmål, og avslutter med en oppsummering av de viktigste betraktningene.

6.1 Effekten klimatiske variable har på akkumulert SWE

I dette delkapittelet besvares forskningsspørsmål 1:

- Hvilke klimatiske faktorer har den største innflytelsen på akkumulert snømengde på et tak, og hvordan påvirker disse faktorene C_T verdien?

Kapittelet forsøker å svare ut forskningsspørsmålet ved hjelp av korrelasjonsanalysene i kapittel 4.1, i tillegg til analysene av maksimal SWE i kapittel 4.2 og akkumulert regnvann i kapittel 4.3. Korrelasjonsanalysene ble benyttet for å kartlegge hvordan de klimatiske faktorene samvarierte med C_T og modellerte snølaster. På bakgrunn av disse resultatene ble det valgt å gjøre en grundigere analyse av hvordan akkumulert flytende nedbør påvirker C_T .

6.1.1 Korrelasjonsanalysene

Som vist i Figur 23 har både fast og flytende nedbør høy korrelasjon med akkumulert SWE. Fast nedbør adderes direkte til SWE, mens flytende nedbør adderes til SWE dersom snødekket har tilgjengelig absorpsjonskapasitet. Ettersom absorpsjonskapasiteten er uttrykt som en prosentandel av fast SWE (se formel 20), vil en økning i fast nedbør også øke absorpsjonspotensialet. Ergo kan områder med mye snø få ekstra høye snølaster gjennom absorbert regnvann. Mengden absorbert regnvann er også sterkt avhengig av snødekkets energibalanse, gjennom effekten energibalansen har på frysing av vann og smelting av snø. Snødekkets energibalanse avhenger blant annet av bygningens innetemperatur.

C_T og flytende nedbør korrelerer sterkest for bygg med lav innetemperatur. Årsaken er at lave innetemperaturer bidrar til å redusere snødekkets energibalanse og temperatur på taket gjennom økt negativ varmekraft. Lavere energibalanse øker samtidig gjenfrysingen av absorbert regnvann, som vist i formel 17 på side 20. Fra termodynamikkens 2. lov vet vi at materialer i ett lukket system alltid vil forsøke å oppnå termisk likevekt gjennom varmeoverføring fra varme til kalde områder. Siden vann alltid har høyere temperatur enn is, betyr dette at det absorberte

regnvannet i et snødekke vil overføre varmeenergi til omkringliggende snøkrystaller. I tillegg vil fryst regnvann tilegnes absorberende egenskaper, hvilket øker snødekkets totale absorpsjonspotensiale ytterligere. I motsetning til snødekket på taket, vil mindre regnvann fryse i et snødekke på bakkeplan, ettersom den induserte jordvarmen bidrar til å øke snødekkets energibalanse. Av den grunn vil snølasten på tak over fryselaagre øke mer enn tilsvarende marklasten. Dette gjør at C_T verdien øker.

Videre ser vi at vind og C_T korrelerer positivt for bygg med lav innetemperatur. Med andre ord øker forskjellene i snølast mellom tak og mark når vindstyrken øker. Årsaken er at den utvendige varmeovergangsmotstanden (R_{se}) reduseres ved høye vindhastigheter, hvilket øker varmetransporten mellom snødekket og uteluften. I kombinasjon med stigende utetemperaturer, gir dette ekvivalent høyere snøtemperaturer. For snø på tak over fryselaagre, vil snødekkets temperaturøkning derimot motvirkes av økt negativ varmefluks gjennom taket. Ifølge Fourier's lov, er varmefluksen i faste materialer proporsjonal med temperaturforskjellen mellom varm og kald side. Ergo blir snødekkets energibalanse på taket tilnærmet uendret. På bakkeplan vil jordvarmen bidra til ytterligere oppvarming av snødekket, hvilket øker snødekkets energibalanse. Denne forskjellen i energibalanse gjør at taklastene blir større enn marklastene, hvilket gir en økning i C_T . Vi kan derfor konkludere med at vind har en signifikant effekt på C_T for fryselaagre. For konstruksjoner med høy innetemperatur er samvariasjon mellom vind og C_T liten.

For fryselaagene kan vi se at kortbølget stråling (direkte sollys) korrelerer negativt med C_T . Det vil si at C_T faktoren reduseres når strålingsintensiteten øker. Denne sammenhengen er mindre intuitiv, ettersom økt strålingsintensitet i seg selv ikke burde føre til at snø smelter forttere på taket over et fryselaager enn på bakken. Derimot kan scenarioet forklares gjennom sene vintre. For vintersesonger karakterisert av sen snøakkumulasjon vil den totale akkumulasjonstiden ofte være betraktelig kortere enn vanlig. Dette gir for det første lavere snølasten. For det andre øker intensiteten av kortbølget stråling mot slutten av vintersesongen, hvilket gir mer akkumulert stråling i tidsintervallet hvor snø akkumulerer. Dette kan forklare hvorfor intensiteten av kortbølget stråling og C_T ser ut til å være positivt korrelert for fryselaagre.

C_T og langbølget stråling fra jorden (varmestråling) har også en sterk positiv korrelasjon. Intensiteten av langbølget stråling er normalt størst ved overskyet vær. Skyer fungerer som isolatorer i atmosfæren, som hjelper til med å fange varmeenergi nedenfra, på lik linje som et drivhus. Fra korrelasjonsanalysene ser vi også at økt strålingsintensitet normalt gir høyere

utetemperaturer, men samtidig ser vi også at snølastene øker. Dette er fordi skyer også genererer nedbør, og akkumulert nedbør er som tidligere beskrevet veldig sterkt positivt korrelert med både maksimal SWE og C_T . I tillegg framkommer det fra korrelasjonsmatrisene at vind er positivt korrelert med langbølget stråling, og fra tidligere analyser vet vi at vind kan føre til høyere C_T faktorer gjennom lavere R_{se} . Den observerte korrelasjonen mellom langbølget stråling og C_T kan derfor ikke sies å være kausal. Derimot er langbølget stråling en konfunderende variabel til både C_T , nedbør og vind.

Den relative luftfuktigheten er positivt korrelert med C_T for fryselaer i Tromsø og Bergen. Årsaken til dette kan være at snødekkets resublimasjon øker. Resublimasjon er det motsatte av sublimasjonen, og beskriver prosessen hvor et stoff går direkte fra gass til fast form, uten dannelsen av væske. Iver Frimannslund beskriver i sin masteroppgave hvordan snødekkets temperaturgradient og fuktighetsgradient kan benyttes som indikasjonsparametere for når sublimasjon oppstår. Større gradientverdier indikerer normalt høyere sublimasjon. Ifølge kapittel 2.3.5 er gradientverdiene størrelse avhengig av temperaturdifferensen og fuktighetsdifferansen på hver side av snødekket. Siden tak over fryselaer har relativt lav overflatetemperatur, og snø har svært lav varmekonduktivitet, skapes en høy temperaturgradient over snødekket. I tillegg vil en lav overflatetemperatur gi lav fuktighet i snøen nærmest takoverflaten. For områder med høy relativ luftfuktighet vil derfor fuktighetsgradienten over snødekket også være stor. Kombinasjonen av høy fuktighets- og temperaturgradienten gjør at resublimasjonen øker. For snø på bakken vil derimot resublimasjonen være lav, grunnet den induserte jordvarmen. Disse forskjellene i akkumulert resublimasjon på tak og mark kan forklare hvorfor C_T er positivt korrelert med luftfuktigheten.

Tabell 18 nedenfor viser hvilke meteorologiske variabler som synes å ha størst innvirkning på de årlige C_T verdiene, samt den graderte styrken på forholdet.

Tabell 18. korrelerende variable med C_T og tilhørende korrelasjonsstyrke. St = sterk, M = medium, Sv = svak

| Bergen | | Oslo | | Tromsø | |
|--------------------------|----------------------------|---------------------|---------------------------------|----------------------------|----------------------|
| Bolig | Fryselager | Bolig | Fryselager | Bolig | Fryselager |
| Vind (Sv) | Temperatur (M) | Flytende nedbør (M) | Flytende nedbør (konfunderende) | Temperatur (M) | Vind (St) |
| Kortbølget stråling (Sv) | Flytende nedbør (St) | Fast nedbør (Sv) | Fast nedbør (konfunderende) | Flytende nedbør (Sv) | Flytende nedbør (St) |
| | Varmefluks gjennom tak (M) | | Vind (konfunderende) | Varmefluks gjennom tak (M) | |

6.1.2 Regnvann og akkumulert SWE

I denne oppgaven ble regnvannets effekt på C_T og akkumulert SWE undersøkt i nærmere detalj. Undersøkelsene ble gjort siden korrelasjonsanalysene viste sterkest samvariasjon mellom disse parameterne.

