

Martin Berg

Kompakte tak med utvendig nedløp

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk

Veileder: Tore Kvande

Medveileder: Erlend Andenæs

Januar 2023

NTNU
Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for bygg- og miljøteknikk



Kompakt tak med utvendig nedløp (Ragnar Hartvig)

Martin Berg

Kompakte tak med utvendig nedløp

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk
Veileder: Tore Kvande
Medveileder: Erlend Andenæs
Januar 2023

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for bygg- og miljøteknikk



Kunnskap for en bedre verden

TBM4900 2022
BYGNINGS- OG MATERIALTEKNIKK

Masteroppgave

Kompakte tak med utvendig nedløp

Martin Berg

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet ved Institutt for Bygg- og miljøteknikk ved Norges teknisk naturvitenskapelige universitet (NTNU) i samarbeid med Senter for Forskningsdrevet Innovasjon, Klima 2050. Oppgaven er skrevet innenfor hovedprofilen Bygnings- og materialteknikk og fokuserer på bygningsteknikk og klimaforhold. Hovedveileder har vært professor Tore Kvande.

Problemstillingen i oppgaven tar fortsetter på et arbeid som ble startet i 2019, omkring kompakte tak og muligheten og risikoen ved utvendig nedløp som tiltak for overvannshåndtering. Mye av grunnlaget ble lagt av en god, Vegard Skagseth, i 2020. Overvannshåndtering i byer er et område som kan bli utfordrende med tiden som følge av mer ekstremvær og økt urbanisering. Utvendige nedløp fra tak kan være et tiltak for å håndtere overvann i enkelte deler av landet, men løsningen er utsatt for frost og kan derfor bare brukes i enkelte områder med riktig klima. Denne oppgaven ser på hvor disse områdene kan være gjennom å se på historiske værdata og snøens oppførsel på taket.

I oppgaven er det analysert store datamengder ved hjelp av dataprogrammer, kodet i Python og C++, og senere ArcGis Pro for å få visuelle resultater. Koding og databehandling er ikke av mine sterkeste sider, men med støtte fra gode venner har det gått.

Med dette, vil jeg stor takk til Vegard Skagseth, som ikke bare er en god venn, men også har lagt et godt datagrunnlag som jeg har fått bygge videre på, samt vært en god støtte underveis i prosjektet. Tusen takk også til medveileder Erlend Andenæs (Klima 2050) for all støtte og veiledning gjennom hele prosjektet. Takk til Erlend Finstad for mange hyggelig kvelder med koding. Takk også til familie og øvrige venner for tålmodighet, moralsk støtte og bidrag med korrekturlesing.

Sist, men ikke minst, stor takk for veileder Tore Kvande, for gode diskusjoner underveis, oppfølging, engasjement og ikke minst tålmodighet. Tusen takk for flotte øyeblikk på kontoret. Jeg er svært takknemlig for at jeg fikk lov til å skrive oppgaven for Klima 2050 og at jeg fikk lov til å sitte på et kontor og være på lag med så mange flinke forskere.

Martin Berg



Trondheim 2022

Sammendrag

I denne oppgaven er det sett på utfordringer og muligheter for kompakte tak med utvendig nedløp. Problemstillingen dukker opp i et grensesnitt mellom bygningsfysikk og urbane vannsystemer, der krav til overvannshåndtering gjør det nødvendig å lede takvann bort fra bygningskroppen. Den konvensjonelle løsningen for bortledning av takvann fra kompakte tak benytter innvendige taknedløp koblet på overvannsnettet. Innvendig nedløp er en frostsikker løsning, men bidrar til overbelastning av overvannsnettet ved kraftige regnskyll, noe som blir stadig vanligere som følge av klimaendringer. Snø og is vil i hovedsak være årsaken til bygningstekniske utfordringer for utvendig nedløp. I dag er det ikke klart definert i regelverk eller veiledninger hvor løsningen med utvendige nedløp fra kompakte tak kan benyttes uten altfor stor risiko for isdannelse, men det åpnes for at løsningen kan benyttes i “kystklima”, uten videre presisering.

Med utgangspunkt i empiriske beregningsmodeller for snøsmelting og gjenfrysning, sammen med historiske værdata fra Norge, er det utviklet en modell for å beregne hvor i Norge klimaet åpner for bruk av utvendig nedløp. Oppgaven bygger videre på tidligere studier av problemstillingen, og fortsetter arbeidet påbegynt i masteroppgaven til Vegard Skagseth (2021) med å utvikle en modell for risikovurdering. Første del av oppgaven gjør en kvalitativ vurdering og en sensitivitetsanalyse av modellen til Skagseth. Videre blir Skagseths modell videreutviklet gjennom flere trinn, og utfordringer avdekket med modellen forsøkt løst. Det blir gjort vurderinger parameterne som velges, ulike modeller for værdata og sett på klimautvikling. Den endelige modellen, tar utgangspunkt i serier med værdata fra geografiske plasseringen, som sammen med valgte parameterverdier og risikomatrixe tilegner risikoverdi for isdannelse og dermed om det er ugunstige eller gunstige forhold for utvendig nedløp på den valgte plasseringen.

For å teste modellen ble det hentet ned værdata fra Rogaland med omegn, fra 1980 til 2020. Gjennom å kjøre modellen med ulike parametre ble det funnet enkelte områder som kan regnes som relativt “sikre”. Det ble også sett på hvordan endrede forutsetninger påvirker hvilke områdene som vil være “sikre”. For vurdering av trender og variasjoner ble det sett på værdata fra en rekke byer og tettsteder omkring i landet. Her ble det sett hvordan været spriker enkelte år til tross for synkende trender og færre dager med snø.

Fra de visuelle resultatene og det undersøkte området, ble det sett at grenser mellom områdene med ulik risikoverdi kunne samsvare med grensene Köppen-Geigers klimaklassifiseringsmodell. Områder som betegnes som *temperert klima*, tilsvarer områder modellen kategoriserer som “akseptabelt lav risiko” for isdannelse, mens *kontinentalt klima* og *arktisk klima* gir høyere risiko. Det kan derfor se ut til at Köppen-Geiger-klassifiseringen kan benyttes til forenklete vurderinger av egnetheten av utvendige nedløp fra kompakte tak. Videre undersøkelser av større områder er nødvendig for å se om likheten stemmer for hele landet og for å vurdere risikoen ved parameterne som er brukt.

Summary

This thesis presents an assessment of compact roofs with external drainage systems. Challenges arise at the interface between building physics and urban water systems, where requirements for storm water management mandate to lead roof water away from the building body. The conventional drainage solution for compact roofs uses internal drains connected to an underground stormwater drainage network. Internal drains are a frost-proof solution, but contribute to overloading the local stormwater drainage network during heavy downpours - something that is becoming increasingly common as a result of climate change. However, for external drainage systems, snow and ice will be a cause of structural challenges and icicle formation. It is currently not clearly defined in regulations or guidelines where the solution with external drainage systems from compact roofs can be used without too great a risk of ice formation, but they are open to the possibility that the solution can be used in a *coastal climate*, without further clarification.

Based on empirical calculation models for snow melting and refreezing, together with historical weather data from Norway, a model has been developed to calculate which locations in Norway the climate allows use of external drainage systems. The thesis builds on previous studies of the issue, and continues the work begun in Vegard Skagseth's master's thesis (2021) of developing a model for risk assessment. The first part of the thesis makes a qualitative assessment and a sensitivity analysis of the model developed by Skagseth. Furthermore, development of the model has been made through several steps. The final model is based on series of weather data from geographical location, which along selected parameter and a risk matrix acquires a risk value for ice formation and thus whether there are unfavorable or favorable conditions for external runoff at the selected location.

To test the model, weather data was downloaded from Rogaland and its surroundings, from 1980 to 2020. By running the model with various parameters, certain areas were found that can be considered relatively "safe". It was also looked at how changed assumptions affect which areas will be "safe". To assess trends and variations, weather data from a number of cities and towns around the country was looked at. Here it was seen how the weather varies in some years despite declining trends and fewer days with snow.

From the visual results and the investigated area, it was seen that boundaries between the areas with different risk values could correspond to the Köppen-Geiger climate classification model boundaries. Areas designated as *temperate climate* correspond to areas the model categorizes as having an "acceptably low risk" of ice formation, while *continental climate* and *arctic climate* present a higher risk. It may therefore appear that the Köppen-Geiger classification can be used for simplified assessments of the suitability of external downspouts from compact roofs. Further investigations of larger areas are necessary to see if the similarity is true for the whole country and to assess the risk of the parameters used.

Innhold

Forord	i
Figurer	vi
Tabeller	viii
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problemstilling	3
1.3 Formål	4
1.4 Avgrensning	5
2 Teoretisk grunnlag	6
2.1 Kompakte tak	6
2.2 Byggskader på kompakte tak	10
2.3 Klima i Norge	13
2.4 Klimaendringer	15
2.5 Værdata	17
2.6 Modell utarbeidet av Skagseth (2021)	19
2.7 Kunnskapshull	21
3 Metode	22
3.1 Trinn 1: Kvalitativ vurdering og sensitivitetsanalyse	23
3.2 Trinn 2: Endre datagrunnlag fra timesdata til døgndata med sammenligning	25
3.3 Trinn 3: Vurdere alternative databaser	26

3.4	Trinn 4: Hente ned data fra seNorge og vurdering av data	27
3.5	Trinn 5: Produsere datasett og sensitivitetsanalyse	29
3.6	Trinn 6: Genere kart og sammenligning	32
3.7	Trinn 7: Se på trender og utvikling og konsultering med forskningslitteratur	33
4	Resultat	36
4.1	Trinn 1: Kvalitativ vurdering av modellen til Skagseth	36
4.2	Trinn 2: Endre timesdata til døgndata og sammenligning av timesdata og døgndata .	42
4.3	Trinn 3: Vurdering av alternative databaser	45
4.4	Trinn 4: Data fra SeNorge og vurdering av modellen	46
4.5	Trinn 5: Produsere datasett og sensitivitetsanalyse	47
4.6	Trinn 6: Generere kart og tabeller sammenligning med klimasoner	48
4.7	Trinn 7: Trender og utvikling	53
5	Diskusjon	56
5.1	Hvilke begrensinger, usikkerhetsmomenter og forbedringsområder har modellen til Skagseth?	56
5.2	Hvordan kan modeller gi mer dekkende data for å vurdere risiko for isdannelse i kompakte tak med utvendig nedløp?	58
5.3	Hvordan har klimautvikling påvirket risiko for isdannelse i kompakte tak med utvendig nedløp?	61
6	Konklusjon	64
	Referanser	66

Figurer

1	Klimasoner i Norden inndelt etter Köppen-Geigers klimaklassifisering (Thodesen et al., 2018a)	1
2	Vanlige taktyper. Figur er hentet fra Byggforskserien 525.002 (2018)	3
3	Ulike typer kompakte tak. Figur hentet fra Byggforskserien 525.207 (2018)	6
4	Snøsmelting på kompakte tak ved negative utetemperatur. Figur av Erlend Andenæs	7
5	Utførelse av sluk i renner. Figur hentet fra Byggforskserien 525.207 (2018)	8
6	Skadeomfang per taktype (Bunkholt and Gullbrekken, 2021)	10
7	Frysing i nedløp medfører isdannelse. Figur hentet fra Byggforskserien 725.118 (2012)	11
8	Köppen-Geiger Klimaklassifisering av Norge (Peterson, 2016)	15
9	Befolknings tetthet i Norge (KDD, 2019)	16
10	Stasjoner med døgndata til venstre og timesdata til høyre	18
11	Diagram med risiko for snøsmelting og isdannelse, laget av Skagseth (2021). Risiko- soner illustrert konseptuelt til høyre og som brukt i beregninger til venstre. Venstre diagram forutsetter gitte verdier for parameterne innetemperatur, takets varmegjen- nomgangskoeffisient og snøens varmekonduktivitet	20
12	Flytskjema for metode	22
13	Området som er analysert rundt Rogaland. Kart hentet fra SeNorge sin snømodell for år 2020 og modifisert	29
14	Frysetemperatur $-3^{\circ}C$ varmekonduktivitet snø $\lambda_s = 0,12$	31
15	Soneinndeling for analyse av historiske værdata fra byer rundt i landet. Her illustrert med varmegjennomgangskoeffisient for tak lik $0,18W/m^2K$, snøens varmekondukti- vit, λ_s , henholdsvis $0,06W/mK$ som nedre grense og $0,18W/mK$ som øvre grense .	34
16	Utklipp fra værdata fra Oslo i perioden 1. januar til 20. februar 1980. Hver kvad- ratkilometer i måleområdet gir en kolonne med data, med målepunkter i tid vist vertikalt. Ugunstige perioder dukker opp som røde felter	35
17	Modell for energibalanse i snølagene. Figur fra Zhou et al. (2018)	36

18	Stasjoner med timesdata i Trøndelag, (Skagseth, 2021)	39
19	Grafer som viser resultatene fra sensitivitetsanalysen	42
20	Resultater fra sensitivitetsanalyse	43
21	Gjennomsnitt av resultat for varmekonduktivitet per fylke	44
22	Median av resultat for varmekonduktivitet per fylke	44
23	Antall kvadratkilometer på kart i hvert risikotone ved ulike antakelser for inputpa- rametre	47
24	Forsøkt med ulik periode for gjenfrysning for antatt mest realistiske parameterverdier	48
25	Kartresultat for antatt mest konservative resultat	50
26	Kartresultat for antatt minst konservative resultat	51
27	Kartresultat for antatt mest realistisk resultat	52
28	Antall dager hvert år i risikosone R1 (høy risiko for isdannelse) i utvalgte byer	53
29	Antall dager hvert år i risikosone G4 (plussgrader og ikke snø på bakken) i utvalgte byer	54
30	Sammenligning av Koppen-Geiger klimasonkart (Peterson, 2016) og to klimakart med L18T3 og L18T5.6.	61

Tabeller

1	Årsmiddeltemperatur og dimensjonerende vintertemperatur for noen kommuner basert på normalperioden 1971-2000 (Thue, 2016)	14
2	Karakteristisk klimadata (årsmiddelverdier) for noen steder i Norge i normalperioden 1931-1960 (Thue, 2016)	14
3	Parametre undersøkt i sensitivitetsanalyse	25
4	Koordinater for Rogaland med omegn	28
5	Byer hvor værdata er hentet ned.	30
6	Parametrene brukt i Ligning 5. Parametrene beskrives matematisk i Zhou et al. (2018)	37
7	Parametrene brukt i Ligning 6. Parameterne beskrives videre i Nielsen and Claesson (2011)	37
8	Parametre listet ved fremstilling grafisk	40
9	Resultater fra sensitivitetsanalyse: Antall målinger i rød sone vises til venstre under hver parametervariant. Prosentandel av målinger i rød sone vises i venstre kolonne. .	41
10	Frysetemperatur døgn	43
11	Frysetemperatur timedata	43
12	Sammenligning av fire værmodeller	45

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Norge er et langstrakt land med store topografiske forskjeller og variasjoner i klima (Lisø, 2007). Mens det er badetemperatur i sør, kan det være behov for både ett og to lag med ull under jakken i nord (Rostad, 2020; Hosøy, 2022). Selv med snø og hvite daler i øst, kan det være bart og vått i vest (Tegnander, 2021). På et overordnet nivå kan klimaet i Norge deles inn i tre soner: *Maritimt temperert klima*, *kontinentalt klima*, og *polart klima*. Figur 1 viser hvordan sonene er fordelt i Norge og Norden. Innenfor områder kan det også være lokale variasjoner i klima. Det kan for eksempel være snø i skogen mens det er bart i byen. Alt fra høydeforskjeller, topografi og vegetasjon vil være av betydning for hvordan klimaet utspiller seg (Andenæs et al., 2018; Thodesen et al., 2018a).