Regnvann adderes til total SWE dersom snødekket ikke er mettet av eksempelvis tidligere regn eller smeltevann. Etersom snødekkets totale absorpsjonskapasitet er proporsjonal med andelen fast SWE, vil absorpsjonskapasiteten reduseres når snø smelter og øke når vann fryser. På bakgrunn av dette er det interessant å undersøke hvordan ulike bruksalternativer og taktyper med ulik varmekraft påvirker akkumuleringen av flytende nedbør.

Ved å dividere mengden akkumulert regnvann i kapittel 4.3 med maksimal SWE i kapittel 4.2, får vi regnvannandelen som inngår i et snødekke. Regnvannandelen for ulike bruksalternativer og taktyper er mellom 34-41 % i Tromsø, 16-33 % i Bergen og 20-30 % i Oslo. Fordelingen viser at regnutsatte områder ikke nødvendigvis akkumulerer mest regnvann. Derimot må andelen akkumulert regnvann ses i sammenheng med snødekkets akkumuleringstid. Siden snø i Tromsø ligger lengre enn snø i Oslo og Bergen, vil regnvann ha lengre tid til å akkumulere. Dette gir tilsvarende høyere regnvannandel, samt større snølast. Til tross for dette er det forskjellene i akkumulert regnvann på tak og mark som påvirker C_T verdiens størrelse.

Figur 27, Figur 30 og Figur 33 viser til variasjonene i akkumulert regnvann på tak og mark for ulike bygningstyper og taktyper for hvert caseområde. Variasjonene er uttrykt som Δ -regnvann, og benevnes som prosent av akkumulert regnvann på bakken. Positive verdier indikerer at mer regnvann akkumulerer på taket enn på bakken, mens negative verdier indikerer at mer regnvann akkumulerer på bakken enn på taket. Figur 50 oppsummerer hvordan C_{Tdim} og Δ -regnvann varierer som følge av en endring i U-verdi for ulike bruksalternativer.

| Bruksalternativ – [Styrke] | Samvariasjonen |
|---|--|
| Fryselager - (sterk) | U-verdi øker \Rightarrow CT og Δ -regnvann øker |
| | U-verdi reduseres \Rightarrow CT og Δ -regnvann reduseres |
| Bolighus - (sterk) Kjølelagre - (svak) Tak uten vegger - (svak) | U-verdi øker \Rightarrow CT og Δ -regnvann reduseres |
| | U-verdi reduseres \Rightarrow CT og Δ -regnvann øker |

Figur 50. U-verdiens effekt på C_{Tdim} og Δ -regnvann. Styrken på forholdet indikerer om effekten er stor eller liten.

For fryselaagre ser vi at Δ -regnvann øker når U-verdien på taket øker. Tilsvarende tendens viser Tabell 12, Tabell 13 og Tabell 14 for C_{Tdim} og U-verdi. Årsaken er at høyere U-verdier øker den negative varmekraften gjennom taket. Dette gjør at snødekkets energibalansse reduseres, hvilket øker potensialet for gjenfrysing av vann. Når vann fryser frigjøres plass for at nytt vann kan absorberes, samtidig som det dannes mer snø med absorberende egenskaper. Som følge av dette kan mer regnvann akkumulere på taket enn på bakken, og følgelig må C_T øke. På bakgrunn av dette er det rimelig å anta at C_T verdiene for fryselaagre er sterkt avhengige av takets U-verdi, grunnet U-verdiens effekt på mengden akkumulert regnvann.

For fryselaagre i henhold til TEK17- og passivhusstandard ser vi at C_{Tdim} er størst i Bergen. Dette stemmer godt overens med at Δ -regnvann også er størst i Bergen sammenlignet med de øvrige caseområdene. Eksempelvis er Δ -regnvann for TEK17 hus 27,4 % i Bergen, mot 14,3 % i Oslo og 16,5 % i Tromsø. Den høye regnvannandelen i Bergen skyldes for det første at Bergen har mer nedbør om vinteren enn Tromsø og Oslo, som vist i Tabell 8. For det andre vil snø på tak over fryselaagre ligge lengre enn snø på bakken, hvilket gir lengre akkumulasjonstid på tak og dermed større taklast. Årsaken til at snø ligger lengre på tak med lav innetemperatur, er fordi den negative varmekraften gjennom taket motvirker snøsmelting.

For fryselaagre av 1980-standar er C_{Tdim} størst i Oslo selv om Δ -regnvann fortsatt er størst i Bergen. Årsaken til dette er ikke lett å tyde, men kan skyldes økt resublimasjon. Når den negative varmekraften gjennom taket øker, vil takets overflatetemperatur synke, hvilket fører til en høyere temperaturgradient over snødekket. Tilsvarende vil en lav overflatetemperatur indukere en fuktighetsgradient mellom uteluften og snøpakken, hvilket øker sannsynligheten for en ekstern fukttransport mellom uteluft og snø. Siden Oslo har høyest luftfuktighet om vinteren, vil fukttransporten være størst her. Den relative luftfuktigheten om vinteren for hvert caseområde er listet opp i Tabell 8. Dette kan forklare hvorfor C_{Tdim} er størst i Oslo for fryselaagre med lav varmemotstand.

For bolighus (og andre bygg med høy innetemperatur og kompakte tak) ser vi at C_{Tdim} og Δ -regnvann reduseres når U-verdien på taket øker. Årsaken er at høyere U-verdier øker varmetransporten gjennom taket, hvilket gir høyere energibalansse i snødekket. Dette gir for det første lavere snølast og lavere absorpsjonspotensiale. For det andre vil høyere energibalansse føre til mindre gjenfrysing av vann som vist i Figur 29, Figur 32 og Figur 35. Resultatet er at mindre regnvann akkumulerer på taket enn på bakken, hvilket er uttrykt gjennom negativ Δ -regnvann og $C_{Tdim} < 1$.

Ifølge Tabell 12 til Tabell 14 varierer C_{Tdim} mindre i Bergen sammenlignet med øvrige caseområder for bolighus. Tilsvarende er variasjonene i Δ -regnvann. Årsaken er mest sannsynlig fordi snødekket ligger kortere i Bergen enn i Oslo og Tromsø. Effekten er ekvivalent kortere akkumulasjonstid, hvilket begrenser utviklingen av Δ -regnvann. Prinsippet skyldes at Δ -regnvann er en tidsavhengig variabel som normalt øker når akkumulasjonstiden øker. Kortere akkumulasjonstid tillater mindre regn å akkumulere, hvilket utjevner forskjellen i akkumulert SWE på tak og mark. Følgelig må også variasjonene i C_T bli mindre. Basert på denne drøftingen er det rimelig å anta at akkumulert nedbør har mindre effekt på C_T verdiene for bolighus i Bergen enn i Oslo og Tromsø.

For boligbygg av TEK17- og passivhusstandard varierer C_{Tdim} mellom 0,97 og 1,01 for alle caseområdene. De små variasjonene skyldes hovedsakelig at Δ -regnvann er i nærheten av 0, som vist i Figur 27, Figur 30 og Figur 33. Med andre ord er C_T for TEK17- og passivhus lite påvirket av regn.

For boligbygg av 1980-standard er C_{Tdim} 0.92 i Bergen, 0.85 i Tromsø og 0.72 i Oslo. Samtidig ser vi at den negative endringen i Δ -regnvann er størst i Oslo. Dette er logisk siden lavest Δ -regnvann korresponderer med lavest C_{Tdim} . Derimot bryter logikken når C_{Tdim} og Δ -regnvann sammenlignes for Tromsø og Bergen, ettersom Bergen både har høyest C_{Tdim} og lavest Δ -regnvann. Hva som er årsaken til dette er et komplisert spørsmål, da det er vanskelig å kvantifisere hvilken effekt alle klimatiske og ikke klimatiske parametere har for variasjonene i C_T og akkumulert SWE. Den konkrete årsaken er derfor ikke undersøkt i nærmere detalj.

I likhet med bolighus opplever også kjølelagre og tak uten vegger en reduksjon i Δ -regnvann når U -verdien øker. Med andre ord framstår parameterne som negativt korrelert. Sammenhengen indikerer at varmekraften gjennom taket er positiv og bidrar til snøsmelting. $C_{Tdim} > 1$ indikerer allikevel at varmekraften er mindre enn jordvarmen for bygg av TEK17- og passivhusstandard. For bygg av 1980-standard kan derimot varmekraften gjennom taket overstige jordvarmen. Dette er illustrert gjennom negativ Δ -regnvann. Allikevel er variasjonene i Δ -regnvann så små at det ikke vil ha en signifikant effekt på C_T verdiens størrelse.

6.1.3 Oppsummering

Basert på overnevnte analyser har akkumulert fast og flytende nedbør størst innvirkning på akkumulert SWE. Videre har flytende nedbør størst innvirkning på C_T faktoren.

Mengden flytende nedbør som absorberes i ett snødekke viser seg å være sterkt avhengig av snødekkets energibalanse. Årsaken er at regnvannet konkurrerer med smeltevannet om å oppta det samme absorpsjonsvolumet. Den eneste måten å øke absorpsjonsvolumet på er gjennom å øke andelen fast SWE. Dette kan enten skje gjennom mer akkumulert fast nedbør eller ved frysing av vann. Sistnevnte er avhengig av at energibalansen på taket er negativ.

Lavest energibalanse forekommer på tak over fryselaagre. I tillegg reduseres energibalansen ytterligere når U-verdien øker. Av den grunn vil tak over fryselaagre med høy U-verdi akkumulere mest regnvann og dermed få høyest C_T . På motsatt side vil tak over boligbygg med høy U-verdi akkumulere minst regnvann, og få lavest C_T . For tak uten vegger og kjølelaagre ser vi at forskjellene i akkumulert regn på tak og mark er små, hvilket gir tilnærmet lik tak- og marklast.

Siden Δ -regnvann er størst i Bergen for fryselaagre (27,4 % for fryselaagre av TEK17 standard), har Bergen de høyeste C_T faktorene. Først og fremst skyldes dette at Bergen har mest regn om vinteren. I tillegg er akkumulasjonstiden av flytende nedbør mye lengre på fryselaagre enn på bakken, hvilket øker forskjellene i akkumulert SWE. For boligbygg vil de laveste C_T verdiene forekomme i Oslo og Tromsø. Årsaken er betraktelig kortere akkumulasjonstid i Bergen sammenlignet med Oslo og Tromsø, hvilket bremser utviklingen av Δ -regnvann til tross for Bergens høye nedbørsmengde.

6.2 Den termiske koeffisienten

Dette delkapittelet henvender seg til forskningsspørsmål 2:

- Hvilken termisk koeffisient beskriver best lastsituasjonen for tak med varierende innetemperatur og varmekonduktivitet, og hvordan kan koeffisienten enkelt benyttes av ingeniører og forskere?

Innledningsvis drøftes variasjonene i C_{Tdim} for tak med ulike varmekonduktivitet. I tillegg blir den kumulative prosentfordelingen av årlige C_T verdier diskutert for bolighus og fryselagre. Deretter bli metodikken for fastsettelse av C_{Tdim} drøftet, og valgene gjort i seleksjonsprosessen begrunnet. Avslutningsvis sammenlignes de modellerte C_{Tdim} verdiene med eksisterende regelverk, før den anbefalte bruken av C_T koeffisienter for ingeniører og forskere presenteres.

6.2.1 Variasjoner i varmefluks og C_T

C_T verdienes størrelse er direkte sammenfallende med differansen i induisert varmeenergi fra mark og tak (CEN/TC 250, 2020a). Siden jordvarmen holdes konstant i denne oppgaven, er det kun varmetransporten gjennom taket som vil påvirke C_T . Alle andre energitilskudd er klimaavhengige, og dermed upåvirkelige. Takets varmefluks er beregnet i henhold til Fouriers lov gitt snøtemperaturen, takets U-verdi og innetemperaturen. Ettersom innetemperaturene og U-verdiene holdes konstante (unntatt for tak uten vegger) vil kun snøens temperatur påvirke varmefluksen.

Ifølge Tipler (Tipler & Mosca, 2008), har vann i fast form alltid negativ temperatur. Basert på dette vil bygg med positiv innetemperatur, og snø på taket, alltid har positiv varmefluks. Tak uten vegger skiller seg fra øvrige bruksalternativer ettersom «innetemperaturen» lar seg variere. For slike tak vil varmefluksens størrelse og retning avhenge av både innetemperaturen og snøens temperatur.

Tak med luftet tekning og tak med kalde loftsrom vil i praksis oppføre seg som tak uten vegger. Årsaken er at utvendig luft ventileres på undersiden av taket for å holde overflatetemperaturen lav (Byggforskserien, 2019). Som beskrevet i kapittel 6.1.2 er varmefluksen gjennom slike tak vanligvis lavere enn markvarmen, hvilket gir en liten økning i taklasten. Forskjellene er allikevel så små at vektøkningen på taket er neglisjerbar. Eksempelvis er den største

vektøkningen i Oslo på kun 3 % for passivhus. Basert på dette er det legitimt å benytte $C_T = 1$ for slike konstruksjoner.

For kjølelagre med lav U-verdi ser vi at C_{Tdim} er høyere enn 1. På den andre siden ser vi at kjølelagre med høy U-verdi har C_{Tdim} lavere enn 1. Basert på dette er det rimelig å anta at varmemotstanden på tak av TEK17- og passivhusstandard er for høy til at varmetapet overstiger markvarmen. Derimot vil 1980-hus med mye lavere varmemotstand ha et tilstrekkelig høyt varmetap til at taklastene reduseres. Reduksjonen er dog relativt liten, med kun 2 % for Oslo. Av den grunn vil det være legitimt å benytte $C_T = 1$ for slike konstruksjoner.

For boligbygg ser vi at C_{Tdim} normalt er lavere enn 1. Dette skyldes at varmefluksen gjennom taket er positiv og større enn den induserte markvarmen, hvilket medfører at mer snø smelter på taket enn på bakken. Hvor mye snø som smelter avhenger av takets varmefluks samt snøens isolasjonsevne. Som beskrevet i kapittel 2.3.6 har snø svært høy isolasjonsevne. Den høye isolasjonsevnen skyldes at snø hovedsakelig består av stillestående luft, fanget mellom de akkumulerte snøkrystallene. Den høye isolasjonseffekten til snø kan føre til positive temperaturen mellom et snødekke og takoverflaten til et boligbygg. Iver Frimannslund viser i sin masteroppgave at temperaturer over null grader er sannsynlig for både dårlig og bra isolerte boligbygg på undersiden av snødekket (Frimannslund, 2017, S. 109). I kombinasjon med lave atmosfæriske temperaturer over snødekket, vil varmegradianten bli svært høy. Dette eskalerer sublimasjonsraten. I tillegg ser vi fra fasediagrammet at snø og is ikke er i likevekt når det utsettes for temperaturer over null grader ved normalt atmosfærisk trykk. Dette vil føre til at snøkrystallene nærmest takoverflaten begynner å smelte. Såfremt smeltevannet ikke absorberes av snødekket, men renner av, vil dette føre til lavere snølaste samt lavere C_T .

C_{Tdim} for et boligbygg med glasstak og 1980-tak i Oslo er ifølge Tabell 12 på henholdsvis 0,72 og 0,78. Samtidig ser vi fra Figur 37 at om lag 70 % av de årlige C_T verdiene er høyere enn 0,8. Med andre ord er C_{Tdim} lavere enn majoriteten av årlige C_T verdier, og kan dermed anses som konservativ. C_{Tdim} for tak av TEK17- og passivhusstandard ligger også i samme intervall som majoriteten av årlige C_T verdier. Ettersom intervallet utgjør over 90 % av alle simuleringsår, kan vi med trygghet si at C_{Tdim} gjenspeiler utvalget godt.

Tilsvarende er også C_{Tdim} for boligbygg med glasstak og 1980-tak i Bergen og Tromsø i nedre sjikt av årlige C_T faktorer. For glastak er derimot er de årlige C_T faktorene i større grad er spredd over intervallgrensene, hvilket er med å gjøre eventuelle trender i resultatene mer usikre.

For fryselaagre er C_{Tdim} godt over 1 ifølge Tabell 12 til Tabell 14. Årsaken til de høye verdiene er den negative varmekraften gjennom taket, som bidrar til nedkjøling og lavere energibalanse i snødekket. Når U -verdien øker ser vi også at forholdet mellom taklaster og marklaster øker, uttrykt ved høyere C_{Tdim} . Dette er logisk ettersom høyere U -verdier tillater mer varmeenergi å gå fra snødekket til innsiden. Effekten av lavere energibalanse i snødekket er blant annet lengre akkumulasjonstid, hvilket gir høyere Δ -regnvann som diskutert i kapittel 6.1.2. Andre sekundære effekter av negativ varmekraft er blant annet økt gjenfrysing, økt resublimasjon og økt vannabsorpsjon. Sammen bidrar disse prosessene til at taklastene øker mer enn de korresponderende marklastene.

For fryselaagre av TEK17- og passivhusstandard viser resultatene i kapittel 4.4 at den kumulative prosentfordelingen er størst i intervallet hvor C_{Tdim} inngår for alle caseområdene. Siden intervallene dekker mellom 70 og 90 prosent av de årlige C_T faktorene, kan vi fastslå at C_{Tdim} verdiene er valide samt gode representanter av utvalget. Observerte C_T verdier over disse intervallgrensene representerer normalt år med lite snø, hvilket ekskluderes fra beregningen av C_{Tdim} som forklart i kapittel 3.6.1.

For fryselaagre av 1980-standar havner C_{Tdim} i midtre til øvre sjikt av de årlige C_T faktorene. Det betyr at majoriteter av årlige C_T verdier er lavere, hvilket styrker validiteten til C_{Tdim} . Til tross for dette ser vi at de årlige C_T faktorene er jevnere fordelt over intervallgrensene, sammenlignet med fryselaagre av TEK17- og passivhusstandard. Dette knytter større usikkerhet til eventuelle trender i C_T .