Figur 1: Klimasoner i Norden inndelt etter Köppen-Geigers klimaklassifisering (Thodesen et al., 2018a)

Klimaet er imidlertid i stadig endring og med tiden vil endringene skje raskere og forskjellene vil bli større i landet (Lisø, 2007). I løpet av de siste 100 årene har den gjennomsnittlige nedbøren i Norge økt med 20 % (Hanssen-Bauer et al., 2015). For de neste 50 årene er det enkelte steder i Norge regnet med en økning på ytterligere 20 % (Lisø, 2007). FN's klimapanel anslår at ekstremnedbør i form av styrtregn vil øke med 7 % i intensitet per 1 °C økt temperatur (Masson-Delmotte, 2021).

Med dagens utslippstak, forventes en gjennomsnittstemperatur 1,5 grad høyere enn den er i dag, i løpet av de neste 20 årene (Masson-Delmotte, 2021; Lisø, 2007). Dette vil bety at fremtidens bygg og byggemetoder, så vel som regelverk og anbefalinger, må ta høyde for endringene som skjer og tilpasse seg fremtidens krav og mål.

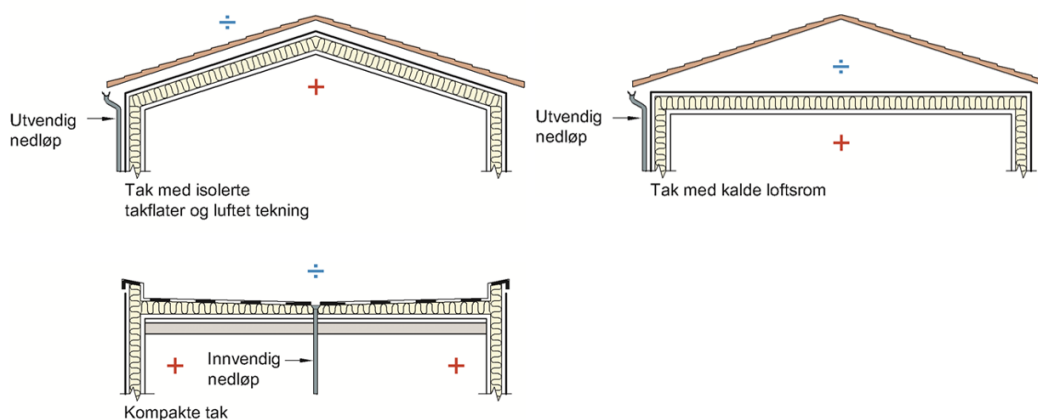
Foruten klimaendringene, skjer det i stor grad urbanisering og fortetting av byer og tettsteder (Flæte, 2010; Hafskjold et al., 2012). Fortetting av byer og tettsteder fører til at overflater som naturlig har håndtert overvann blir færre og mindre permeable (Taguchi Vinicius J. et al., 2019; Thodesen et al., 2018a). Overvannsnettene i byene og tettstedene er ofte dimensjonert for et klima med styrtregnperioder som er mindre intense enn det som er ventet i framtiden (Becker et al., 2016). Flere byer opplever allerede at kapasiteten overstrides (Jørgensen, 2020; KMD, 2015). Med hyppigere og kraftigere styrtregnperioder og økt urbanisering vil kapasiteten oftere overstiges. Når kapasiteten overstiges, vil overvannet finne andre veier, veier som kan føre til skade på bygg og infrastruktur. Større oppgraderinger av overvannsnettene vil ofte være vanskelig å gjennomføre, svært kostbart og tidkrevende (KMD, 2015). Skader som følge av et underdimensjonert overvannssystem kan på den andre siden også bli svært kostbare.

I byer kan takflater utgjøre flere titalls prosent av det bebygde arealet (Stovin et al., 2012). En løsning for å avlaste overvannsnettene er å koble nedløp fra tak av overvannsrørene og i stedet føre det ut på bakkeplan, gjennom såkalt lokal overvannshåndtering (LOH) eller lokal overvannsdisponering (LOD) (Thodesen et al., 2018a). Gjennom å lede regnvannet ut på bakkeplanet, kan vannet infiltreres og fordrøyes i terrenget gjennom for eksempel overvannsbed og hager og dermed håndteres eller forsinkes før det sprenger kapasitet på overvannsnettene (Becker et al., 2016).

Ønskene om å lede takvann ut på bakkeplan istedenfor rett ut på det kommunale ledningsnettene blir stadig sterkere. Norsk Vann gav i 2012 føringer for planbestemmelser for overvannshåndtering. Her ble det stilt krav til overvannshåndtering som påkrevd grunnlag for detaljutføring og prosjektering av bygg, sammen med tilbakeføring av overvann til grunnen (Sekse, 2012). Av disse grunnene er det mange steder blitt forankret i lokale byggebestemmelser om krav til nybygg at takvann skal ledes ut på terreng. Eksempler er Oslo Kommune (2017), Ringerike Kommune (2018) og Lørenskog, Rælingen og Skedsmo kommune (2017). I praksis betyr dette at takene må bygges med utvendig nedløp som har utkast på terreng eller i infiltrasjonskum (Thodesen et al., 2018a).

Å tilpasse utvendig nedløp til lokal overvannshåndtering er en enkel, billig og svært effektivt tilpasning, ifølge flere nyere studier (Becker et al., 2016; Carmen N. B. et al., 2014; Carmen et al., 2016; Taguchi Vinicius J. et al., 2019; Jiang et al., 2019). Om våren, sommeren og høsten vil store regnmengder være den mest presserende utfordringen. Regnmengdene kan håndteres med tiltak som flomveger, kanaler, åpne overvannsløsninger med mer (Sekse, 2012). Det er først om vinteren og snøen kommer at det kan bli et problem med å bygge utvendig taknedløp (Andenæs et al., 2020). Ising og gjenfrysning kan både gi utfordringer med å lede overvannet ut på terreng, men det kan også oppstå utfordringer allerede når vannet skal ledes ned fra taket.

For luftede tak går det som oftest greit med utvendig nedløp, så lenge taket er godt nok isolert (Byggforskserien 525.002, 2018; Lstiburek, 2010). Luftstrømmene under taket hindrer snøen fra å smelte før det er plussgrader i luften, slik at snøen blir liggende. Fra luftede tak er utvendige nedløp ofte også den enkleste, billigste og foretrukne løsningen (Byggforskserien 525.002, 2018). For større bygninger der luftede skråtak vil gi urimelig store byggehøyder, og det heller brukes kompakte tak er utfordringen en annen (Byggforskserien 525.207, 2018). I kompakte tak vil de innvendige varmestrømmene fra oppvarmede rom ledes ut i undertaket og sørge for at snøen nærmest takets overflate smelter til tross for minusgrader i luften (Nielsen, 2019). På slike tak benyttes normalt innvendig nedløp for å sørge for at vannet dreneres uavhengig av utetemperatur. Å lede nedløp på utsiden av bygget for slike tak kan gi en rekke bygningstekniske utfordringer, som gjenfrysning i nedløp og mer. Taktypene er illustrert i Figur 2.



Figur 2: Vanlige taktyper. Figur er hentet fra Byggforskserien 525.002 (2018)

Det er likevel ikke alle deler av landet hvor det kommer nok snø og er nok kalde dager for at isdannelse i nedløpene skal være et problem. Både anbefalinger og krav åpner for *“at utvendig nedløp for godt isolerte kompakte tak kan være akseptabelt på steder med et kystklima der man vet sikkert at snølag på taket får meget kort varighet”* (Byggforskserien 525.002, 2018)). Hvor det er *kystklima* og hva som er *kort varighet* er ikke beskrevet og blir opp til hver enkelt utbygger å vurdere. Det er ikke blitt avdekket noen systematisk vurdering av hva slags parametre som gir et akseptabelt klima, og hvor i landet dette i så fall kan finnes. Derimot er det blitt funnet eksempler på at en slik veiledning er etterspurt av aktører i byggebransjen (Skagseth and Bunkholt, 2019a; Kvande and Bunkholt, 2020; Byggebolig.no, 2018).

1.2 Problemstilling

Vegard Skagseth (2021) skrev masteroppgave med tittelen *“Isdannelse i nedløpssystemer fra kompakte tak”*. I masteroppgaven ble det satt som mål å vurdere risiko for isdannelse på kompakte tak

med utvendig nedløp og herunder å undersøke hvilke forhold som gir snøsmelting og samtidig gjenfrysing av smeltevann. Gjennom vurdering av timesdata fra værdatabasen til Metrologisk institutt (Frost API), laget Skagseth en programkode som kunne returnere et vektet risikotall for snøsmelting og isdannelse. Ved å velge inputparameterne i modellen til forhold som fører til snøsmelting og isdannelse, skulle modellen gi en indikasjon på hvor i landet en løsning med utvendig nedløp kunne være hensiktsmessig. Metoden og datagrunnlaget som ble brukt i oppgaven var imidlertid ikke tilstrekkelig for å konkludere entydig.

Fra næringsaktørene i Klima 2050 er det et sterkt ønske om at problemstillingen med isdannelse i nedløpssystemer fra kompakte tak blir undersøkt videre (Kvande and Bunkholt, 2020). Målet er å fremskaffe et grunnlag for vurdering av hvor kompakte tak med utvendig nedløp kan bygges.

1.3 Formål

Denne oppgaven har til hensikt å fortsette arbeidet som ble startet av Skagseth (2021). Oppgaven har som mål å etablere en modell som kan illustrere hvor i landet kompakte tak med utvendig nedløp kan brukes uten ytterligere tiltak som for eksempel varmekabler. Som hjelp på veien med å etablere modellen, er følgende forskningsspørsmål og mål for oppgaven og modellen definert:

Forskningsspørsmål

1. Hvilke begrensinger, usikkerhetsmomenter og forbedringsområder har modellen til Skagseth?
2. Hvordan kan modeller gi mer dekkende data for å vurdere risiko for isdannelse i kompakte tak med utvendig nedløp?
3. Hvordan har klimautvikling påvirket risiko for isdannelse i kompakte tak med utvendig nedløp?

Mål for modellen

Det er satt som mål for modellen som utvikles, at den skal ta høyde for

- takets oppbygging, herunder takets varmegjennomgangskoeffisient
- byggets funksjon, herunder innetemperatur
- geografisk plassering, herunder utetemperatur og snødybde
- snøens oppbygging, gjennom snøende varmekonduktivitet
- endringer og hertil ta inn en tidsserie av temperatur og snødybde ved en gitt lokasjon og bruke dette for å gi indikasjon på risiko for isdannelse ved å bruke utvendig nedløp.

1.4 Avgrensning

Det er gjort avgrensninger av problemstilling for å holde arbeidsmengden på et moderat nivå. Innledende studier inkluderer enkle og begrensede litteratursøk for å undersøke under hvilke forhold det oppstår risiko for isproblematikk på kompakte tak. Mye av litteraturen er hentet fra bakgrunnsmaterialer og tidligere studier. Funnene blir brukt som utgangspunkt for risikovurderingene som gjøres, men blir vurdert nøye og begrensninger og usikkerhet beskrevet.

Opgaven tar kun for seg norsk klima med utgangspunkt i historiske data fra 1980 til 2022. I oppgaven er det kun brukt meteorologiske data fra værmodeller og værstasjoner. Dette er avanserte modeller med god dekning av landet, som er antatt å gi en forholdvis riktig resultat for Norge. Andre kilder for klimadata er vurdert gjennom litteraturstudium, men ikke funnet tilstrekkelige for bruk i modellen. Det blir også gjort evaluering av værdata og værdatabaser.

Fokuset i evaluering av værdata er isproblematikk som følge av utetemperatur, oppvarming innenfra og snømengde. utfordringer knyttet til nedbørsmengde og kapasitet på systemet for overvannshåndtering rundt bygningen, vil ikke bli vurdert. I bygningsfysiske beregninger, er det gjort forenklinger og antakelser om stasjonære forhold, så vel som for snøens- og takets oppbygning. Snøens varmekoefisient blir ikke forsøkt beregnet, men det er gjort vurdering av hvordan ulike verdier vil påvirke snøsmelting og isdannelse på tak. Det er likevel undersøkt ulike scenarier for å belyse variasjonen, utfallsrom samt påvirkningen endringer i varmekoefisient vil ha. Å beregne snøens varmekoefisient er en vanskelig oppgave, og vil bli opp til eventuelle senere studier å vurdere. Årsaksforhold for byggskader eller terskelverdier for når isdannelse fører til skader er ikke kartlagt i oppgaven.

I arbeidet med å utvikle modellen er det forsøkt å holde kontroll på antakelsene og forenklingene. Det er benyttet både kvalitative og kvantitative metoder i arbeidet. De kvalitative metodene er rettet mot vurderingene som er gjort i forkant og underveis i utarbeidelsen av modellen, mens modellen i seg selv er en kvantitativ metode. Modellen er utviklet ved hjelp av maskinkoder som henter ned, sorterer, bearbeider og vurderer data fra meteorologiske databaser. Det er som del av metodene, gjort valg som vil påvirke resultatene. Disse valgene er forsøkt begrunnet og forklart gjennom oppgaven.

Modellen som er utarbeidet benytter og produserer kart med oppløsningen $1 \times 1 \text{ km}^2$. Det vil være variasjoner innenfor et slikt område, men dette vurderes ikke. I modellen og oppgaven vurderes heller ikke prosjekt-spesifikke forhold som høyder på byggene, orientering, plassering med tanke på vind, sol og snøfordeling, størrelsen på tak, utforming, tekniske løsninger og avstand til sluk.

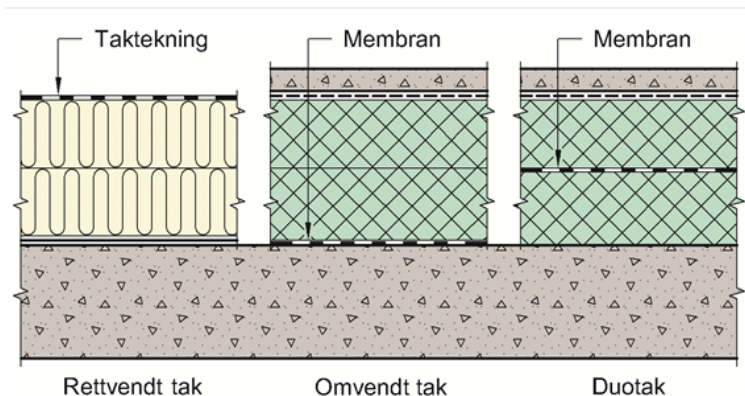
2 Teoretisk grunnlag

2.1 Kompakte tak

Tak utføres normalt på en av tre måter; 1) kompakte tak, 2) tak med isolerte takflater og luftet tekning, eller 3) tak med kalde loftsrom (Byggforskserien 525.002, 2018), som vist i Figur 2. Takene har hver sine bruksområder og begrensninger.

Kompakte tak, også kalt tak uten lufting, er en takform uten luftspalte mellom takisolasjon og taktekking (Byggforskserien 525.207, 2018). Denne taktypen er ofte flat, men det kan også bygges skrå tak og buede tak med kompakt oppbygging. Vanligvis regnes tak som flate dersom de har en takvinkel $< 6^\circ$, og skrå dersom vinkelen er $> 6^\circ$. Byggforskserien 525.207 (2018) beskriver oppbyggingen av kompakte tak med forskjellig utførelse, hvilke materialer som blir brukt som dampsperre, tekking, membran, varmeisolasjon og isolasjonsmaterialer, riktig fall, avrenning og plassering av sluk detaljer for tekking og tiltak for å ivareta brannhensyn, alt innenfor kravene i gjeldende Byggteknisk forskrift (TEK17) og Plan- og bygningsloven av 1986.

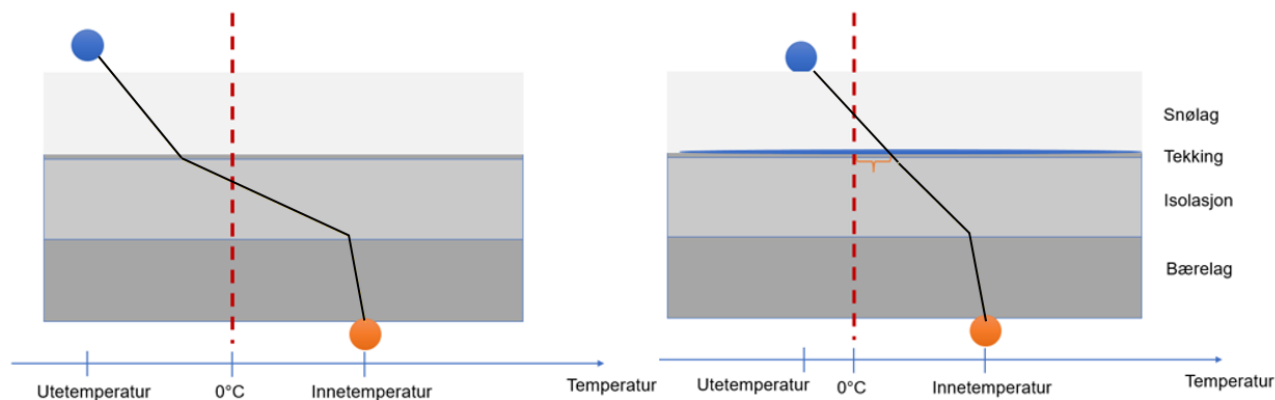
Fra Byggforskserien 525.207 (2018) anbefales en oppbygging av kompakte tak enten som *rettvendt tak*, *omvendt tak* eller *duotak*, som vist i Figur 3. Disse takene har hver sine bruksområder. *Rettvendt tak* er den mest utbredte løsningen og brukes på ulike underlag, på små og store tak, uten annen trafikk enn vanlig tilsyn og vedlikehold. *Omvendt tak* og *duotak* er til forskjell fra *rettvendt tak* bygget med et slitelag øverst og egner seg for tak med større påkjenning på takkonstruksjonen, som takterrasser og parkeringstak. *Duotak* er ofte noe billigere enn omvendt tak og brukes ofte ved etterisoleringsprosjekter og på tak med mindre og lettere trafikk. Overvann håndteres likt uavhengig av utforming.



Figur 3: Ulike typer kompakte tak. Figur hentet fra Byggforskserien 525.207 (2018)

Kompakte tak utnytter at materialsjiktene ligger tett sammen uten lufting mellom varmeisolerings- og taktekking. Dette gjør at kompakte tak over oppvarmede rom alltid er varme tak, til forskjell

fra luftede tak hvor luftspalten bidrar til å hindre at undertaket varmes opp. Varmegjennomgangen på kompakte tak gjør at overflaten på taket sjelden er under $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, noe som gjør at snø og is kan smelte selv når utelufttemperaturen er under $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dette er illustrert i Figur 4.



Figur 4: Snøsmelting på kompakte tak ved negative utetemperatur. Figur av Erlend Andenæs

Håndtering av overvann på kompakte tak

Kompakte tak har til forskjell fra tradisjonelle luftede tak, ingen mulighet for å tørke ut (Byggforskserien 525.002, 2018). Det er derfor viktigere å sørge for god avrenning og riktig utførelse for å hindre vanninntrengning og fuktproblemer. Fra TEK 17 § 13-12 stilles det krav til at “...tak skal prosjekteres og utføres med tilstrekkelig fall slik at regn og smeltevann renner av” (TEK17). Tak må også prosjekteres slik at “... nedbør, snøsmelting og ising ikke fører til skader på byggverket” § 13-12 (2). Veiledningen til TEK 17 (vTEK) gir videre utfyllende beskrivelse av kravene:

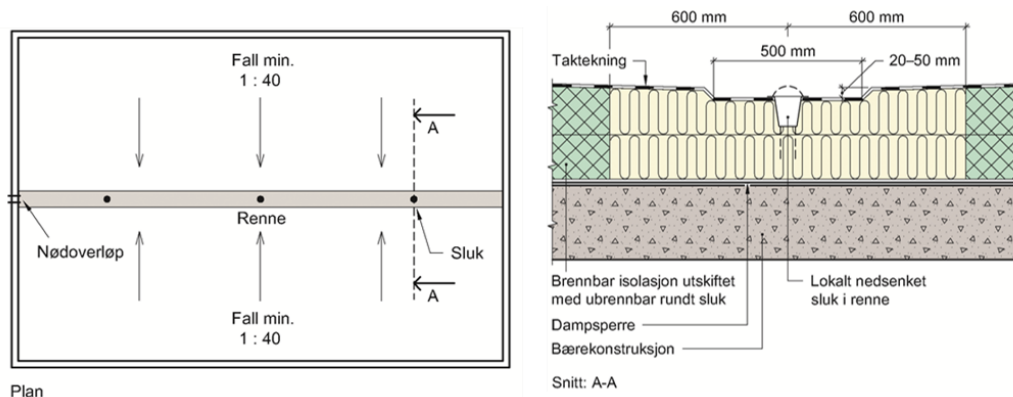
- “Vann som renner av taket, må ledes bort fra bygningskonstruksjonen ved hjelp av nedløpssystem eller på annen måte, slik at byggverket og tilliggende terreng ikke får skader”, vTEK punkt 4.
- “Nedløpssystemet må utføres slik at snøsmelting ikke gir skadelig ising”, vTEK punkt 5.
- “På tak uten lufting (kompakte tak) må smeltevann ledes fra kaldere til varmere deler av taket og dreneres bort fra nedløp som er forfritt uten bruk av varmekabler”, vTEK punkt 6.
- “Taket må utføres slik at vann kan renne av uten å trenge inn i konstruksjonen, selv om sluk eller nedløp blokkeres”, vTEK punkt 7.

For å overholde kravene i TEK 17 og vTEKs spesifiseringer om sikker drenering av smeltevann uten bruk av varmekabler, blir overvann fra kompakte tak tradisjonelt håndtert gjennom innvendige nedløp. Dette er løsningen SINTEF Byggforskserien sterkt anbefaler (Byggforskserien 525.207, 2018;

Byggforskserien 525.002, 2018; Byggforskserien 725.118, 2012). Utvendig nedløp fra kompakte tak er mindre vanlig, men er en løsning som kan brukes på godt isolerte kompakte tak “... på steder med et kystklima der man vet sikkert at snølag på taket får meget kort varighet” (Byggforskserien 525.207, 2018).

Innvendig nedløp

Med innvendig nedløp går overvannet gjennom en varm sone i bygningen før det kobles videre på lokalt avløps- eller overvannsnett i frostfri dybde (Hafskjold et al., 2012). Ved å lede overvannet gjennom varm sone hindres gjenfrysing. Taket konstrueres med fall mot sluket og leder vannet gjennom nedsenkede renner mot sluk som illustrert i Figur 5. Det er flere anbefalinger til fall både i stikkrenner og hovedrenner og til plassering av sluk på taket, for på den måten å sikre god avrenning. Mackinlay et al. (2000) gjorde gjennom en studie på kompakte tak en vurdering av plassering av sluk og innvendig nedløp. I studien ble det funnet fordeler med at nedløp ikke plasseres langs ytterkantene på taket, men heller nærmere midten for å sikre at varmen fra innsiden av bygget brukes for å holde nedløpene isfri. Riktig plassering av sluk sikrer god avrenning selv med svært lave temperaturer og hindrer isdannelsen og isproblematikk på taket.



Figur 5: Utførelse av sluk i renner. Figur hentet fra Byggforskserien 525.207 (2018)

Innvendig nedløp er imidlertid ikke helt problemfritt. Ulempene med innvendig nedløp er ofte knyttet til fuktproblematikk og usikkerhet om hva som skjer med overvannet fra taket på veg gjennom bygningskroppen. Når takvannet går gjennom bygningskroppen, ledes vannet gjennom områder hvor det er svært uønsket å ha vann (Gullbrekken et al., 2016; Andenæs et al., 2021a). Eventuelle lekkasjer på veien mot overvannsnettet kan være vanskelig å oppdage og medføre svært kostbare reparasjoner. Med innvendige nedløp må rørføringer tilpasses planløsning med sjakter og rominndeling som kan begrense frihet og bruk av bygget (Bøhlerengen, 2019).

Ulempen med innvendig nedløp er også knyttet håndtering av takvannet i overvannsnettet og at takvannet kan bidra til å overbelaste overvannsnettet ved store regnskyll (Stovin, 2010). Gjen-

nom å lede regnvannet gjennom bygningskroppen gir dette begrensede muligheter for å frikoble nedløp fra overvannsnett og dermed frigi kapasiteten i rørene (Becker et al., 2016). Alternative metoder for håndtering av overvann fra innvendig nedløp ved hjelp av fordrøyningsmagasin, som fordrøyningskassetter i bakken, er både kostbare og skjulte (Skagseth and Bunkholt, 2019a; Andenæs et al., 2021b). Innvendig nedløp med overgang til overvannsnett hindrer også regnvannet fra å opprettholde vannbalansen rundt bygningen i normale nedbørsperioder (Skagseth and Bunkholt, 2019a).

Utvendig nedløp

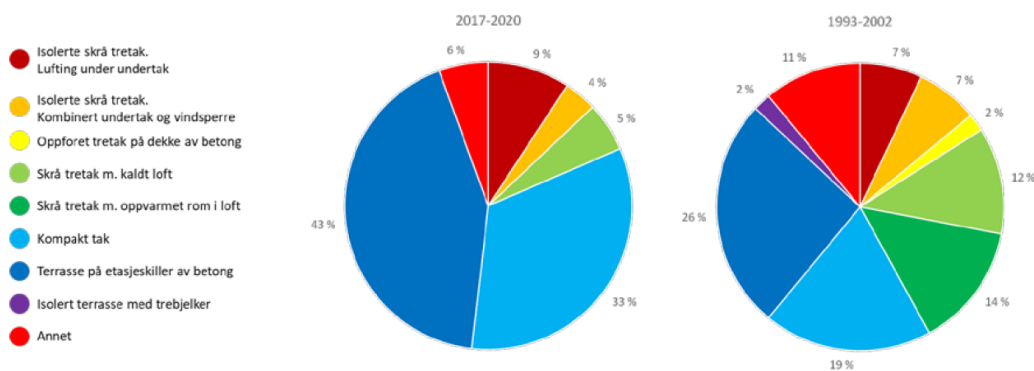
Utvendig nedløp er en mye brukt løsning på skrå tak (Byggforskserien 525.207, 2018). Med utvendig nedløp holdes overvannet utenfor bygningskroppen. Dette er ofte en mer kostnadseffektiv løsning og gir også enklere byggetekniske løsninger enn innvendige nedløp (Skagseth and Bunkholt, 2019a). Utvendig nedløp gir også løsningen flere muligheter til å fordrøye vann på bakkeplan før det sendes ut i ledningsnett (Skagseth and Bunkholt, 2019a; Thodesen et al., 2018a).

Selv om Byggforskserien 525.207 (2018) åpner for at løsningen kan brukes på kompakte tak på enkelte steder, gis det imidlertid ingen anbefalinger for hvordan løsningen skal utføres. Fra samme detaljen spesifiseres det at løsningen normalt ikke anbefales. Tidligere studier, som Andenæs et al. (2020) og Grynning et al. (2017) har imidlertid vist steder der løsningen med utvendig nedløp fra kompakte tak er brukt med heldig resultat. Det finnes ingen systematisk oversikt over tilfellene hvor det har gått bra og hvor det har oppstått skader.

I praksis er det flere ulike måter å utføre utvendig nedløp fra kompakte tak på og samtidig ta hensyn til risiko for isdannelse. I en studie utført av Skagseth and Bunkholt (2019a) på vegne av SINTEF ble flere større aktører intervjuet for å avdekke brukte løsninger. En av løsningene som ble avdekket var en hybridløsning, foreslått av Skanska, der smeltevann fra snø renner ned i et innstrupet innvendig nedløp som tar en begrenset mengde smeltevann, men som i tillegg bruker et utvendig nedløp. Det utvendige nedløpet tar hånd om de største mengdene vann fra snø som smelter når utetemperaturen er høy eller ved større regnskyll. En annen aktør (Protan) brukte løsninger med fall mot midten av taket og en nedsenket renne som ledet vannet gjennom parapeten og videre ut i et større nedløpsrør. Med et større nedløpsrør var tanken at det tar lenger tid før vannet i røret fryser til. Så lenge taket er godt isolert vil avrenningen i de kalde periodene bli mindre og så lenge de kalde periodene er korte nok, vil en slik løsning fungere også med minusgrader. En siste løsning fra Loro X som ble avdekket brukte både muffert, varmekabler, nedfelt sluk i isolasjon gjennom parapet og sluk som ligger rett på taktekkingen. Et slikt system skal ha høy kapasitet for håndtering av overvann (ShelbyTeknikkAS, n.d.).

2.2 Byggskader på kompakte tak

Byggskader står for betydelige utgifter for forsikringselskapene hvert år. Gjennom analyse av byggskader i over 60 år, har SINTEF utarbeidet et byggskadearkiv med viktig kunnskap om prosessforårsakede byggskader i Norge (Bunkholt and Gullbrekken, 2021). Skadesakene fra perioden 2017–2020 viser at inntrenging av vann er en gjentakende årsak til skader i bygningskonstruksjoner. Mer enn 40 % av de rapporterte skadene kan knyttes til nedbør. Skader på kompakte tak utgjør til sammen 3/4 av alle rapporterte takskader, se Figur 6 . Blant de vanligste årsakene til skader på kompakte tak, er vannlekkasjer eller fuktskader som følge av 1) tette nedløp på grunn av løv og rusk, 2) hull i taktekking, ofte på grunn av mekanisk påkjenninger, 3) ising ved raft, i renner og nedløp, 4) kondens som oppstår når fuktig inneluft strømmer opp i taket og blir avkjølt med lave temperaturer ute, og 5) kompliserte detaljer og andre komponenter på taket (Byggforskserien 725.118, 2012).