Tak med solceller representerer et spesialtilfelle for C_T , ettersom solcellenes montasje avgjør hvorvidt varme fra undersiden av taket bidrar til snøsmelting. Dersom solcellene er montert direkte til takets overflate kan den dimensjonerende C_T faktoren hentes direkte fra tabellene i kapittel 5 ved å lese av takets U -verdi og innetemperatur. I dette tilfellet anses solcellenes U -verdi som uendelig, hvilket vil si at vi neglisjerer varmemotstanden solcellene har. Dersom solcellene er montert oppå stativer med mulighet for at uteluft kan ventilere fritt på undersiden, må C_T faktoren beregnes på lik linje som tak uten vegger. Her vil varmetapet gjennom taket transporteres vekk gjennom det ventilerte luftsjiktet, og snøakkumulasjonen oppå solcellene er alene avhengig av utetemperaturen og solcellenes varmemotstand. Siden solceller vanligvis har veldig lav varmemotstand, vil høyeste U -verdi være mest reell for fastsettelse av denne C_T verdien.

For bygg med høy inne-temperatur kan stativmonterte solceller medføre konstruktive utfordringer for takets bæreevne, siden varmetransporten fra innsiden ikke lenger får bidratt til snøsmeltingen oppå taket. For mange eldre bygg, som allerede er underdimensjonerte i henhold til dagens krav, vil montasje av slike solceller utgjøre en fare for at mer snø akkumulerer enn det taket klarer å bære. Derimot vil solceller montert direkte på takets overflate tillate at varme fra innsiden reduserer snølastene på taket. Allikevel må takets totale vektøkning som følge av solcellenes egenvekt hensyntas i dimensjoneringen. Solceller med integrert snøsmelting kan løse problemet, men dette er ikke analysert videre i denne oppgaven.

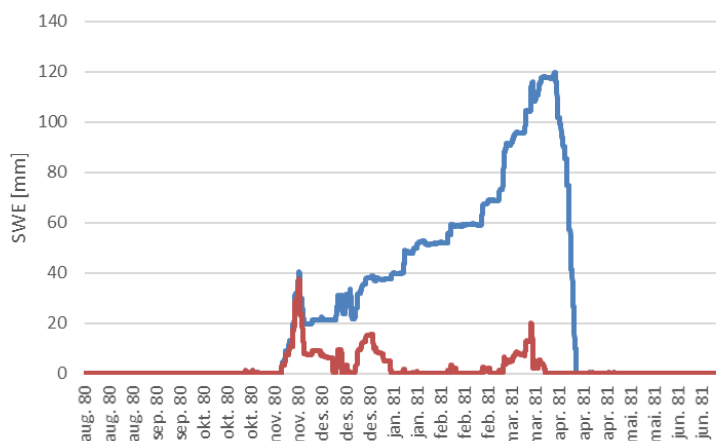
For fryselaagre og andre bygg med lav inne-temperatur vil det være gunstig å innføre et ventilerende luftsjikt på taket. Dette vil medføre at varmeenergien som transporteres vekk fra taket ikke hentes direkte fra snødekket, men fra den ventilerte luften på undersiden. Metoden forutsetter at ventilasjonshastigheten er tilstrekkelig høy, slik at den negative varmekraften ikke bidrar til nedkjøling av snødekket oppå taket. Slike tak kan anses som tak uten vegger, med C_T faktor tilnærmet lik 1. Eventuelt kan stativmonterte solceller ha samme effekten grunnet det ventilerende luftrommet mellom solcellene og takets overflate. Her er det spesielt viktig å kontrollere for at smeltevann kan renne av taket fritt uten å være i kontakt med den kalde takoverflaten.

6.2.2 Seleksjonsprosessen

De gyldige årene for fastsettelse av C_{Tdim} er frembragt gjennom seleksjon. Gyldige år er selektert med bakgrunn i returlasten for det aktuelle caseområdet, grenseverdier for maksimal C_{Tdim} samt null-år. C_{Tdim} er beregnet som gjennomsnittet av gyldige års C_T faktorer. Metoden er konstruert i tråd med anbefalingene til ny snølaststandard, beskrevet i kapittel 3.6.3. Metodikkens validitet samt effekten av overnevnte kriterier diskuteres i de kommende avsnittene.

Innledningsvis i seleksjonsprosessen ble alle null-år fjernet. Årsaken er at null-år ikke gir noen termisk faktor som kan benyttes videre i analysen. Videre ble år med maksimale snølastere lavere enn 5-års returlasten fjernet (merk at 0-år inkluderes i sannsynlighetsfordelingen av returlaster). Dette er gjort for at C_{Tdim} skal gjenspeile de mest kritiske lastsituasjonene for år med mye snø.

Videre ble alle C_T faktorer høyere enn 1,5 fjernet. C_T faktorer høyere enn 1,5 anses som eksepsjonelle verdier, forårsaket av blant annet variasjoner i snødekkets akkumulasjonstid på mark og tak. Når snø på tak ligger lenge etter at smelteprosessen på bakken har startet, kan C_T koeffisienten bli uforholdsmessig stor. Dette er spesielt typisk for tak med negative innetemperaturer. I tillegg kan negativ varmekraft forårsake at snø akkumulerer på taket samtidig som snø smelter på bakken. Fenomenet kan gi C_T faktorer i størrelsesordenen mot uendelig, hvilket er urepresentativt for analysen. Figur 51 viser et eksempel på dette.



Figur 51. Eksempel på simultan snøakkumulasjon på fryselager (blå linje) og snøsmelting på mark (rød linje). Observasjonene er gjort i Oslo i 1980-1981. Legg merke til at maksimal taklast forekommer samtidig som null marklast. Dette gir C_T lik uendelig.

Etter at overnevnte seleksjonsskritt er gjennomført, sitter vi igjen med de gyldige C_T verdiene. En svakhet ved metoden er at antallet gyldige år varierer mellom caseområdene. Dette gjør at enkelte C_T verdier er bygd på en større datamengde enn andre. Ved statistisk analyse knyttes det større usikkerhet til resultater bygd på små datasett enn store datasett. I dette studiet hadde Bergen færrest gyldige år.

Avslutningsvis ble den dimensjonerende C_T verdien beregnet som det aritmetiske gjennomsnittet (middelverdien) av alle gyldige C_T verdier. Det aritmetiske gjennomsnittet beskriver «den mest typiske» verdien for C_T .

Ett annet alternativ hadde vært å betegne den dimensjonerende C_T faktoren som største verdi av alle gyldige C_T verdier. Ulempen med denne metoden er at største C_T faktor kan forekomme på forskjellige år for forskjellige taktyper med samme innetemperatur. Grunnen til dette ligger i alle de kompliserte prosessene som påvirker snøakkumulasjonen på et tak, samt hvordan disse

prosessene kan endre seg brått som følge av selv små forandringer i induisert varme gjennom taket. Siden den akkumulerte snømengden også varierer mellom hvert år, ville dette medført til at C_T verdiene for en konstruksjon ikke stemte overens med variasjonene i U-verdi. Dette ville gitt villedende koeffisienter som brøt med intuitive sammenhenger som tilsier at C_T verdien burde følge samme trendbilde som U-verdien. For eksempel er en intuitiv sammenheng for fryselaagre at C_T verdien øker når U-verdien øker. Tilsvarende er det intuitivt at C_T verdien for boliger synker når U-verdien øker. Den logiske sammenhengen mellom ulike U-verdier og C_T koeffisienter kan avleses Figur 38, Figur 41 og Figur 44.

6.2.3 Sammenligning av modellerte C_T verdier med eksisterende regelverk

I dette kapitlet sammenlignes de modellerte C_T koeffisientene med dagens regelverk, ISO 4355. I tillegg benyttes de amerikanske C_T faktorene i Tabell 5 og prEN 1991-1-3:2020 som sammenligningsgrunnlag for uoppvarmede konstruksjoner og fryselaagre. Det er dog viktig å merke seg at PrEN 1991-1-3:2020 kun gjelder bygg av TEK17- og passivhusstandard.

ISO 4355 oppgir tre ulike funksjoner for fastsettelse av C_T . Funksjonene skiller mellom tre intervaller av U-verdi: [\leftarrow ,1], [1,4.5] og [4.5, \rightarrow]. Den store intervallbredden setter spørsmålstegn ved om U-verdiene generaliseres i for stor grad, og hvorvidt generaliseringen medfører at C_T verdier enten over- eller underestimeres. ISO 4355 tar heller ikke høyde for innetemperaturer høyere enn 18°C. Funksjonenes gyldighetsområde er i Norge, og regionale variasjoner i C_T uttrykkes gjennom S_K .