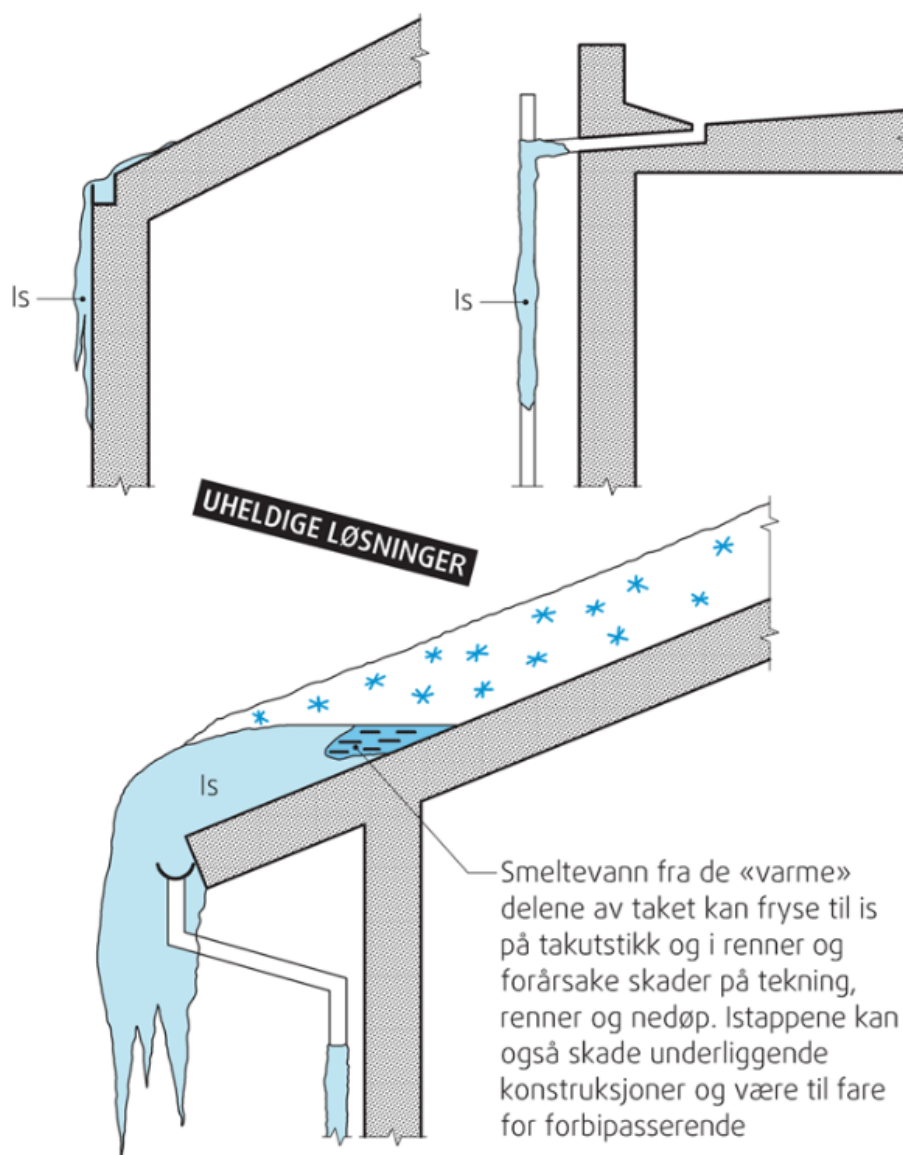
Figur 6: Skadeomfang per taktype (Bunkholt and Gullbrekken, 2021)

Isdannelse på kompakte tak med utvendig nedløp

Om vinteren er det særlig faren for isdannelse som kan gi byggskader, oppdemming av vann, inntrenging av vann i bygningen og ising på tak som er særlig kritisk. Også snølast og is kan medføre ekstra vekt når det ikke dreneres vekk, og kan i verste fall føre til bygningskollaps (Piroglu and Ozakgul, 2016). I forarbeidene til sin modell gjennomførte Skagseth (2021) et litteratursøk og egne studier på risiko rundt ising i nedløp fra kompakte tak (Skagseth, 2020). Her ble det sett på problemer knyttet til kompakte tak og snø på taket, isdannelse og herunder isdemninger og istapper, is i rør og særlig de fysiske forholdene som forårsaker smelting av snø og gjenfrysning.

Når snø smelter på tak og renner ned til et annet område som er kaldere enn frysepunktet til vann, vil det fryse igjen. Dette vil være tilfelle på kompakte tak med utvendig nedløp. Dersom isen hopper seg opp for eksempel som følge av tette rør Figur 7, kan det dannes demninger av is langs kanten av taket, som senere vil hindre smeltevann på de varmere delene av taket fra å dreneres.

Isdemninger som blokkerer dreneringen av smeltevannet, vil føre til stående vann på taket, som igjen kan trenge inn i utettheter og eller renne over oppbretten av taktekning langs parapet/vegg og føre til vannskader i bygget (Lstiburek, 2010; O'Rourke et al., 2010; Grange and Hendricks, 1976; Tobiasson et al., 1998; Nielsen and Claesson, 2011). Is rundt nedløpet kan også føre til dannelse av istapper, som ikke bare er uheldig for bygget, men også kan få alvorlige konsekvenser for liv og helse (Åstrand, 2010; Nielsen, 2005). Isdemninger kan også dannes rundt innvendige nedløp, men istapper vil ikke oppstå på samme måte med mindre vannet bygger seg opp til å renne ut av nødoverløp.



Figur 7: Frysing i nedløp medfører isdannelse. Figur hentet fra Byggforskserien 725.118 (2012)

Is og smeltevann på kompakte tak

Is og smeltevann vil også kunne gi økt vektbelastning på taket (Mackinlay et al., 2000; Hoover, 1989; Byggforskserien 725.118, 2012). Den ekstra vektbelastningen kan føre til større nedbøyninger på de delene av taket som ikke er direkte under en søyle eller bærevegg. Det er flere eksempler på at bygninger har kollapset som følge av vekten av is og smeltevann som samles på taket (Piroglu and Ozakgul, 2016; Breuning, 2013). Bygningskollaps og høyere nedbøyninger hører imidlertid heldigvis til sjeldenthetene. Byggskader som følge av isdannelse kan være dyre å reparere, men tar sjelden liv. Frysing og tining kan tære på materialer ved at smeltevann trekker inn i sprekker og utvider seg når det fryser. Taktekning og rør kan punkteres av is (Vigoureux and Vigoureux, 2018; Vestheim, 2009). Is kan også danne demninger på taket som holder tilbake store mengder smeltevann (Knight, 1980). Vannet kan tyngne ned taket eller trenge inn i konstruksjonen, der det fører til råte, korrosjon eller andre skader (Lisø, 2006). Slike skader kan være svært kostbare å utbedre.

Snø på kompakte tak

Snødriv som følge av vind kan føre til ujevn lastfordeling på taket. Kompakte og flate tak er særlig utsatt da snøen ikke glir av som på skråtak (Mackinlay et al., 2000). En rekke andre faktorer vil også kunne påvirke fordelingen av snø på taket: Uvøren snørydding kan føre til at snøen ligger mye høyere enkelte steder enn andre og kan dermed gi lokalt farlige forhold for isdannelse (Dolhon and Ratakonda, 2011). I studien fra 2011 ble snø fjernet fra rennene på taket først, slik at smeltevann ble eksponert for åpen, kald luft ettersom det rant ut fra under snøen på taket. Andre former for drift og vedlikehold kan gi lokale opphopninger av snø. Teknikere kan måke stier for å komme til teknisk utstyr og snø kan samles i hauger når det sklir av solcellepaneler (Borrebæk et al., 2019). Dersom takets isolasjonsevne blir forringet, enten ved byggefeil eller ved vanninntrengning, kan snøsmelting oppstå lokalt på taket. Jo større varmestrøm gjennom taket, desto større risiko for snøsmelting. Snø kan også smeltes av varme som stiger opp gjennom innvendige taknedløp eller andre installasjoner som går gjennom taket (Byggforskserien 525.207, 2018). Ved innvendige taknedløp er det ingen fare, ettersom smeltevannet renner ned i sluket til varmere sone, men ising kan oppstå dersom snøen smeltes på annen måte, for eksempel ved ventilasjonsutkast. Taket vil oppleve en viss nedbøyning mellom bærende elementer. Store laster forsterker nedbøyningen, og kan endre fallforholdene på taket. Ved store nedbøyninger, enten i konstruksjonen eller på grunn av deformasjoner i isolasjonslaget, vil fallretningen på taket kunne gå vekk fra sluk og renner. Da vil smeltevann samles opp og kan fryse på taktekningen (Hoover, 1989).

2.3 Klima i Norge

Klimaet i Norge er svært variert og hardt (Lisø, 2007; Thue, 2016). Det er store regionale og lokale forskjeller og klimaet endrer seg stort gjennom kortere og lengre perioder. Den store variasjonen kommer hovedsakelig av store topografiske forskjellene i Norge. Høye fjell og dype daler, innlandsklima og kystklima gir betydelige forskjeller selv innenfor små geografiske områder (Lisø, 2007). Det harde klimaet i Norge skyldes den lange kystlinjen, som medberegnet fjorder strekker seg over 20 000 km, der det skiller 13 breddegradder fra det sørligste til det nordligste punktet (Thue, 2016). Kystlinjen mot arktiske og halvarktiske hav, som Nordishavet, Nordsjøen og Atlanterhavet, bidrar med kalde strømmer fra nord som gir et kaldt klima. Golfstrømmen fra sør redder landet fra isøde og bidrar til et varmere klima enn det ut fra kystlinjen skulle tilsi. Golfstrømmen bidrar ikke bare til et mildere klima, men er også en årsak til raske temperatursvingninger der det skiftes fra å være varmegrader til kuldegrader (Thue, 2016). Et mye brukt eksempel for å illustrere det skiftende været i Norge, er fra Tynset i Hedmark, der det i løpet av 18 dager i februar 1985 ble målt en differanse på ca. $53\text{ }^{\circ}\text{C}$, fra negative $43,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ den 8. februar til positive $10,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 26. februar (Thue, 2016).

Klimaforskjeller i Norge

Temperaturforskjellene kan være store og varierende også over korte perioder, og det er store differanser fra årsmiddeltemperaturene langs kysten, innlandet og fra nord til sør, som vist i tabell Tabell 1. De store klimatiske forskjellene i Norge er lett å observere. Fra Tabell 2 vises forskjeller i nedbør. Her ser en tydelig hvilke store forskjeller som preger landet, hvor det i to ulike soner er 8 ganger forskjell i nedbørsmengde og tilsvarende store differanser når det kommer til temperatur. De høyeste temperaturene i løpet av året forekommer langs kysten sør og vest i Norge, mens de laveste verdiene er på Finnmarksvidda og i fjellstrøkene i Sør-Norge. Den gjennomsnittlige sommertemperaturen er lavere i Nord-Norge enn i Sør-Norge. De mest nedbørsrike områdene ligger ca. to mil innenfor kystlinjen. Minst nedbør er det på Finnmarksvidda og i indre strøk av Østlandet. De mest værharde stedene er i kyst- og fjordstrøk i Nord-Norge, Vest-Norge, Trøndelag, på Østlandet samt i fjellstrøk i Sør-Norge med fjell på over 900 meter over havet.

Klimasoner

For å sammenligne klimaet i forskjellige områder, er den mest kjente og vanligste metoden å klassifisere etter klimasoner ved hjelp av Köppen-Geiger systemet (Thue, 2016; Lisø, 2007; Thodesen et al., 2018b). Köppen-Geiger systemet klassifiserer klimaet etter temperatur- og nedbørnormaler, i samsvar med det som observeres av vegetasjonssoner.

Det norske klimaet vil i Köppen-Geiger systemet befinne seg innenfor klimasonene C) *Temperert*

Tabell 1: Årsmiddeltemperatur og dimensjonerende vintertemperatur for noen kommuner basert på normalperioden 1971-2000 (Thue, 2016)

Sted	Årsmiddeltemperatur	Dimensjonerende vintertemperatur over ett døgn	Dimensjonerende vintertemperatur over tre døgn
Karasjok	-2,1	-50,0	-48,6
Bodø	4,8	-15,0	-12,8
Trondheim	5,8	-23,1	-22,0
Hamar	4,3	-30,6	-29,2
Oslo	6,1	-21,8	-19,8
Stavanger	7,8	-14,2	-12,8

Tabell 2: Karakteristisk klimadata (årsmiddelverdier) for noen steder i Norge i normalperioden 1931-1960 (Thue, 2016)

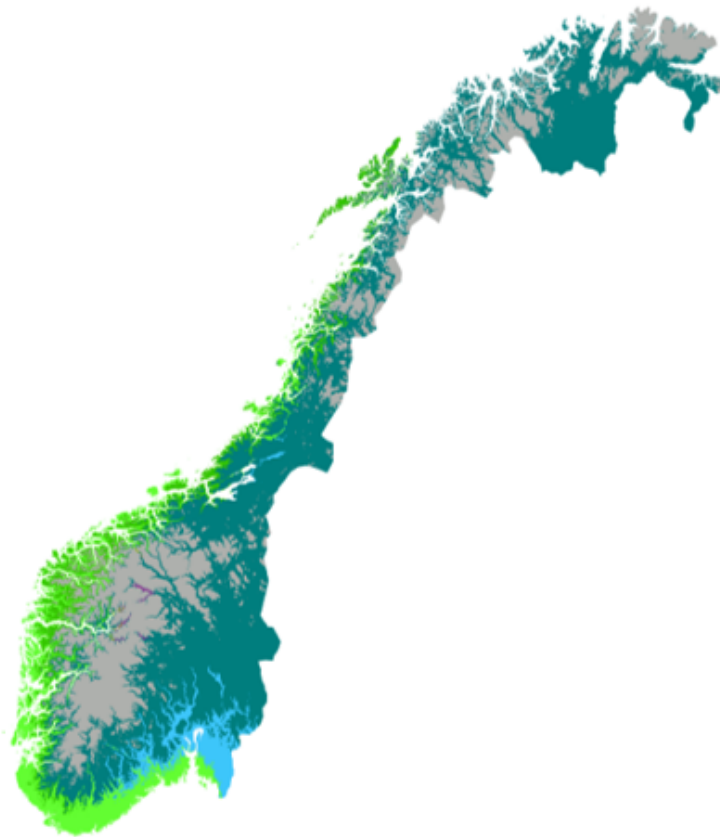
Sted	Temperatur [°C]	Stråling på horisontal flate [W/m^2]	Nedbør [mm]	Vindhastighet [m/s]	Antall dager med snødekke på mark
Oslo, Blindern	5,9	109	740	2,2	102
Bergen	7,8	93	1958	3,1	40
Lillehammer	3,3	104	703	3,2	152
Trondheim	4,9	99	857	3,2	107
Bodø	4,6	87	996	5,0	86
Karasjok	-1,5	84	340	1,8	191

klima, for områder med kaldeste måned mellom $+18$ og -3 °C og nedbørsmengde over grensen til tørt klima (sone B), D) *Kontinental klima*, for områder der kaldeste måned er under -3 °C og i den varmeste over $+10$ °C, og E) *Arktisk klima*, hvor middeltemperaturen ligger under $+10$ °C i årets varmeste måned. Klimasonene gir et godt inntrykk av de store klimavariasjonene som er i Norge (Lisø, 2007), og viser grovt fordelingen av klima i Norge.

Som Figur 8 og Figur 9 viser, er klimaet i bebygde områder hovedsakelig innenfor de tempererte- og de kontinentale klimasonene, hvor særlig de største delene av kysten vil ha maritimt klima og være klassifisert under temperert klima, mens skiftet går fort og brått over til arktisk klima før de kontinentale klimasonene.

Klimatilpasning og befolkning

Klimatilpasning er blitt en stor del av kulturen i Norge (“Det finnes ikke dårlig vær, bare dårlige klær!”). Klimaet i Norge påvirker hvor byer er etablert og hvor befolkningen bosetter seg (Thorsnæs, 2022). De fleste byer finnes langs kysten, særlig lavlandet i enden av fjorder eller ved vann i dalstrøk i innlandet. Bebygde områder vil generelt finnes der klimaet er mildere enn gjennomsnittet i landet, ettersom store deler av Norges areal består av ugjestmilde fjellstrøk.

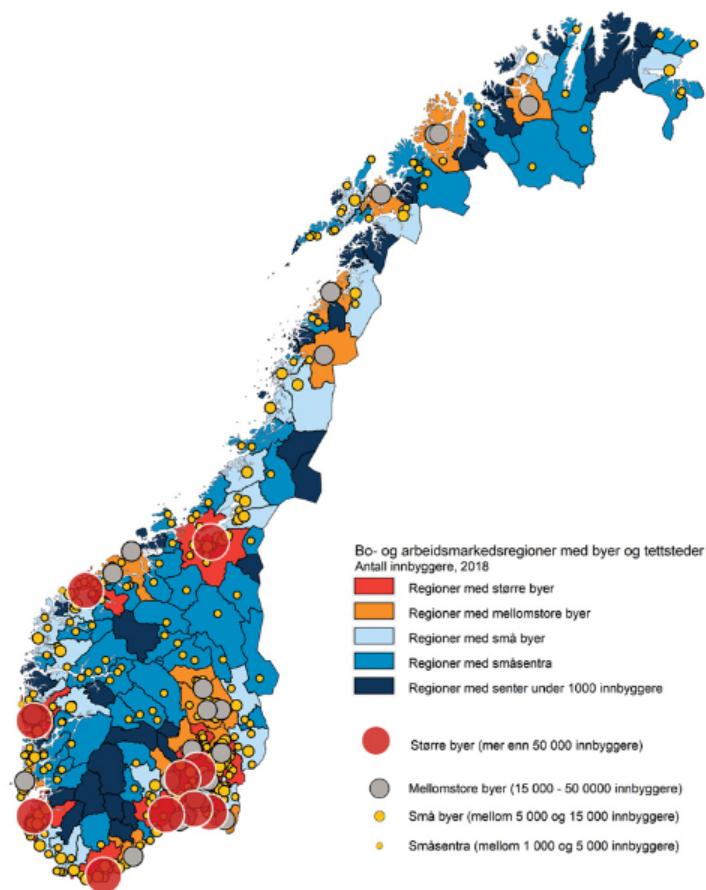


Figur 8: Koppen-Geiger Klimaklassifisering av Norge (Peterson, 2016)

Utvikling viser en trend av det kan kalles desentral sentralisering, der en større andel av befolkningen også i mindre sentrale kommuner bor i tettsteder og distriktssentra. Befolkningen flytter sammen og bor tettere. Fra år 2000 til 2018 har befolkningsandelen som bor i tettsteder økt fra 77 til 82 prosent (KDD, 2019). En tilsvarende befolkningsutvikling er også funnet i de øvrige de nordiske landene, hvor befolkningen blir konsentrert til kommunesentrene (Stjernberg and Penje, 2019).