I Figur 46 ser vi at den logaritmiske regresjonslinjen for boligbygg med $U = 1,2$ (glasstak) sammenfaller godt med ISO standardens foreslåtte verdier for lave taklaste. Derimot ser vi at spredningen blir større når marklastene øker. Regner vi ut 70 % konfidensintervallet for dataene får vi følgende resultat: [$C_T \pm 0,1$]. Det betyr at vi med 70 % sannsynlighet kan si at den reelle målingen ligger 0,1 til eller fra regresjonslinjen. Det brede konfidensintervallet skyldes at variansen i datagrunnlaget er stort, hvilket øker usikkerheten tilknyttet estimatet.

Fra kapittel 5 ser vi at den reelle spredningen i C_T for bolighus med $U = 1,2$ er mellom 0.6 - 0.87 for områder med $S_{50} \in [1.5, \rightarrow]$. Til sammenligning anbefaler ISO standarden C_T verdier mellom 0,54 - 0,72 for de samme områdene. Forholdet viser at de modellerte C_T verdiene stort sett ligger over de anbefalte C_T verdiene. Boligbygg med glasstak kan dermed stå i fare for å bli underdimensjonert. Årsaken til at ISO standardens C_T verdier er lavere enn de modellerte,

er mest sannsynlig fordi ISO standarden ikke tar høyde for innetemperaturer høyere enn 18°C, mens de modellerte C_T verdiene er frambrakt for innetemperatur lik 25 °C. På bakgrunn av dette anbefales det å benytte den modellerte regresjonsfunksjonen (formel 35) i fastsettelse av C_T for boligbygg med $U = 1.2$. Til tross for at dataspredningen er stor, anses denne modellen som litt mer konservativ en ISO-standardens modell.

For boligbygg med $U = 0,46$, ser vi at C_T verdiene stort sett er lavere enn 0,9. Denne reduksjonen i taklast er verken hensyntatt i ISO4355 eller prEn1991, som tilsier at alle tak med U -verdi lavere enn 1 W/(m²K) skal ha $C_T = 1$. Dette er en generalisering av C_T som kan medfører at konstruksjoner overdimensjoneres med over 20 % ifølge kapittel 5. Derimot anses $C_T = 0,9$ som en konservativ verdi for slike konstruksjoner.

For boligbygg med U -verdi lik 0,13 og 0,09 er $C_T \approx 1$. Dette stemmer godt overens med kravene i prEn1991 og ISO4355.

For fryselagre med U -verdi lik 0.46, ser vi at regresjonslinjen i Figur 47 flater ut mot 1,2 når den karakteristiske marklasten øker. Derimot indikerer 70 % konfidensintervallet for dataene at det er knyttet relativt stor usikkerhet til regresjonslinjens estimat. De reelle C_T verdiene som regresjonslinjen bygger på, varierer mellom 1,11 og 1,33. Det betyr at taklastene kan øke med tilnærmet 30 % i forhold til marklastene. I henhold til den amerikanske standarden er $C_T = 1,3$ for tilsvarende konstruksjoner. I NS-EN 1991-1-3 er slike konstruksjoner ikke evaluert.

For fryselagre av TEK17- og passivhusstandard ser vi at C_{Tdim} varierer mellom 1,04 og 1,15. Til sammenligning anbefaler prEN 1991-1-3 å sette C_T lik 1,2 for slike konstruksjoner. Etersom den anbefalte verdien ligger over de modellerte C_T verdiene, kan vi fastslå at standardens C_T verdi er konservativ.

For kjølelagre ser vi at variasjonene i C_{Tdim} er så små at det ikke er hensiktsmessig å involvere i dem i dimensjonerende arbeider. Derfor settes denne C_T verdien lik 1 i både norsk og amerikansk standard.

Tak uten vegger er i den amerikanske standarden omtalt som uoppvarmede- og friluftstrukturer. For slike strukturer viser oppgavens analyser at den termiske koeffisienten er tilnærmet lik 1, men i henholdt til amerikansk standard anbefales $C_T=1,2$. Bakgrunnen for den store forskjellen er ikke kjent, men en forklaring kan være at de amerikanske

vintertemperaturene i de kaldeste statene er lavere enn de norske. Siden varmekraften gjennom taket blant annet avhenger av utetemperatur, vil lavere utetemperature fører til lavere varmekraft og mer snø på taket.

En annen forklaring kan være at varmetransporten gjennom taket er antatt lik 0 for slike konstruksjoner. Sett i sammenheng med resultatene fra kapittel 5 tilsvarer dette uendelig høy varmemotstand. Fra kapittel 6.2.1 vet vi også at C_T verdien øker når varmemotstanden øker for slike konstruksjoner. Å anta null varmetransport gjennom taket vil allikevel være urealistisk, ettersom differansen i snøtemperatur og utetemperatur sjeldent er null, grunnet tregheten i systemet. Systemets treghet er her forstått som tiden det tar for snø å gjennomgå en temperaturendring. (Tipler & Mosca, 2008).

Strukturer holdt like under frysepunktet er ikke utforsket i dette arbeidet. Slike bygg er i den amerikanske standarden gitt $C_T = 1,1$. Fra tidligere analyser vet vi at negativ varmekraft gjennom taket er forbundet med negativ innetemperatur, hvilket øker potensialet for snøakkumulering. Av den grunn kan denne verdien virke fornuftig.

6.2.4 Bruk av C_T koeffisienten

Den termiske koeffisienten er i denne oppgaven framstilt på to måter, i tabellform og som multiple regresjonsfunksjoner av flere klimatiske og ikke klimatiske variabler. Hvordan disse bør anvendes avhenger av hvem som skal benytte resultatene og hva resultatene skal brukes til. I dette kapitlet blir den anbefalte bruken av C_T koeffisienten presentert.

For forskere og standardiseringsorganet

I tilknytning forsikringsrelaterte arbeider som gjelder snøakkumulering på bygg og konstruksjoner, anbefales det å benytte de multiple regresjonsfunksjonene i fastsettelse av den dimensjonerende C_T faktoren. Funksjonene gir relativt presise estimeringer av den termiske faktoren, basert på variasjonene i de klimatiske parameterne. Ulempen er at metoden krever noe databehandlingsferdigheter hos brukeren, hvor blant annet akkumuleringstider og gjennomsnittsverdier må frambringes.

I tillegg er det viktig å bemerke seg at funksjonene kun er laget på bakgrunn av værdata fra oppgavens tre caseområder. Funksjonene må av den grunn anvendes varsomt for andre områder. I tillegg er ERA5-datagrunnlaget angitt som metrologiske gjennomsnittsverdier

innenfor det definerte gridområdet, jf. kapittel 3.3.1. Dersom gridområdet er karakterisert av store topografiske variasjoner, kan dette medføre at målte værdata og ERA5 dataen avviker fra hverandre. Dette er med å skape en viss usikkerhet i modellenes estimat.

Funksjonenes presisjonsnivå varierer mye mellom de ulike bruksalternativene. Dårligst er presisjonsnivået for kjølelagre og tak uten vegger, som vist ved lavest R -verdi. Dette indikerer at korrelasjonssammenhengen mellom de klimatiske variablene og de modellerte C_T verdiene er lave. Fenomenet ses i sammenheng med at C_T varierer lite for disse bygningstypene. Små variasjoner i C_T gjør det vanskelig å konkretisere hvilke klimatiske parametere som er driveren bak en endring. Oftest er det en kombinasjon av flere. Store variasjoner i C_T vil derimot ha en klar årsakssammenheng som kan relateres til en eller flere parametere. Dette er typiske for fryselaagre og boliger. Av den grunn er også funksjonenes presisjonsnivå høyere for disse bruksalternativene.

For ingeniører

Ved prosjektering av byggverk og konstruksjoner anbefales det å benytte de tabulerte C_T verdiene i Tabell 19. Verdiene er frembrakt på bakgrunn av resultatene i kapittel 5, ved å avrunde høyest modellerte C_{Tdim} verdi for hvert bruksalternativ til nærmeste tittel. Dette medfører at verdien er mer konservativ i enkelte områder enn andre, men at den ikke er overkonservativ noen steder. C_T verdiene for 1980-hus kan benyttes ved eventuell rehabilitering av eldre bygg.

For boligbygg med glasstak ser vi at C_{Tdim} varierer mye ved varierende marklast. Av den grunn er C_T for slike tak bestemt gjennom den litt mer konservative regresjonsfunksjonen i formel 35. Formelen beregner C_T som funksjon av 50-årslasten (S_{50}), som oppgis i kN/m^2 .

Tabellene tilbyr presise, lett anvendelige og differensierte verdier for C_T , tilpasset bygg med forskjellig innetemperatur og U -verdi. Koeffisienten er utarbeidet med bakgrunn i 40 år med værdata i en godt verifisert snømodell, med både strenge og realistiske krav til gyldige verdier. Med bakgrunn i dette kan resultatene anses som troverdige.

For andre land indikerer resultatene at C_T kan være annerledes enn verdiene framstilt i Tabell 19. For Amsterdam i Nederland framstår eksempelvis $C_T = 1,1$ for fryselaagre av TEK17-standard som legitimt.

Tabell 19. Anbefalte C_T verdier

| Taktype – [U-verdi] | Bolig | Fryselager | Tak uten vegger & kjølelagre |
|---------------------|-----------|------------|------------------------------|
| Passivhus - [0,09] | 1,0 | 1,1 | 1,0 |
| TEK17-hus - [0,13] | 1,0 | 1,2 | 1,0 |
| 1980-hus - [0,46] | 0,9 | 1,3 | 1,0 |
| Glasstak - [1,2] | Funksjon* | | |

- $C_{T \text{ glasstak}}(S_{k50}) = -0,04 * \ln(S_{k50}) + 0,7473$

6.2.5 Oppsummering

For tak uten vegger og kjølelagre er varmetransporten gjennom taket tilnærmet lik markvarmen, hvilket gir $C_{Tdim} \approx 1$. Dette skyldes at temperaturdifferansen mellom kald og varm side av taket er relativt lav.

For bolighus med kompakte tak, vil derimot varmetransporten gjennom taket være tilstrekkelig høy til å få en reduksjon i taklast. Derimot er reduksjonen i taklast relativt liten for boliger som følger TEK17- og passivhusstandard, hvilket gir $C_{Tdim} \approx 1$. For 1980-hus med betraktning høyere varmegjennomgang, vil derimot taklastene reduseres med opptil 10 % sammenlignet med marklastene.

Forskjellene mellom akkumulert taklast og marklast er størst for fryselagre. Resultatene fra analysen indikerer at taklastene kan øke med opptil 10 % for bygg av passivhusstandard, 20 % for bygg av TEK17 standard, og 30 % for bygg av 1980-standard sammenlignet med marklasten. Årsaken til den store økningen, skyldes at takets negative varmefluks akselererer gjenfrysingsprosessen og resublimasjonen. Disse prosessene gir mer fast SWE, i tillegg til at snødekkets totale absorpsjonskapasitet av vann øker.

For forskere anbefales det å benytte de multiple regresjonsanalysene framstilt i kapittel 4.5 for fastsettelse av C_T . For ingeniører anbefales det å benytte C_T verdiene vist i Tabell 19.

6.3 Fremtidige C_T verdier

Dette delkapittelet forsøker å besvare forskningsspørsmål 3:

- Hovdan kan klimaendringer påvirke lastsituasjonen og de termiske koeffisientene i fremtiden?

Tidligere forskning, resultater fra kapittel 4.6 og studentens overordnede kunnskap om emnet benyttes for å besvare forskningsspørsmålet. Klimaendringenes effekt på lastsituasjonen og de termiske koeffisientene vurderes i lys av direkte effekter (som vil si meteorologiske endringer) samt indirekte effekter (som skyldes politikk og byggeskikk). Det er dog viktig å påpeke at klimaet i fremtiden er vanskelig å spå, men at tolkninger gjort nedenfor benyttes for å hensynta endringer som forventes å gjelde C_T .

6.3.1 Direkte effekter: Klimatiske endringer

Global oppvarming er i dag et av de største problemene verden står ovenfor. Fra 1880 til i dag har jordens gjennomsnittstemperatur steget med over én grad, og det forventes at temperaturene vil stige ytterligere 4,5 grader mot slutten av århundret dersom klimagassutslippene fortsetter som i dag (Meteorologisk Institutt, 2017). En slik utvikling vil få store konsekvenser for det norske vinterklimaet, både i form av økte temperaturer og mer nedbør.

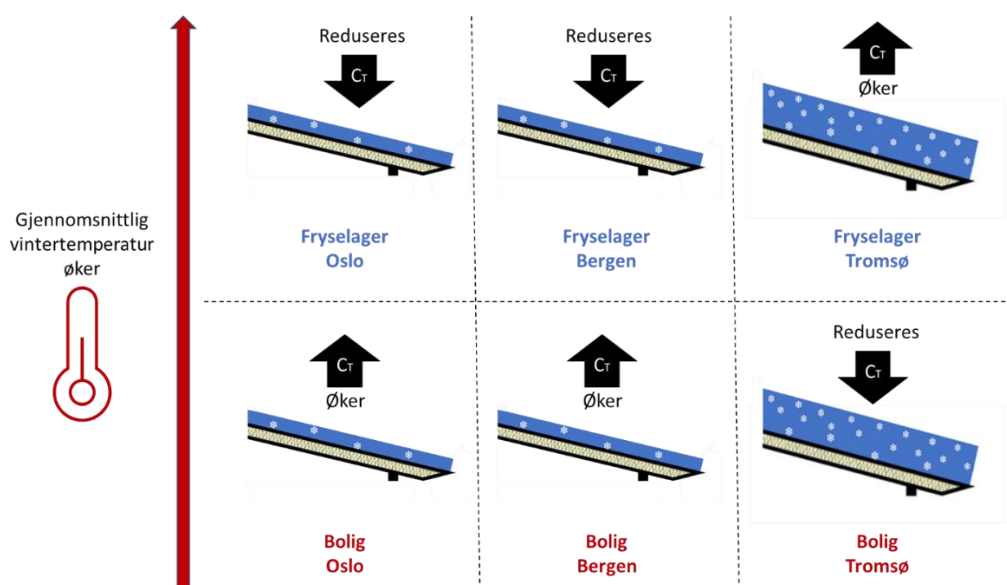
I kapittel 2.7 viser tidligere forskning at det foreligger en sterk positiv korrelasjonssammenheng mellom nedbørsmengden og utetemperaturen. Årsaken til dette er at varmere luft kan holde på mer fuktighet en kald luft, hvilket fører til mer nedbør. Hvorvidt nedbøren kommer som regn eller snø avhenger av utetemperaturen.

I forskningsartikkelen karakteriseres områder som enten nedbørsdominerte eller temperaturdominerte. Differensieringen indikerer hvorvidt nedbørsmengdene eller utetemperaturene har størst effekt på snødybden. For områder med de laveste vintertemperaturene vil nedbør oftest komme som snø, mens for varmere områder kan selv små temperatursvingninger gjøre at nedbøren kommer som regn. Ifølge Figur 11 ser vi at områder med gjennomsnittlig vintertemperatur lavere enn -3°C stort sett er nedbørsdominerte, mens områder med vintertemperaturer over -3°C stort sett er temperaturdominerte.

Som følge av varmere klima kan flere områder som i dag klassifiseres som nedbørsdominerte bli temperaturdominerte. Dette gjelder hovedsakelig områder med gjennomsnittlige vintertemperaturer like under 0°C . I praksis vil dette bety mer regn og mindre snø. For de kaldeste områdene i Norge vil derimot temperaturstigningen ikke være stor nok til at utetemperaturene blir positive. I kombinasjon med mer nedbør vil derfor snølasten øke for disse områdene. I tillegg vet vi at områder med mye snø har større potensiale for å absorbere flytende nedbør. Dette kan gjøre at snølastene for disse områdene øker ytterligere.

Ifølge Tabell 8 ser vi at vintertemperaturene i Oslo og Tromsø er lavere enn -3°C . Ergo er disse områdene mest sannsynlig nedbørsdominerte. Derimot kan en temperaturøkning i Oslo gjøre at området blir temperaturdominert, hvilket betyr at Oslo får mindre snø. Tromsø kan på sin side oppleve samme temperaturøkning, men fortsatt være nedbørsdominert. I kombinasjon med mer nedbør vil dette føre til større snølast. Bergen er i dag temperaturdominert og vil derfor få enda mindre snø som følge av en temperaturøkning.

Som vist i underkapittel 4.6 øker C_T for bygg med negativ innetemperatur når marklastene øker. Tilsvarende reduseres C_T for bygg med høy innetemperatur når marklastene øker. Ergo vil det være naturlig at C_T koeffisienter følger samme mønster for klimaskapte variasjoner i karakteristisk marklast. Basert på dette og overnevnte antakelser, er det naturlig å anta at C_T vil både reduseres og økes i fremtiden som vist i Figur 52.



Figur 52. Endring av C_T som følge av global oppvarming.

6.3.2 Indirekte effekter: Bygningsfysiske endringer

Som følge av økt levestandard har energibehovet for oppvarming og nedkjøling av bygg og konstruksjoner eskalert de siste tiårene. Med hensikt i å redusere det totale nasjonale energiforbruket har kravene til isolasjonsmengden i bygg blitt skjerpet. Dette kan også skje i fremtiden, både som følge av økte strømpriser, men også grunnet den globale klimakrisen. Å redusere det totale energikonsumet i verden vil være positivt for miljøet, ettersom mesteparten av energien lages gjennom å brenne fossile stoffer. Drastiske energikutt er derfor et direkte klimamål for mange nasjoner, inkludert Norge.