2.4 Klimaendringer

Selv om klimaet i Norge er hardt og variert, er det også i endring (Flæte, 2010). Ikke bare vil det komme mer regn, lufttemperaturen er forventet å øke og snøsesongen bli kortere (Lisø, 2007). “Tilpassing til eit klima i endring - Samfunnet si sårbarheit og behov for tilpassing til konsekvensar av klimaendringane” som ble lagt frem av NOU (Noregs offentlege utgreiingar) i 2010, gjør en helhetlig vurdering av det klimaet som er forventet i fremtiden (Flæte, 2010) Her vises det til endringer som påvirker lufttemperaturen, nedbør- og snømengde.



Figur 9: Befolkingstetthet i Norge (KDD, 2019)

Lufttemperatur

Blant endringene er det forventet at alle landsdelene i Norge vil oppleve varmere klima de iløpet av det neste århundret. Innen år 2100 er det forventet en økning i gjennomsnittstemperaturen på mellom 2,3 og 4,6 °C (Flæte, 2010). Det er forventet at temperaturen vil øke mest om vinteren og meste i Finnmark. Antall dager hvor temperaturen passerer 0 °C er forventet å få en reduksjon på mellom 10 og 60 % i områder nær kysten, mer er forventet øke med 10 % i innenlandsstrøk og i fjellområder. Reduksjonen i antall dager under frysepunktet er forventet i overgangsmånedene, høst og vår. Det er ikke å utelukke en økning om vinteren. En konsekvens av et mildere klima og høyere lufttemperatur er at bygninger over hele Norge, bortsett fra Finnmark, vil komme til å få en reduksjon i antall frostskafer.

Nedbør

Den gjennomsnittlige årsnedbøren i Norge er ventet å øke innen år 2100 (Flæte, 2010). Det er forventet en økning i nedbørsmengde på ca 20 % gjennom vår, høst og vinter, mens økningen er forventet å være 10 % gjennom sommeren. Til tross for mer nedbør er det likevel forventet at nedbør kommer som regn fremfor snø.

Kortere snøsesong

Snøsesongen er forventet å bli kortere i hele Norge (Flæte, 2010). Innen år 2100 er det forventet at snøsesongen i lavlandet kan være så mye som 2-3 måneder kortere. Indre Finnmark og høyfjellet er forventet å oppleve en økning i maksimal snødybde før den igjen er forventet å minke. Høyere temperaturer betyr generelt sett kortere snøsesong i Norge og Arktis (Aall et al., 2018). Kortere snøsesong betyr at snøen vil legge seg senere, komme til å smelte tidligere og utgjøre mindre snømengder når det er snø. Det vil likevel vil naturlige variasjoner som kan føre til at enkeltår med betydelig snøfall i kystnære lavlandsområder, slik Østlandet opplevde vinteren 2018 (Flæte, 2010). Reduksjonen i maksimal snømengde vil bli størst i høyereliggende strøk på Vestlandet og i Nordland, i tillegg til på kysten av Troms og Finnmark (Lisø, 2007). Ved siden av til kortere snøsesong vil det være flere smelteepisoder og flere hendelser med regn-på-snø om vinteren, opptil tre ganger så ofte i Longyearbyen (Isaksen et al., 2017).

2.5 Værdata

For å holde oversikt over været, har historiske data blitt samlet og arkivert hos flere kilder. Meteorologisk institutt har værstasjoner over hele Norge som henter inn værdata og store databaser med historiske data. Det finnes også værmodeller som beregner været basert på observasjoner. En “mellomvariant” er modellerte data basert på værmodeller og målinger, for å rekonstruere historiske data på steder der det ikke har blitt foretatt målinger. Slike modellerte værdata ligger til grunn for mange av beregningene som brukes i denne oppgaven.

Værstasjoner

Meteorologisk Institutt har i dag 246 aktive værstasjoner plassert rundt i landet (Meteorologisk Institutt, 2022). De fleste vil være plassert nær folk og i områder hvor det er enkelt å betjene stasjonene. Stasjonene måler også ulike værparametre basert på tilgjengelig utstyr som er tilpasset behov på stedet. Det ble påpekt av Skagseth (2021) at de fleste stasjonene som måler snødybde, er plassert

2.6 Modell utarbeidet av Skagseth (2021)

Modellen som Skagseth (2021) utviklet og som denne oppgaven bruker som utgangspunkt, definerer risiko for isdannelse som en kombinasjon av risiko for snøsmelting og risiko for gjenfrysing av smeltevann. Begge fenomenene må oppstå samtidig for at det skal dannes is. For å beregne risiko for isdannelsen tok Skagseth utgangspunkt i en formel for kritisk snødybde, konstruert av Nielsen (2019), gjengitt i Ligning 1. Formelen kan uttrykkes som et graf for kritisk snødybde for hver temperatur under 0°C . Grafens stigningstall blir da avhengig av den antatte verdien for snøens varmekonduktivitet. Området under grafen vil da beskrive snødybder som er for lave til at nullisotermen havner i snølaget for den gitte temperaturen. Over grafen er snødybden stor nok til at snøen smeltes. For å ta høyde for usikkerhet konstruerte Skagseth et diagram med to grafer for varmekonduktivitet (antatt øvre og nedre verdi), med en “usikker sone” mellom de to grafene. Skagseth definerte også tre soner for gjenfrysingstemperatur, på tilsvarende måte.

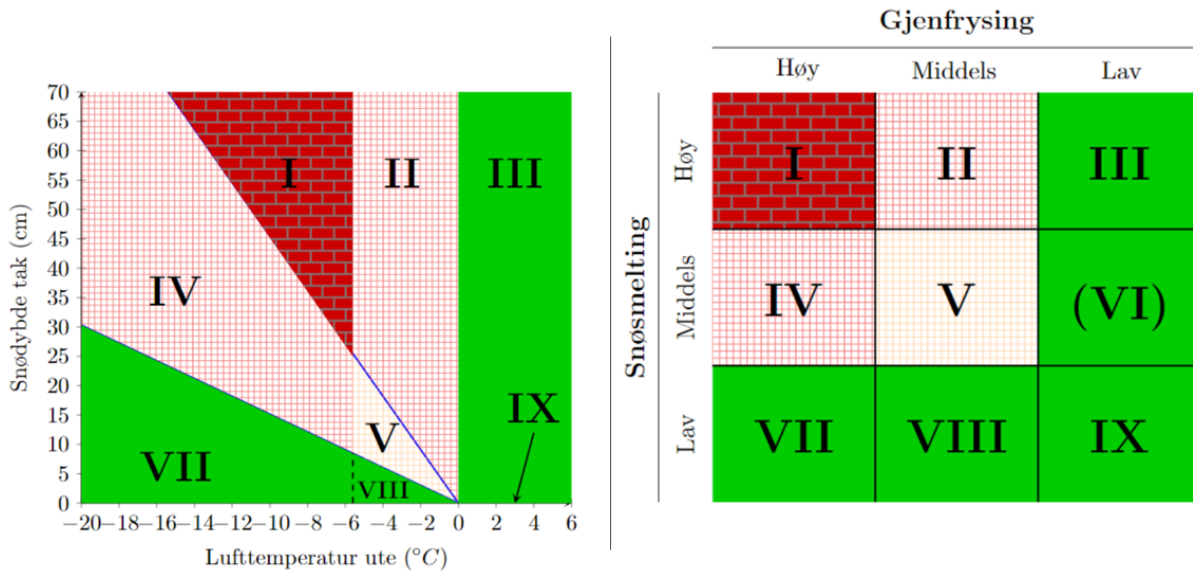
For å illustrere risiko for isdannelse kombinerte Skagseth (2021) de to faktorene snøsmelting og gjenfrysing i et diagram som viser risikosoner for begge, som vist i Figur 11. Den største risikoen for isdannelse oppstår i soner hvor både smelting og gjenfrysning kan forekomme, da spesielt i overlappet mellom høyeste risikosone for både smelting og gjenfrysning (angitt i rødt). Diagrammet har totalt åtte soner. Den niende (sone VI) finnes ikke i praksis, siden det ikke vil være noen usikker sone for snøsmelting dersom utetemperaturen er over 0°C .

$$D_m = \frac{\lambda_s(-T_e)}{U_r T_i} \quad (1)$$

Her er λ_s snøens varmekonduktivitet, T_e utetemperatur i minusgrader Celsius, U_r takets varmekonduktivitet og T_i , innetemperatur.

Modellen som ble utviklet brukte en programkode utviklet i C++ og Python for å hente ned og behandle værdata fra Meteorologisk institutt sin server. Dataene ble samlet og sortert som en tidslinje, før videre sammenligning med diagrammet, vektet etter hvor mange målinger som falt i hver av risikosonene. Noen risikosoner ble antatt å være mer alvorlige enn andre. Gjennom en formel for risikovekting med utgangspunkt i plassering i risikomatriksen, ble hver stasjon tildelt et risikotall for å illustrere hvorvidt området rundt stasjonen kunne være trygt for bruk av utvendig nedløp. Formelen for risikovekting er vist nedenfor, Ligning 2. Hensikten var å representere hele værdataserien for værstasjonen med ett risikotall. Verdiene for vektingen ble valgt basert på en subjektiv antakelse.

$$\text{Risiko (\%)} = 1,00 * I\% + 0,30 * II\% + 0,50 * IV\% + 0,15 * V\% \quad (2)$$



Figur 11: Diagram med risiko for snøsmelting og isdannelse, laget av Skagseth (2021). Risikosoner illustrert konseptuelt til høyre og som brukt i beregninger til venstre. Venstre diagram forutsetter gitte verdier for parametrene innetemperatur, takets varmegjennomgangskoeffisient og snøens varmekonduktivitet

Modellen hentet kun data fra værstasjoner som måler snødybde- og temperaturmålinger hver time. Det ble hentet ned data fra vinterhalvåret for å gjøre beregningene mindre tidkrevende. Det ble antatt at den mengden snø som måtte forekomme mellom 1. april og 30. september ikke ville være så stor at det utgjør noen forskjell for resultatene.

For å ta høyde for usikkerhet rundt variasjoner og manglende målinger ble det beregnet en parameter for datasikkerhet ved kategorisering av stasjonen. Formelen ble konstruert på bakgrunn av utførte målinger i vinterhalvåret (1. oktober - 31. mars) og antall potensielle målinger i samme periode, se Ligning 3.

$$\text{Datakvalitet} = \sum_{\text{year}=1996}^{2021} \frac{Q_{1\text{year}} + Q_{4\text{year}}}{2} \quad (3)$$

hvor

$$Q_i = \frac{\#\text{Målinger i kvartal } i}{\#\text{Timer i kvartal } i} \quad (4)$$

I studien viste det seg vanskelig konkludere entydig når utvendige nedløp fra kompakte tak kunne være aktuelt. Blant usikkerhetsmomentene var det særlig knyttet vanskeligheter med å modellere den termiske oppførselen til snø på tak. Snøens varmekonduktivitet ble sett som en stor usikkerhetsfaktor her, ettersom den varierer avhengig av faktorer som porøsitet, vanninnhold og kornstruktur. Disse faktorene lar seg vanskelig måle i praksis (Borrebæk et al., 2019). Fra analysene av timesdata

ble det også savnet en referanseindeks som kunne si noe om hvor mye risiko som kan aksepteres. Det ble også fremmet utfordringer knyttet til for begrenset og lite sammenhengende data.

2.7 Kunnskapshull

Det er flere kunnskapshull knyttet til utfordringene med snøsmelting og isdannelse på tak. Størst av kunnskapshullene er antagelig de termiske egenskapene til snø, som er vanskelig å generalisere så de kan brukes i praktiske beregninger. Snøens isolasjonsverdi vil variere fra tilfelle til tilfelle, variere gjennom hele snødybden, og endres over tid, i tillegg til å bli påvirket av mange andre forhold. Det mangler også kunnskap om hvor fort smeltevann kan gjenfryse ved ulike temperaturer, og hvorvidt det kan rekke å renne bort fra taket før dette skjer.

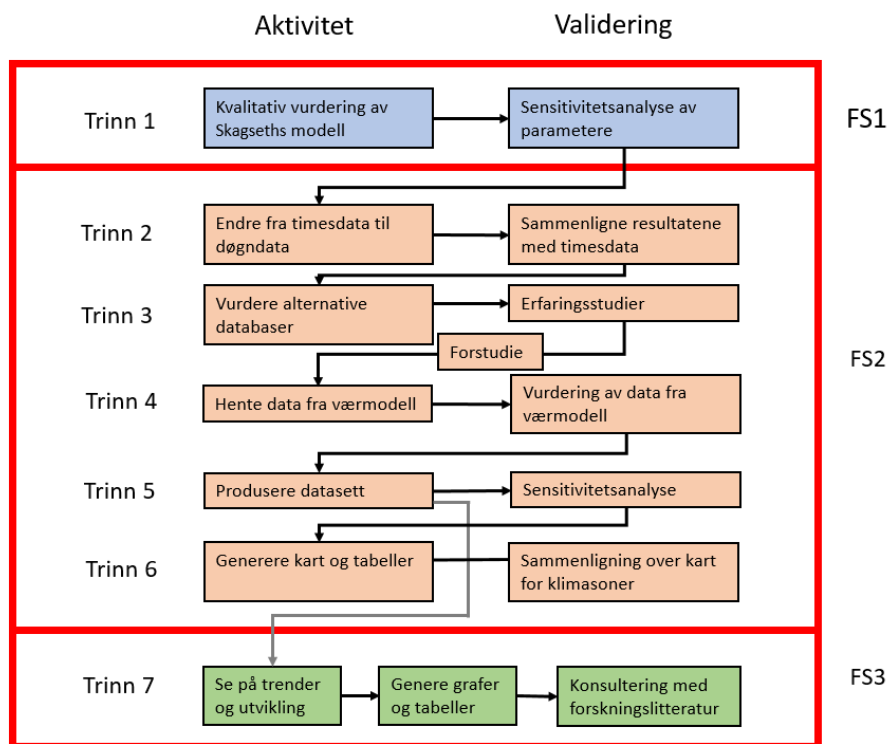
Det er heller ikke funnet gode data for å avgjøre hvor mye isdannelse som er uakseptabelt for et tak. I praksis vil dette antagelig variere fra tak til tak, men en referanseverdi ville ha vært til hjelp for å kunne kvantifisere sårbarhet. Erfaringsdata vil antagelig være til stor hjelp med å bestemme hvor mye isdannelse som kan aksepteres, eventuelt hvor ofte det kan oppstå.

Kjente data kan likevel benyttes til omtrentlige beregninger ved å innføre øvre og nedre grenser for de ukjente verdiene. Det må da aksepteres en viss usikkerhet i resultatene, som blir større jo mer komplekse beregningene er. Enkle modeller kan brukes sammen med klimadata for å vurdere *relativ* risiko under ulike forhold.

3 Metode

I denne delen av oppgaven vil metodene som er blitt brukt i arbeidet med å besvare forskningsspørsmålene og utviklingen av modellen bli presentert.

Den overordnede prosessen er vist i flytskjemaet i Figur 12. Hver av de tre røde boksene er knyttet til hvert sitt forskningsspørsmål definert i Underavsnitt 1.3. Metodene er beskrevet i detalj i kommende avsnitt i dette kapittelet, men oppsummert under figuren.



Figur 12: Flytskjema for metode

Trinn 1. I den første delen av oppgaven er det foretatt en kvalitativ vurdering av modellen som Skagseth (2021) utviklet, sammen med en sensitivitetsanalyse av parameterne som ble brukt i studien.

Trinn 2. I den neste delen av oppgaven er det sett på metoder for å utvikle modellen til Skagseth og i første omgang muligheten for å få mer kontinuerlig værdata og værdata fra større deler av landet, ved å bruke døgndata istedenfor timesdata. Som validering ble resultatene fra døgndata sammenlignet med resultatene fra timesdata.

Trinn 3. I videre utvikling av modellen er det gjort litteratursøk og litteraturgjennomgang for å finne ulike alternative kilder for værdata for å gi et bedre datagrunnlag for videre analyse. Som validering ble det sett på erfaringsstudier med de ulike modellene og sett på kvalitet og kvantitet

på datagrunnlaget modellene gir.

Trinn 4. Basert på funnene fra litteratursøket er modellen tilpasset og endret for å hente ned data fra seNorge. Som del av datainnhenting fra seNorge ble det først hentet ned snøkart over landet, for å se utvikling og hvilke områder som kunne være interessante for videre analyse. Det ble deretter hentet ned detaljerte data for temperatur og snødybde fra et utvalg av byer rundt om i Norge, samt et større område på Sør-Vestlandet.

Trinn 5. Modellen ble testet på data fra flere byer langs kysten og et større område på Sør-Vestlandet. Resultatene ble kjørt gjennom en sensitivitetsanalyse.

Trinn 6. På bakgrunn av dataene som ble hentet ned fra det større området på Sør-Vestlandet, ble det generert resultater i form av kart og tabeller. Kartene ble sammenlignet med frostkart, nedbørskart, klimasonkart og karakteristisk snølast på mark.

Trinn 7. For å vurdere klimautvikling ble dataene fra byene langs kysten kjørt gjennom en kode som skriver ut en fargekodet liste over risikoforhold for hver dag. Herfra ble det sett på trender og utvikling gjennom å generere grafer og tabeller med utvikling og trender. Som validering ble forskningslitteratur undersøkt for å se om resultatene stemte med tidligere erfaringer.

3.1 Trinn 1: Kvalitativ vurdering og sensitivitetsanalyse

Aktivitet: Kvalitativ vurdering

Kvalitativ metode er en vanlig forskningsmetode og brukes ved innsamling og analyse av data som vanligvis foreligger i form av tekst (Boris F. Blumberg, 2014; Grønmo, 2023). Hensikten med kvalitative studier er gjerne å oppnå dybdekunnskap og helhetlig forståelse av spesifikke kontekster.

I den kvalitative vurderingen er det tatt utgangspunkt i masteroppgaven som Vegard Skagseth skrev i 2021 med hertil utvikling av risikomodell for isdannelse i kompakte tak med utvendig nedløp (Skagseth, 2021). Den kvalitative vurderingen er gjort på følgende måte:

1. Gjennomgang av modellen, inputparametere, usikkerhet og begrensninger basert på beskrivelsene av metodene som ble brukt.
2. Vurdering av metoden på bakgrunn av resultatene som modellen produserer.
3. Gjennomgang og en vurdering av på kvaliteten og begrensningene på datagrunnlaget.

Det er også gjennomført en sensitivitetsanalyse på modellen for å avdekke påvirkning og valg

av parametere som er brukt; varmekonduktivitet, varmegjennomgangskoeffisient, innetemperatur og utetemperatur

Til vurderinger er det også sett på notater skrevet av Skagseth og artikler skrevet i forkant og etterkant av oppgaven. Enkelte av notatene ble brukt som forarbeider og grunnlag til studien og beskriver bakgrunnen for formlene og metodene som er brukt. Ytterligere samtaler med Skagseth og hans veileder ble brukt for å finne utfyllende informasjon om metodene han brukte og deres erfaringer og tanker om modellen som ble produserte.

Verken masteroppgaven eller notatene er fagfellevurderte. Det er derfor fokusert på modellen som ble utarbeidet og beskrivelsene som blir gitt, samt resultatene som er presentert og dataene som er oppgitt benyttet.

Validering: Sensitivitetsanalyse

Sensitivitetsanalyse er et verktøy for å vurdere hvor følsom en resultatvariabel eller konklusjon er for endringer i forskjellige faktorer (Daniels and Hogan, 2008; Stavseth, 2020). Gjennom å definere ikke konstante parametere som er delmengde eller utgjør en andel av mengden som skal undersøkes, kan parameterne brukes for å kode tidligere oppfatninger om de manglende datamekanismene, enten ved å fikse verdiene deres til en konstant, undersøke interferens over en rekke konstanter, eller ved å tilordne en passende tidligere fordeling (Stavseth, 2020). Gjennom sensitivitetsanalyse vil den primære, og helst preregistrerte analysen i studien komplementeres gjennom å belyse effekten av påvirkningen av valgene som er gjort (Daniels and Hogan, 2008).

I de innledende undersøkelsene ble det utført sensitivitetsanalyse av alle parameterne som utgjør delmengder i formelen for snøfrysing. Parameterne ble testet for rimelig verdier basert på litteratur og spenn som er som vanlige parametre verdier i litteraturgrunnet fra Skagseth og som tidligere har vært norm for krav til varmekonduktivitet (Tek 85 og Tek 17).

Tabell 3: Parametre undersøkt i sensitivitetsanalyse

Parameter	Enhet	Verdi	Runde 1	Runde 2	Runde 3	Runde 4
Snøens varmekonduktivitet, λ_s	[W/mK]	0,06				X
		0,12				X
		0,18	X	X	X	X
		0,24				X
Varmegjennomgangskoeffisient, U_r	[W/m ² K]	0,13			X	
		0,18	X	X	X	X
		0,23			X	
Innetemperatur, T_i	[°C]	18	X			
		22	X	X	X	X
		25	X			
Utetemperatur, T_e	[°C]	0		X		
		-1		X		
		-3		X		
		-5,6	X	X	X	X

Det ble kjørt tilsammen 14 iterasjoner av modellen basert på ulike valgte inputparametre. Kun én parameter ble endret i hver kjøring. Alle andre parametre ble satt til en utgangsverdi som er merket med uthevet tekst i Tabell 3. Ved fremstilling ble hver paramter endret, plottet individuelt, for å se endring.

3.2 Trinn 2: Endre datagrunnlag fra timesdata til døgndata med sammenligning

For å øke datagrunnlaget ble det forsøkt å endre fra timesdata til døgndata. Det ble gjort en sammenligningen av resultatene for å avdekke sammenhenger og hvordan endringen ville påvirke nøyaktigheten av resultatene.

Aktivitet: Endre datagrunnlag

Koden som ble brukt i Skagseth sin modell er konstruert for å kun hente ned værdata fra stasjoner som målte snødybde og temperatur hver time. Gjennom litt endring i koden, ble filteret endret for å også å hente ned værdata fra stasjonene som måler snødybde og temperatur på døgnbasis. Koden er angitt i vedlegg 1 og 2. For stasjonene med timesmålinger ble målinger utført på samme tidspunkt som døgnmålinger, måleverdi klokka 00:00 (midnatt), benyttet som døgnverdi for stasjonen. Koden ellers ble ikke endret.

Tilsvarende kontroller som i den opprinnelige modellen til Skagseth (2021) ble gjort av værda-

taene som ble hentet inn i forhold til måleavvik og feilregistreringer. Verdier som avvek betydelig fra trend ble markert og manuelt fjernet.

Alle værobservasjonene ble hentet ned og lagret i mapper for hver stasjon med tid og stasjons-id. Koden for behandling av datafilene ble ikke endret, men kjørt på nytt for alle de nye mappene. Alle data ble hentet ned to ganger på forskjellige datamaskiner, som senere ble sammenligning, for å kvalitetssikre at alle data ble hentet ned.

Validering: Sammenligning av datasett

For å sammenligne datasettene ble det gjort tilsvarende sensitivetsanalyse av værdadataene som av timesdata. Resultatene ble plottet i grafer i Excel. Som kontroll ble grafene for timesdata satt opp mot døgndata. Det ble sett etter avvik i trender og påvirkning av hver parameterne, for å avdekke lignende utvikling og om dataene i så fall . Som ekstra vurdering ble det også plottet grafer basert på fylket for målestasjonen. Grafene presenteres i Underavsnitt 4.2.

3.3 Trinn 3: Vurdere alternative databaser

For å utforske måter å øke mengden data tilgjengelig for beregningene, ble det sett på ulike alternative databaser for værdadata og ulike beregningsmodeller for snø og for værdadata. SeKlima sine målinger er nøyaktige, men dataene er kun gyldige for et lite område rundt værstasjonene. For å avdekke alternativene databaser ble det sett på studier og publikasjoner hos Klima 2050 gjennom snowball sampling og gjort utforskende litteratursøk gjennom 2 søkemotorer. Søkene ble gjort både for å avdekke mulige databaser og senere erfaringer med de ulike databasene.

Aktivitet: Gjennomgang av studier og publikasjoner hos Klima 2050

For å avdekke alternative modeller ble det tittet på Noter, publikasjoner og tidligere litteratur publisert hos Klima 2050. Klima 2050 er valgt som utgangspunkt fordi deres sammensetning av aktører fra næringslivet, eksperter fra forskningsmiljøet og fokus på fremtidens problemer og løsninger, ble antatt å gi et godt godt overblikk for tilgjengelige metoder og databaser. Kildelisten i publikasjonene ble også undersøkt for relevant litteratur.

Validering: Utforskende litteratursøk

For å avdekker erfaringer le det gjort målrettede- og utforskende søk. Litteratursøket ble gjennomført på bakgrunn av fem-steps-modellen beskrevet av Arksey and O'Malley (2005). Søket ble begrenset til to databaser: Google Scholar og Oria. Det startet med brede søkeord "snow models" og "Weather models", deretter lagt på begrensede ord før det ble søkt spesifikt etter modellene avdekket gjennom søket.

3.4 Trinn 4: Hente ned data fra seNorge og vurdering av data

Etter vurdering i Trinn 2 ble det slått fast at døgndata vil gi tilstrekkelig grad av nøyaktighet for å kunne brukes i videre modellering. For å øke datagrunnlaget ytterligere ble det forsøkt å hente ned data fra SeNorge, en database som ble vurdert i Trinn 3. Det ble imidlertid tidlig funnet ut at det ikke ville være praktisk mulig å hente ut data for hele Norge, da datamengdene ville bli uhåndterlig store og kreve svært lang tid til beregninger. Det derfor valgt å teste modellen på mindre utsnitt og områder av kartet i stedet og i første omgang gjøre et forstudie. Resultatene ble til slutt vurdert.

Forstudie: Valg av områder for videre analyse

For å velge ut et interessant utsnitt ble forstudie ved å bruke seNorges snøkart og kartmodusen "Snødybde >5 cm". Denne kartmodusen viser antall dager med mer enn 5 cm snø for et gitt hydrologisk år. Kart ble hentet ut for alle år fra 1958 til 2021 og samlet til en bildeserie vist i vedlegg 3. Den resulterende bildeserien viste at sørlige deler av vestlandet utpekte seg som et relevant område å analysere videre.

Valg av områder for videre analyse

En gjennomgang av litteratur og snøkart viste at kysten av Rogaland opplever lite snø og få, korte perioder med minusgrader, noe som gir lav risiko for isproblemer. Det valgte kartutsnittet tilsvarer omtrent Rogaland fylke med omegn. Området har milde og snøfattige vintre på slettelandet ute ved kysten, i tillegg til fjell, dalstrøk og fjordbunner lenger inn i landet. Kartutsnittet inneholder altså flere klimasoner typisk for Norge på et relativt lite areal. Det dekker også et stort og tett befolket område (fra Stavanger og utover Jæren) hvor kompakte tak med utvendig nedløp er antatt å kunne brukes med lav risiko, og som derfor vil være svært interessant å analysere nærmere. Her finnes med andre ord "et kystklima der snølag på taket får kort varighet", som stemmer perfekt med Byggforskseriens beskrivelse av steder der utvendig nedløp for kompakte tak kan være akseptabelt.

Andre steder som kunne vært aktuelle er bl.a. Hitra-Frøya og Smøla i Trøndelag, men et utsnitt her ville ikke inneholdt innlandsklima. Sørliche deler av Østfold er også snøfattige mange vintre, men her finnes det ikke fjell eller daler å sammenligne med. Rogaland-området ble dermed ansett å være det mest aktuelle stedet å analysere et utsnitt av kartet, på grunn av stor variasjon i klimaforhold på et lite område.

Aktivitet: Hente ned data fra værmodell

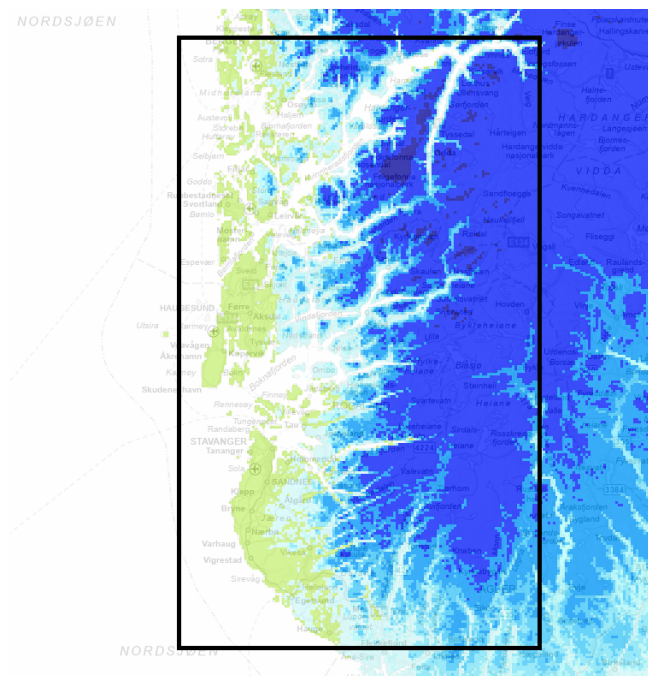
For å hente ned data ble koden for datainnhenting tilpasset til seNorge sin API. Koden ligger vedlagt som vedlegg 4. Koden sender en forespørsel til APIet og henter ned data på bakgrunn av valgte koordinater. Koordinatene som brukes er UTM-koordinater, sone 33N. Koden henter en dataserie fra midten av hver målepunkt og henter ned døgntemperatur og snødybde. Det benyttes en dataserie fra 01-01-1980 til 01-01-2022.

Området rundet Rogaland utgjør 27 777 kvadratkilometer, hvorav 12 571 er over land og inngår i snømodellen. Daglige værdata fra 1980 til 2022 gir 15 342 målinger per punkt, som til sammen blir litt i underkant av 193 millioner målinger. Til sammenligning er Norges landareal cirka 385 000 kvadratkilometer (Kartverket, 2022). Det utvalgte området utgjør litt under 1/30 av landet.

De nøyaktige koordinatene for utsnittet (UTM-koordinater, sone 33N), er angitt i Tabell 4 og vist i Figur 13.

Tabell 4: Koordinater for Rogaland med omegn

X/Y	Nedre verdi	Øvre verdi
x-koordinater	-60 000	79 000
y-koordinater	6 481 000	6 739 000



Figur 13: Området som er analysert rundt Rogaland. Kart hentet fra SeNorge sin snømodell for år 2020 og modifisert

For å tegne et bilde av landet som helhet og skaffe grunnlag til videre analyser ble det også hentet ned værdata fra utvalgte byer over hele landet. Byene ble valgt på bakgrunn av størrelse og plassering. Det ble hovedsakelig sett på byer langs kysten. Byene varierer i størrelsen og er forsøkt å representere en variasjon både i avstand til kysten og plassering i landet. Det er brukt både byer som ligger direkte ut mot havet, men også byer inne i fjorder. Byene ligger over hele landet, både i øst, vest, sør og nord. En oversikt over byene med koordinatene som er brukt er vist i Tabell 5.

3.5 Trinn 5: Produsere datasett og sensitivitetsanalyse

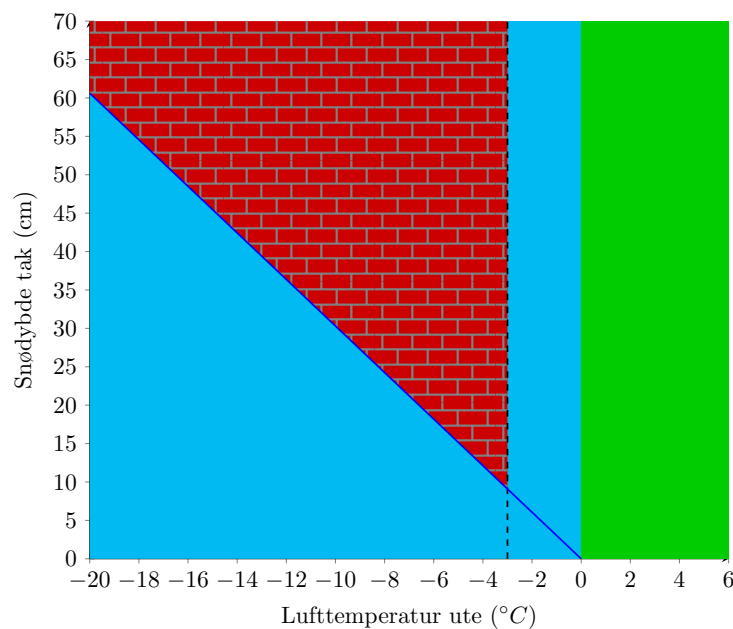
Det ble hentet ned og produsert datasett fra området rundt Rogaland og omegn. Datasettet ble kjørt gjennom formelen for snøsmelting, Ligning 1, med inputverdier for frysetemperatur, innetemperatur, varmekonduktivitet og varmegjennomgangskoeffisient. Det ble valgt statiske verdier for innetemperatur og varmegjennomgangskoeffisient, men brukt varierende verdier for frysetemperatur og varmekonduktivitet, men verdier $0,06 \text{ W/mK}$, $0,12 \text{ W/mK}$, $0,18 \text{ W/mK}$ og $0,24 \text{ W/mK}$ for varmekonduktivitet og 0°C , -3°C og -5.6°C for frysetemperatur.

Tabell 5: Byer hvor værdata er hentet ned.

	Landsdel	X-koordinater	Y-koordinater
Alta	Nord-Norge	811500	7780500
		818500	7784500
Arendal	Sørlandet	135500	6496500
		137500	6499500
Bergen	Vestlandet	-30500	6732500
		-34500	6734500
Bodø	Nord-Norge	472500	7462500
		479500	7463500
Egersund	Vestlandet	-24500	6511500
		-25500	6514500
Fauske	Nord-Norge	515500	7459500
		518500	7461500
Flekkefjord	Vestlandet	10500	6491500
		12500	6493500
Florø	Vestlandet	-26500	6869500
		-28500	6869500
Mo i Rana	Nord-Norge	460500	7353500
		464500	7359500
Mosjøen	Nord-Norge	416500	7299500
		421500	7309500
Moss	Østlandet	250500	6595500
		255500	6604500
Oslo	Østlandet	252500	6644500
		269500	6659500
Sogndal	Vestlandet	78500	6814500
		78500	6815500
Stavanger	Vestlandet	-31500	6573500
		-36500	6577500
Stryn	Vestlandet	63500	6890500
		67500	6893500
Tromsø	Nord-Norge	643500	7730500
		657500	7736500
Trondheim	Midt-Norge	267500	7039500
		275500	7042500
Ålesund	Nord-vestlandet	42500	6957500
		49500	6957500

Aktivitet: Produsere datasett

Koden som produserer datasettene er utviklet i Python og ligger vedlagt i vedlegg 5. Denne koden går gjennom værdata fra hvert målepunkt hentet fra modellen til SeNorge. Algoritmen til koden filtrer til forskjell fra tidligere, kun på bakgrunn av frysetemperatur og varmekonduktivitet. For hver måling som undersøkes blir målepunktet plassert i figurer som Figur 14. Her er grenseverdier for frysetemperatur satt ved -3°C og varmekonduktivitet til $0,12 \text{ W/mK}$. Utover å plassere hver enkelt måling, registreres også dager innenfor rød sone. Som standard teller modellen antall ganger en sekvens med røde målinger overskrider 7. Ved telling registreres også antallet røde dager når sekvensen overskrider 7. Telleren nullstilles dersom neste måling som registreres ligger i grønn sone. Dersom neste målinger ligger i blå sone, vil rødtelleren bli stående til enten ny røde måling, hvor telleren registrerer videre, eller grønne måling, hvor telleren nullstilles. Dette er et forsøk å ta høyde for mindre varians. Faseendringer som oppstår ved skifte av risiko er regnet å ikke opptre momentant, men gradvis ved skifter.



Figur 14: Frysetemperatur -3°C varmekonduktivitet snø $\lambda_s = 0,12$

Modellen returnerer antall røde dager, andel røde dager av hele perioden, lengste røde periode og gjennomsnittlig lengde på røde perioder for hvert målepunkt. Også gjennomsnittlig lengde på periodene som er over 7 blir returnert, men dette blir ikke brukt videre. Modellen regner også antall perioder (uavhengig av lengde), fra rød måling til siste røde måling ved kontinuerlig serie, som dermed viser hvor mange skifter hver sone opplever.

For videre behandling og vurdering av målepunktene ble det satt grenser for å differensiere mellom tellingene, og visualisere varians og risiko. Målepunkter med færre enn 10 perioder på over

7 røde dager på rad over måleperiode på 40 år, ble området markert grønt. Målepunkter med mellom 10 og 19 perioder på over 7 dager, ble markert som gult og de med 20 og flere perioder ble området rødt, hvor færre dager over 20 har fått en lysere rødfarge. Med perioder gjennom hele måleperioden på 40 år, betyr dette at røde målepunkter gjennomsnittlig opplever 1 periode i snitt annenhvert år over 7 dager.

Validering: Sensitivitetsanalyse

For å vurdere hvor sensitive resultatene er for variasjon i valgte parametere, ble det gjort kjøring med forskjellige verdier for varmekonduktivitet og frysetemperatur. Verdiene som ble benyttet var tilsvarende som verdiene brukt i øvrige sensitivitetsanalyser. For undersøke usikkerheten rundt valgt lenge målperiode for risikovurdering, ble det også gjort variasjoner i antall dager før telleren nullstilles. Grensene ble forsøkt med 3, 7 og 10 dager for varmekonduktivitet $0,12W/mK$ og frysetemperatur $-3^{\circ}C$.

3.6 Trinn 6: Genere kart og sammenligning

Aktivitet: Genere kart

På bakgrunn av resultatene fra sensitivitetsanalysen ble det produsert kart. Kartene ble konstruert på et ordinært Norgeskart ved hjelp av Arcgis Pro. Arcgis Pro et kartverktøy med GIS-egenskaper fra Esri som gjør det mulig å hente inn lokasjoner som koordinater og enkelte tilegne egenskaper til punktene (Esri, 2022). Hvert målepunkt ble tildelt en størrelse på 1×1 km, tilsvarende som målepunktets størrelse i SeNorge sin snømodell. Målepunktene ble videre tildelt farge på bakgrunn av resultatene fra sensitivitetsanalysen fra Underavsnitt 3.5. Tilsammen ble det laget 12 kart, basert på de ulike valgte inputparametre og variasjoner i grenser for måleperiode.

Validering: Sammenligning med klimasoner

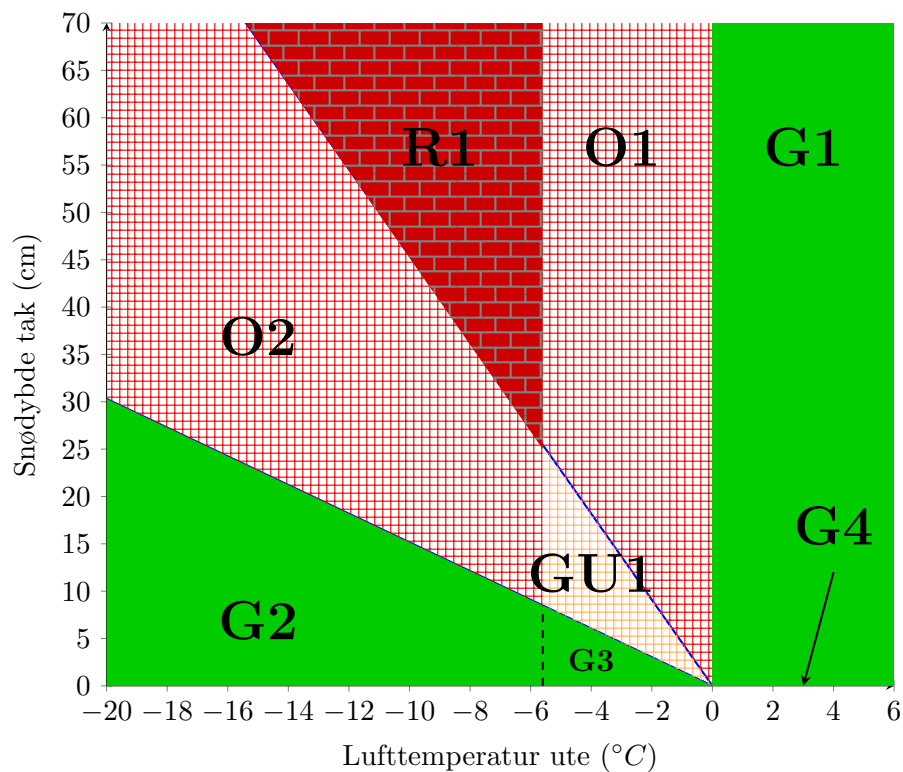
For å sammenligne med de genererte kartene ble det sett på klimasoneinndelingen til Köppen Geiger (Peterson, 2016). Det ble også gjort sammenligning av grensene hvor det ble sett på andre klimakart som klimakartene til Lisø (2007) og KDD (2019). De genererte figurene ble lagt side ved side med klimasonekartene, og en kvalitativ vurdering av forskjeller og ulikheter ble foretatt. De genererte kartene og klimasonekartene er ikke sammenlignet kvantitativt.

3.7 Trinn 7: Se på trender og utvikling og konsultering med forskningslitteratur

For å studere utvikling og trender ble det tatt utgangspunkt i værdataene fra de utvalgte byene i Tabell 5. Resultatene ble kjørt gjennom samme kode som tidligere, men istedenfor å skrive ut antall målinger innenfor hver sone, ble hver måling skrevet ut. Hver måling ble så tildelt en farge på bakgrunn av plassering, lagt inn i en liste i Excel. Ved å fremstille målingene grafisk med tid langs en akse, vil det være mulig å se utvikling og trender for hvordan klimaet har utviklet seg og hvordan antall observasjoner i hver kategori skifter gjennom årene.

Kode for gruppering av værdataene

Koden som grupperer målingene er laget i Python og ligger vedlagt som vedlegg 6. Koden benytter samme utgangspunkt som tidligere koder. For hver måling, går koden gjennom og plasserer målingen i en risikomatrix tilsvarende som den Skagseth brukte i sin opprinnelig modell, Figur 11, vist i Figur 15. Istedenfor å summere opp antall målinger i hver sone i hele måleperioden, som tidligere koder gjør, skriver denne koden ut målingene som enkeltlinjer i Excel og navsetter kolonnen etter plassering i risikomatriksen. Slik kan utvikling i målingene vises som grafer og dermed synliggjøre trender over tid.



Figur 15: Soneinndeling for analyse av historiske værdata fra byer rundt i landet. Her illustrert med varmegjennomgangskoeffisient for tak lik $0,18W/m^2K$, snøens varmekonduktivitet, λ_s , henholdsvis $0,06W/mK$ som nedre grense og $0,18W/mK$ som øvre grense

Ved å skrive ut målingene til Excel og legge til farger for hver kategori, kommer det flotte fargekart som vist i Figur 16. Her vil avvikene og variasjon i værdatene være veldig tydelige. Kartene er begrenset fra 1. september til 30. april. Det ble på forhånd kontrollert at en slik begrensning ikke skulle gå over snømengden og gjort kontroll av målingen fra Alta om at målingene i overgangen var i område G4 eller G1 (ingen snø). Dette ble gjentatt for alle byene som ble valgt ut.

	252500,664	252500,665	252500,665	252500,665	252500,665	252500,665	252500,665	252500,665	252500,665	252500,665	252500,666	252500,666	252500,666	252500,666	252500,666
01.01.1980	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	R1
02.01.1980	G3	G3	G3	G3	G3	G3	G3	G3	G3	R1	R1	R1	R1	R1	R1
03.01.1980	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	R1	R1	R1	R1	R1	R1
04.01.1980	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2
05.01.1980	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	R1	R1	R1	R1	R1
06.01.1980	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	R1	R1	R1	R1	R1	R1
07.01.1980	01	01	01	01	01	01	01	01	01	R1	R1	R1	R1	R1	R1
08.01.1980	01	01	01	01	01	01	01	01	01	R1	R1	R1	R1	R1	R1
09.01.1980	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	R1	R1	R1	R1	R1	R1
10.01.1980	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	R1	R1	R1	R1	R1	R1
11.01.1980	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	R1	R1	R1	R1	R1	R1
12.01.1980	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	R1	R1	R1	R1	R1	R1
13.01.1980	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	R1	R1	R1	R1	R1	R1
14.01.1980	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	R1	G2	R1	R1	R1	R1	R1	01
15.01.1980	01	01	G3	G3	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01
16.01.1980	G3	G3	G3	G3	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01
17.01.1980	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	R1	R1	R1	R1	R1	R1
18.01.1980	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	R1	R1	R1	R1	R1	R1
19.01.1980	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	R1	R1	R1	R1	R1	R1
20.01.1980	01	01	01	01	01	01	01	01	01	R1	R1	R1	R1	R1	R1
21.01.1980	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	R1
22.01.1980	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01
23.01.1980	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01
24.01.1980	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01
25.01.1980	G2	G2	G2	G2	G2	G2	R1	G2	R1	R1	R1	R1	R1	R1	R1
26.01.1980	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	R1	R1	R1	R1	R1	R1
27.01.1980	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	R1	R1	R1	R1	R1	R1
28.01.1980	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	R1	R1	R1	R1	R1	R1
29.01.1980	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	R1	R1	R1	R1	R1	R1
30.01.1980	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	R1	R1	R1	R1	R1	R1
31.01.1980	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	R1	R1	R1	R1	R1	R1
01.02.1980	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	R1	R1	R1	R1	R1	R1
02.02.1980	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2
03.02.1980	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	R1
04.02.1980	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	R1	R1	R1	R1	R1
05.02.1980	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2
06.02.1980	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2
07.02.1980	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2
08.02.1980	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	R1	R1	R1	R1	R1
09.02.1980	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2
10.02.1980	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2	R1	R1	R1	R1	R1	R1
11.02.1980	R1	R1	R1	R1	R1	R1	R1	R1	R1	R1	R1	R1	R1	R1	R1
12.02.1980	R1	R1	R1	R1	R1	R1	R1	R1	R1	R1	R1	R1	R1	R1	R1
13.02.1980	R1	R1	R1	R1	R1	R1	R1	R1	R1	R1	R1	R1	R1	R1	R1
14.02.1980	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01
15.02.1980	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01
16.02.1980	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01
17.02.1980	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01
18.02.1980	01	01	R1	R1	01	01	01	01	01	R1	R1	R1	R1	R1	R1
19.02.1980	01	01	01	01	01	01	01	01	01	R1	R1	R1	R1	R1	R1
20.02.1980	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01

Figur 16: Utklipp fra værdata fra Oslo i perioden 1. januar til 20. februar 1980. Hver kvadratkilometer i måleområdet gir en kolonne med data, med målepunkter i tid vist vertikalt. Ugunstige perioder dukker opp som røde felter

Aktivitet: Fremstilling av grafer og tabeller

Basert på fargekartet som ble produsert gjennom gruppering av værdataene ble det laget tabeller som summerer antall målinger innenfor hver kategori hver år. Disse ble videre fremstilt som grafer med antall målinger og år langs hver sin akse. Ved å legge på trendlinjer blir utvikling og trender tydelig, samt årlig variasjon. Dette ble gjort for alle byene.

Validering: Konsultering med forskningslitteratur

For konsolidering med forskningslitteratur ble det gjort enkle søk i forskningslitteratur knyttet til klimaendringer og særlig lagt vekt på rapporter fra NOU og FNs klimareporter.

4 Resultat

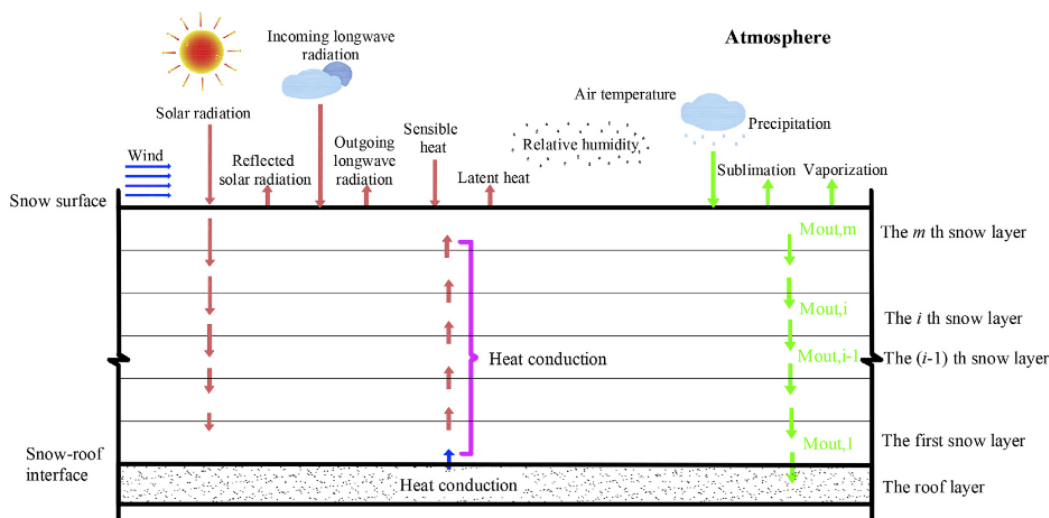
4.1 Trinn 1: Kvalitativ vurdering av modellen til Skagseth

Som kvalitativ vurdering er det gjort en gjennomgang av modellen, databehandling, inputparametre, usikkerhet og begrensninger basert på metodene som ble brukt av Skagseth (2021).

Beregningsmodell

Snøsmelting på tak er en kompleks fysikk, hvor mange parametre vil påvirke. I forbindelse med forstudien til utarbeidelsen av modellen gjorde Skagseth et litteratursøk for å avdekke studier av snøsmelting på tak og isdannelse i nedløp fra kompakte tak. Litteratursøket avdekket enkelte studier av snø på tak og snøsmelting og isdannelse og herunder enkelte metoder å beregne snøens oppførsel.

Blant funnene for metoder å beregne snøens oppførsel var Zhou et al. (2018), som gjennom studier på kombinasjon av faktorer som påvirker snøsmelting og snø på tak, utarbeidet en formel for snøsmelting og en modell for snødriv. Formlene og modellen var ment å forutse snøformasjon på taket, og er illustrert i Figur 17 og beskrevet i Ligning 5, med forklaring av parameterne i Tabell 6. Modellene ble av Skagseth regnet som for avansert, da de tar for seg mange faktorer og parametre som det ikke vil være realistisk å finne gode verdier for i praktiske tilfeller og er krevende å utrede teoretisk. Dette være seg snøens volumetriske varmekapasitet, langbølget stråling eller varme fra omgivelsene. Disse faktorene er vanskelig nok å måle i et laboratorium, men utenkelig å finne ut i det enkelte byggeprosjekt. Formelen ble vurdert som teoretisk solid, men fullstendig ubrukelig til praktiske formål.



Figur 17: Modell for energibalanse i snølagene. Figur fra Zhou et al. (2018)

$$(\rho c)_s^i H_s^i \frac{\partial T_s^i}{\partial t} = L_a - L_t + S_n + H + E_l + Q_c + Q_p + Q_r \quad (5)$$

Tabell 6: Parametrene brukt i Ligning 5. Parametrene beskrives matematisk i Zhou et al. (2018)

$(\rho c)_s$	Snøens volumetriske varmekapasitet	H_s	Snølagets tykkelse
T_s	Snølagets temperatur	S_n	Kortbølget ståling
L_a	Atmosfærisk langbølget stråling	L_t	Utgående langbølget stråling
E_l	Varme fra snø til omgivelsene	H	Varme fra omgivelsene
Q_r	Energitap fra taket	Q_c	Varmeledning
Q_p	Varme fremmet av nedbør		

Andre studier som ble avdekket var Mackinlay et al. (2000) og Nielsen and Claesson (2011). Mackinlay et al. (2000) ser i sin studie på hvordan snøfordeling lokalt på tak, men Nielsen and Claesson (2011) i sin studier ser på snøsmelting på tak og herledes utleder flere formler for snøsmelting på tak teoretisk i stor detalj. Blant de teoretiske formlene er Ligning 6 med Tabell 7 som viser den kritiske isolasjonsverdien som må til før snøsmelting oppstår ved en gitt utetemperatur. Ved å dele begge sider av lignenden på snøens varmekonduktivitet vil ligningen vise kritisk snødybde, D_m for når snøsmelting oppstår.

$$R_m = \frac{(-T_e)}{T_i \cdot U_R} \quad \iff \quad D_m = \frac{\lambda_s(-T_e)}{T_i \cdot U_R} \quad (6)$$

Tabell 7: Parametrene brukt i Ligning 6. Parameterne beskrives videre i Nielsen and Claesson (2011)

R_m	Kritisk varmekonduktivitet	D_m	Kritisk snødybde
T_i	Innetemperatur	λ_s	Snøens varmekonduktivitet
T_e	Utetemperatur i minusgrader	U_R	Takets varmegjennomgangskoeffisient

Skagseth fant i sin vurdering at modellen og formelen til Nielsen and Claesson (2011) var mest egnet for videre arbeid. Denne modellen er basert på stasjonære forhold og representerer derfor en forenkling, men samtidig gjør den det mulig å gjøre direkte sammenligninger. Den er også praktisk lett å bruke fordi alle parametrene lar seg måle eller anta til forenklete beregninger. Imidlertid vil stasjonære forhold ikke alltid belyse de virkelige fysiske prosessene som finner sted.

Databehandling

Med utgangspunkt i formelen til Nielsen and Claesson (2011) valgte Skagseth inputparametre for innetemperatur, takets varmegjennomgangskoeffisient og varmekonduktiviten til snø, mens utetem-

peratur og snødybde ble hentet fra fra værstasjonene. Skagseth gjorde i i studien enkelte vurdering i forhold til parameterne. Parameterenes usikkerhet ble også lagt som grunn for risikovekting og diagrammet for å bestemme risiko.

Innetemperatur

Innetemperatur ble satt til 20 grader. Det ble ikke vurderte hvordan variasjoner påvirker resultatet i modellen og begrunnet hvorfor 20 grader er riktig.

Varmegjennomgangskoeffisient

Varmegjennomgangskoeffisient ble satt til 0,18 som er gjennomsnitt mellom Tek85 og Tek17 sine krav. Det ble sett hvordan endret varmekonduktivitet vil påvirke diagrammet for snøsmelting og gjenfrysning, og i en senere del av studien forsøkt med andre verdier.

Varmekonduktivitet

I modellen brukte Skagseth to ulike verdier for varmekonduktivitet; en øvre og en nedre grenseverdi. Nedre grenseverdi for snøens varmekonduktivitet ble satt til $\lambda_s = 0,06W/mK$. Grensen ble satt på bakgrunn av gjennomgåttlitteratur., hvor $\lambda_s = 0,06W/mK$ ble brukt som nedre grenseverdi og $\lambda_s = 0,18W/mK$ som øvre grenseverdi. Dette var også basert på litteratur og er gjennomsnitt av alle verdier målt av Sturm et al. (1997).

Fordelingen av grenser vil påvirke hvordan de ulike risikozonene fyller diagrammet som Skagseth (2021) benyttet for risiko. Det ble ikke vurdert hvordan endringer av varmekonduktivitet ville gi utslag og påvirke vurderingen av mulighet for utvendig nedløp.

Snøens frysetemperatur

Den nedre grensen for utetemperatur der smeltevannet fryser før det kan dreneres av taket ble satt til $-5,6^{\circ}C$ av Skagseth i studien (2021). Denne temperaturen er hentet fra litteratur hvor empiriske målinger viste at isdannelse ikke var et problem før utetemperaturen var under $-5,6^{\circ}C$ Tobiasson et al. (1998). Det ble også sett inn en grense for området mellom over $0^{\circ}C$. Området mellom 0 og $-5,6^{\circ}C$ ble antatt å være usikkert, med mulighet for noe isdannelse, men usikkert omfang og om det vil være problematisk. Grensen ved $0^{\circ}C$ satt som sikker, da is ikke vil dannes under stasjonære forhold ved høyere temperatur.

Resultat fra Skagseth sin modell

Totalt behandlet modellen til Skagseth i underkant av 5,9 millioner målepunkter fra 135 stasjoner mellom 1996 og 2021, som tilsvarer 43660 målinger per stasjon (Skagseth, 2021). Dette tilsvarer ca. 4,6 målinger utført per dag per stasjon i snitt.

Resultater fra modellen

Modellen til Skagseth brukte både datakvalitet og risikovekting for å vurdere risiko for snøsmelting og muligheten for å bruke kompakte tak med utvendig nedløp. Datakvalitet og risikovekting ble lagt sammen og presentert både som kart og som tabell. Fra resultatene sine oppga Skagseth 35 stasjoner med høyere enn 10 % risiko og datasikkerhet mindre enn 5 år, mens 18 stasjoner med datasikkerhet høyere enn 10 år og høyere risiko enn 10 %. På kartet ble røde farger og ulike markører for å skille risiko og datasikkerhet. Fargekartene og tabellene viste imidlertid ingen sammenheng mellom plassering og beregnet risiko for snøsmelting på taket. To stasjoner som på kartet lå oppå hverandre kunne ha forskjellige risiko. I Trondheim var 5 stasjoner markert, hvorav 3 indikere høyere enn 10 % risiko for snøsmelting, 2 indikerte mellom 10 % og 5 % og siste under 5 %. Også et punkt langt inne på Dovrefjell ble indikert med lav risiko.



Figur 18: Stasjoner med timesdata i Trøndelag, (Skagseth, 2021)

Studien kunne på bakgrunn av modellen derfor ikke konkludere entydig når utvendige nedløp fra kompakte tak kunne være aktuelt. Skagseth trekker i sitt diskusjonskapittel også frem den nevnte

stasjonen på Dovrefjell, Snøheim, som av modellen blir tildelt laveste risikokategorien, altså som et av de tryggestestedene for utvendig nedløp fra kompakte tak, som tegn på at modellen ikke var tilstrekkelig pålitelig.

Skagseth konkluderer likevel, på bakgrunn av resultatene fra modellen, frem at selv om resultatet fra modellen ikke kunne gi en nøyaktig vurdering av snøsmelting og gjenfrysning på tak, at modellen likevel demonstrerer prinsipper som kan benyttes videre. Dersom gode data kan skaffes, usikkerhet ved input-verdiene reduseres og regnemetoder revideres, kunne modellen være et godt utgangspunkt for videre arbeid.

Sensitivitetsanalyse av parameterne i Skagseths modell

For å avdekke usikkerheten blant input-parameterne i modellen til Skagseth, er det utført en sensitivitetsanalyse. Analysen tar utgangspunkt i de fire parameterne *varmegjennomgangskoeffisient*, *innetemperatur*, *frysetemperatur* og *varmekonduktivitet*. De fire variantene for hver parameter er vist i Tabell 8. For parametrene som bare har tre varianter, er samme verdi brukt for variant 2 og 3 i disse grafene. Utklipp fra analysen er vist i Tabell 9 og Figur 19. I Tabell 9 er verdiene som oppgis henholdsvis antall målinger i rød sone i høyre kolonne og prosentandel av målinger i rød sone vises i venstre kolonnem under hver parameterevariant. I tabellen oppgis gjennomsnitt av alle stasjoner, median for alle stasjonene, samt den høyeste og laveste verdien rapportert blant stasjonene.

Tabell 8: Parametre listet ved fremstilling grafisk

	Varmegjennomgangskoeffisient	Innetemperatur	Frysetemperatur	Varmekonduktivitet
1	0,13	18	0	0,06
2	0,18	22	-1	0,12
3	0,18	22	-3	0,18
4	0,23	25	-5,6	0,24

Som det fremkommer av grafen er det endringer i *frysetemperatur* som har størst påvirkning etterfulgt av *varmekonduktivitet*. Påvirkningen fra *varmegjennomgangskoeffisienten* og *innetemperatur* er omtrent lik og veldig lite. Dessverre er *varmegjennomgangskoeffisient* og *innetemperatur* være de faktorene som er lettest å påvirke, men *frysetemperatur* og *varmekonduktivitet* er faktorer som vil være avhengig av en rekke ytre faktorer og også er mest vanskelig å påvirke.

For *frysetemperatur* vil $-5,6^{\circ}\text{C}$ være den laveste temperaturen snø vil opptre flytende, mens frysing allerede vil skje fra 0°C og nedover. Det vil nok være mer sannsynlig at snøen vil fryse nærmere 0 grader enn $-5,6^{\circ}\text{C}$ for de fleste tak og under de fleste forhold. Som grafen for gjennomsnittsberegning viser, vil frysing allerede ved 0 grader medføre at over 18 % av alle målingene vil være i rød sone, men beste fall ved $-5,6^{\circ}\text{C}$ ca. 5 % av alle målingene vil være i rød sone.- En

Tabell 9: Resultater fra sensitivitetsanalyse: Antall målinger i rød sone vises til venstre under hver parametervariant. Prosentandel av målinger i rød sone vises i venstre kolonne.

Varmekonduktivitet	0,06		0,12		0,18		0,24	
Gjennomsnitt	4909,2	9,8	3611,0	6,9	2719,4	5,1	2062,2	3,8
Median	2383,0	7,9	1220,0	5,0	768,0	2,7	421,0	1,4
Min (Flere)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Maks	32346,0 (Kautokeino)	45,7	24371,0 (Ringebu)	41,3	21517,0 (Ringebu)	35,4	19901,0 (Ringebu)	31,0

U-verdi tak	0,1		0,2		0,2		0,2	
Gjennomsnitt	1977,1	3,7	2719,4	5,1	2719,4	5,1	3265,4	6,2
Median	397,0	1,3	768,0	2,7	768,0	2,7	1102,0	4,0
Min (flere)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Maks	19676,0 (Ringebu)	30,5	21517,0 (Ringebu)	35,4	21517,0	35,4	22699,0 (Ringebu)	39,1