Ett av tiltakene for å redusere det nasjonale energiforbruket er å forbedre bygningers energieffektivitet ved å tilføre mer isolasjon i vegger og tak. Krav til økt takisolering kan imidlertid resultere i både økte og reduserte i taklaster, som følge av høyere varmemotstand gjennom taket. I praksis vil dette si at C_T verdiene kan øke for bygninger med positive innnetemperaturer, og reduseres for bygninger med negative innnetemperaturer. Dette avhenger eventuelt av hvor mye isolasjon som legges til, og således hvor stor reduksjonen i varmetransport er. Tak uten vegger og kjølelagre kan forvente å ikke oppleve like stor endring, siden varmetransporten gjennom taket i utgangspunktet er relativt lav. Hvordan C_T endrer seg med økt isolasjonsmengde kan avleses i kapittel 5.

6.3.3 Oppsummering

Som følge av global oppvarming forventes det mer nedbør i fremtiden. For områder med de laveste vintertemperaturene (nedbørsdominerte områder) vil derimot temperaturstigningen ikke være tilstrekkelig stor nok til at nedbøren kommer som regn, men som snø. Dette vil gi økte snølaste, som ifølge Figur 46 og Figur 47 betyr lavere C_T faktor for boligbygg og høyere C_T faktor for fryselaagre. Dette er karakteristisk for Tromsø.

For områder med mildere vintre (temperaturdominerte områder) vil derimot en temperaturstiging føre til mere regn og mindre snø. Dette gir lavere snølaste, som ifølge Figur 46 og Figur 47 betyr at C_T faktoren for boligbygg øker, mens C_T faktoren for fryselaagre reduseres. Dette er karakteristisk for Oslo og Bergen.

6.4 Forenklinger og antakelser

I dette kapittelet blir forenklingene og antakelsene som er gjort underveis i oppgaven belyst, samt effekten disse kan ha hatt på resultatene diskutert. Kapittelet skiller mellom forskriftsmessige og tekniske forenklinger.

6.4.1 Forskriftsmessige forenklinger

Som beskrevet i kapittel 2.1.1 spesifiserer TEK17 at alle bygninger med tilsiktet temperatur under 15 °C er fritatt fra gjeldene energikrav så langt energibehovet holdes på et forsvarlig nivå (DiBK, 2017). Kriteriet forutsetter at transmisjonsvarmetapet ikke overstiger det som tillates for oppvarmede bygg av TEK17 standard. I virkeligheten betyr dette at fryse- og kjølelagre kan ha (og i praksis har) høyere U verdier enn dagens minstekrav. Hvor høy U-verdi som tillates ved den gitte innetemperatur er ikke analysert eller hensyntatt i denne oppgaven.

I samme kapittel refereres det til et endringsskriv som gjelder byggeforskriften av 1969, hvor U-verdier på tak bygd fra og med 1980 kunne temperaturreguleres. Som beskrevet i Tabell 2 vil varmetransportkoeffisientens verdi variere mellom 0,23 og 0,64 for ulike intervaller av innetemperatur. Denne differensieringen er ikke tatt høyde for i oppgavens analyser. Ved bruk ville det gitt høyere varmegjennomgang for kjølelagre samt lavere varmegjennomgang for boligbygg. Fryselagre og tak uten vegger er ikke spesifisert i denne forskriften.

6.4.2 Tekniske forenklinger

Følgene tekniske forenklinger er gjort i snømodellen og beregningene:

- Snødriver som følge av vind er ikke inkludert i modellen
- Varmefluksen fra mark er konstant lik 2 W/m²
- Snødekket anses som homogent
- Metamorfose av snø er ikke inkludert i modellen
- Innetemperaturer og U-verdier er antatt konstante
- Klimatiske parametere er beregnet som gjennomsnittsverdier over et større gridområde

Som beskrevet i kapittel 2.2.2 kan vind både redusere og øke snølastene på et tak i forhold til den karakteristiske marklasten. Fenomenet skyldes erosjon av snø, og er i eurokoden uttrykt gjennom eksponeringskoeffisienten C_E . Både C_T og C_E er angitt som forholdet mellom taklaster og marklaster. Ifølge Tabell 3 skal vindutsatte områder redusere taklastene med 20 %, mens

skjermete områder skal øke taklastene med 20 %. Resultatet ville i virkeligheten gitt ekvivalente endringer i snødekkets absorpsjonspotensiale, som videre ville påvirket C_T verdien. I denne oppgaven er derimot effekten av snødriver ekskludert fra modelleringene.

Jordvarmen er ofte det minste energitilskuddet som vurderes i energibalansen på bakken. Allikevel har varmetilskuddet en vesentlig relevans for hvor mye snø som akkumulerer på bakken. I denne oppgaven er jordvarmen konstant lik 2 W/m^2 . Antakelsen er svært generell ettersom jordvarmen i virkeligheten avhenger av flere ulike parametere som årstid, lokalitet og bakketype. Tidligere studier gjort i klimasoner tilsvarende de norske, viser at jordvarmen kan variere mellom 25 og -20 W/m^2 i vintersesongen (Ogée et al., 2001). Studiet er gjennomført i Bordeaux i Frankrike, hvilket har samme klimaklassifiseringen som Bergen. De store variasjonene i indusert jordvarme kan også skape store variasjoner i C_T .

Med homogent snødekke antas det at alle bestanddeler av snø og vann er jevnt fordelt. I realiteten vil fordelingen være mye mer komplisert og variert, som følge av interne variasjoner i snødekkets massetetthet, temperatur, metamorfose og fysiske egenskaper. Effekten disse variablene har på snøens egenskaper er nærmere beskrevet i kapittel 2.3.6.

I tillegg antas det konstante inne-temperaturer og U -verdier for hele simuleringsperioden. Hensikten er å forenkle beregningene av takets varmetransport. I virkeligheten vil inne-temperaturene variere avhengig av tidspunkt på døgnet, årstid og brukerens preferanse. I tillegg vil byggets dynamiske U -verdi variere over året i ulikt klima, grunnet naturlige variasjoner i den relative fuktigheten. Dette er spesielt aktuelt for eldre bygg i tre grunnet trevirkets evne til å oppta fukt og samtidig avgi energi i form av varmestråling. Denne egenskapen kalles for «hygrotermisk masse», og vil i praksis bedre U -verdien til bygget. På motsatt side vil den isolerende egenskapen til isolasjonsmaterialer avta over tid når bygget eldes.

Som vist i Tabell 16 er det også store variasjoner mellom modellerte femtiårslaster og de karakteristiske snølastene. Årsaken kan være topografiske og klimatiske variasjoner innenfor de definerte caseområdene, beskrevet i kapittel 3.3.1. I tillegg er de karakteristiske snølastene konstruert i 2008 for områder sentralt i kommunesentrene. I takt med dagens globale klimaendringer er ikke disse verdiene nødvendigvis gode gjengivelser av virkeligheten lenger. Som vist er de simulerte femtiårslastene noe lavere enn de karakteristiske lastene, hvilket kan antyde en generell reduksjon i snølast.

Overnevnte forenklinger gjør at oppgavens resultater ikke er perfekte gjengivelser av virkeligheten. Resultatene representerer dog en tilnærming av virkeligheten, som i analyse av den termiske koeffisienten kan anses som legitime. Av de overnevnte forenklingene anses snødriver som følge av vind, variasjoner i bakkens varmefluks og klimatiske variasjoner innenfor caseområdene å ha størst effekt på C_T .

7 Konklusjon

Målet med denne oppgaven har vært å vurdere dagens krav til fastsettelse av C_T , samt undersøke hvordan ulike parametere påvirker den akkumulerte snømengden på tak. I tillegg har oppgaven hatt som mål å kartlegge hvordan den termiske koeffisienten varierer for ulike bygninger i ulikt klima, samt foreslå en transparent og enkel metode for fastsettelse av koeffisienten.

For forskningsspørsmål 1 viser korrelasjonsanalysene at både vindhastigheten, luftens relative fuktighet og mengden akkumulert flytende nedbør har en signifikant effekt på C_T verdiens størrelse. Av disse parameterne har akkumulert flytende nedbør den største effekten. Dette skyldes snødekkets evne til å absorbere regnvann. Mengden absorbert regnvann er størst på tak over fryselaagre med høy U-verdi (hvilket gir høyest C_T) og minst på tak over boligbygg med høy U-verdi (hvilket gir lavest C_T).

For forskningsspørsmål 2 anbefales ingeniører å benytte de tabulerte C_T verdiene i Tabell 19 ved prosjektering, gjengitt nedenfor. Tabellverdiene er lette å anvende, konservative å bruke samt anvendbare for hele Norge. For boligbygg med glasstak benyttes formel 35 for å bestemme C_T . Formelen er mer realistisk og litt mer konservativ enn modellen presentert i ISO4355. For andre land indikere resultatene at C_T kan variere fra Tabell 19.

Tabell 20. C_T faktorer for ingeniører

| Taktype – [U-verdi] | Bolig | Fryselager | Tak uten vegger & kjølelaagre |
|---------------------|-----------|------------|-------------------------------|
| Passivhus - [0,09] | 1,0 | 1,1 | 1,0 |
| TEK17-hus - [0,13] | 1,0 | 1,2 | 1,0 |
| 1980-hus - [0,46] | 0,9 | 1,3 | 1,0 |
| Glasstak - [1,2] | Funksjon* | | |

$$*C_{T \text{ glasstak}}(S_{k50}) = -0,04 * \ln(S_{k50}) + 0,7473$$

For forskere anbefales det å benytte de multiple regresjonsanalysene i fastsettelse av C_T som framkommer i kapittel 4.5. Analysene forutsetter en del databehandlingsferdigheter, men kan allikevel være aktuelle som verktøy for forskningsrelaterte arbeider eller for standardiseringsorganer.

For forskningsspørsmål 3 forventes de fremtidige C_T verdiene i Oslo og Bergen å reduseres for fryselaagre og øke for boligbygg som følge av global oppvarming. I Tromsø vil derimot C_T verdien øke for fryselaagre og reduseres for boligbygg.

7.1 Videre arbeid

1. Studere effekten innetemperaturer like under 0°C har for C_T

I denne oppgaven ble det ikke undersøkt hvilke virkninger innetemperaturer rett under 0°C har for C_T . I praksis opererer flere konvensjonelle bygg med slike innetemperaturer, f.eks. skøytehallen. Ifølge prEN1991 anbefales det å bruke $C_T = 1,2$ for alle konstruksjoner med innetemperatur lavere enn under 0 °C. Mistanken er at denne verdien blir for konservativ for slike bygg, siden denne C_T faktoren også hensyntar fryselaagre. I den amerikanske standarden opereres det med $C_T = 1,1$ for konstruksjoner med operasjonell innetemperatur like under 0°C.

2. Studere innvirkningen vind har på akkumulert nedbør og C_T

Siden absorpsjonspotensialet til ett snødekke er proporsjonalt med det totale snøvolumet, vil den totale mengden akkumulerte nedbør avhenge av alle faktorer som påvirker snøvolumet. Vind er en av disse faktorene, som ifølge NS-EN 1999-1-3 kan både øke og redusere taklasten med 20 %. I denne analysen er ikke snødriver som følge av vind hensyntatt, selv om dette kan ha stor innvirkning på mengden absorbert nedbør. Videre vet vi at mengden absorbert nedbør har stor innvirkning på C_T verdiens størrelse. Av den grunn er det interessant å studere innvirkningen vind har på akkumulert nedbør og C_T .

3. Kvantifisere usikkerhetene ved klimaframskriving og C_T

Som følge av global oppvarming forventes det mer ekstremvær i fremtiden. Som beskrevet i oppgaven kan dette føre til både større og lavere snølaste i Norge. I tillegg spås mer vind og mer nedbør. Spørsmålet er hvordan dette vil påvirke den termiske koeffisienten. Kvantifisering av framtidige klimaparametere samt effekten dette har på C_T verdien anbefales studert i videre arbeid. Det ideelle resultat hadde vært å konstruere ett sett med klimaframskrevne C_T verdier. En enkel oppgave er det nok likevel ikke, da klimaframskriving er et komplisert arbeid.

8 Referanser

- ASCE 7-16. (2017). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*.
- Blöschl, G. & Kirnbauer, R. (1991). Point snowmelt models with different degrees of complexity -- internal processes
- Byggforskserien. (2019). *Takkonstruksjoner*.
- CEN/TC 250. (2020a). *Eurocode 1 – Actions on structures – Part 1-3: General actions – Snow loads*.
- CEN/TC 250. (2020b). *prEN 1991-1-3:2020*.
- climate-data.org. (u.å.). *KLIMA: NORGE*. Tilgjengelig fra: <https://no.climate-data.org/europa/norge-38/> (lest 25.10.2021).
- Côté, J., Rahimi, M. & Konrad, J. (2012). *Thermal conductivity of compacted snow. Proceedings of the 15th International Specialty Conference on Cold Regions Engineering*. Canada: American Society of Civil Engineers (ASCE).
- DiBK. (2017). *Byggteknisk forskrift (TEK17) med veiledning*. Tilgjengelig fra: <https://dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/14/14-1/> (lest 28.10.2021).
- Dyrørdal, A. V., Saloranta, T., Skaugen, T. & Strandén, H. B. (2013). Changes in snow depth in Norway during the period 1961–2010. *Hydrology Research*, 44 (1): 169-179. doi: 10.2166/nh.2012.064.
- ECMWF. *ERA5*. Tilgjengelig fra: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>.
- Edvardsen, K. I. & Ramstad, Ø. T. (2014). *TREHUS HÅNDBOK*: SINTEF akademisk forlag.
- ESCIMO.spread (v2). (2016). *ECIMO (Versjon 2)*. Programvare.
- Frimannslund, I. (2017). *Measurements and analysis of snow load reduction on flat roofs using a photovoltaic system in heating mode*. Masteroppgave. Ås: Norges miljø- og biovitenskapelige universitet. Tilgjengelig fra: <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/handle/11250/2464310>.
- Frøslie, K. F. (2018). Regresjonsanalyse. I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/regresjonsanalyse>.
- Frøslie, K. F. (2020). Korrelasjon. I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/korrelasjon>.
- Hersbach, H. & al., e. (2020). *The ERA5 global reanalysis*: Royal Meteorological Society. Tilgjengelig fra: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/qj.3803>.
- ISO/DIS 4355. (2012). *Bases for design of structures — Determination of snow loads on roof*.
- Kommunal- og moderniseringsdepartementet. (1980). *Endringer i byggeforskrifter*: Lovdata. Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/contentassets/9dcd44af30c744ea999f0d122fdc1c3c/lti-forskrift-1980-11-04-1.pdf>.
- Kottek, R. & Rubel, F. (u.å.). *WORLD MAPS OF KÖPPEN-GEIGER CLIMATE CLASSIFICATION*. I: 11.10.2021 (red.). Tilgjengelig fra: <http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/present.htm>.
- Male, D. H. (1980). *Dynamics of snow and ice masses*. The seasonal snowcover Burlington: Elsevier Inc.
- Mamre, M. O. (2020). *AOS341 - Kvantitative metoder*. Canvas: NMBU.
- Marke, T., Mair, E., Förster, K., Hanzer, F., Garvelmann, J., Pohl, S., Warscher, M. & Strasser, U. (2016). *ESCIMO.spread (v2): parameterization of a spreadsheet-based energy balance snow model for inside-canopy conditions* (lest 25.10.2021).
- Meteorologisk Institutt. (2017). *Det blir varmere*. Tilgjengelig fra: <https://www.met.no/vaer-og-klima/hvordan-blir-vaeret-i-framtiden> (lest 12.11).
- Meteorologisk Institutt. (2021). Tilgjengelig fra: <https://cryo.met.no/en/snow-depth-products>.

- Mørk, M. I. (2014). *Byggeskikk og byggeteknikk fra ulike perioder*. Tilgjengelig fra: <https://docplayer.me/16904348-Byggeskikk-og-byggeteknikk-fra-ulike-perioder.html> (lest 24.10.2021).
- Nesje, A. (2021). Is (vann i fast form). I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/is - vann i fast form>.
- Nuijten, A. (2018). *The thermal conductivity of amelting snow layer and its effecton temperature prediction modelling of heated pavements*. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology.
- Ogée, J., Lamaud, E., Brunet, Y., Berbigier, P. & Bonnefond, J.-M. (2001). A long-term study of soil heat flux under a forest canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 106 (3): 173-186. doi: 10.1016/S0168-1923(00)00214-8.
- Ormestad, H. (2019). Varmegjennomgang. I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/varmegjennomgang>.
- Pedersen, B. (2017). Fordampingsvarme. I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/fordampingsvarme>.
- Pedersen, B. (2019). Varmekapasitet. I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/varmekapasitet>.
- Pedersen, B. (2020). Faseovergang. I: *Store norske leksikon* Tilgjengelig fra: <https://snl.no/faseovergang>.
- Pedersen, B. (2021). Sublimasjon. I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/sublimasjon>.
- Rokka, L. (2021). *Shiny weather data*. Tilgjengelig fra: <https://shinyweatherdata.com/>.
- Standard Norge. (2008a). *Laster på konstruksjoner Del 1-3:Allmenne laster Snølaster*.
- Standard Norge. (2008b). *Nasjonalt tillegg NA Nasjonalt bestemte parametere ved bruk av NS-EN 1991-1-3 i Norge*.
- Tipler, P. A. & Mosca, G. (2008). *Physics For Scientists and Engineers*. New York: W.H. Freeman and Company.
- UIO. (2019). *Gumbelfordelingen*. Tilgjengelig fra: <https://www.mn.uio.no/ibv/tjenester/kunnskap/plantefys/matematikk/gumbelfordeling en.html> (lest 02.11.2021).
- Wikipedia. (2021). *U-verdi*. Tilgjengelig fra: <https://no.wikipedia.org/wiki/U-verdi>.



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway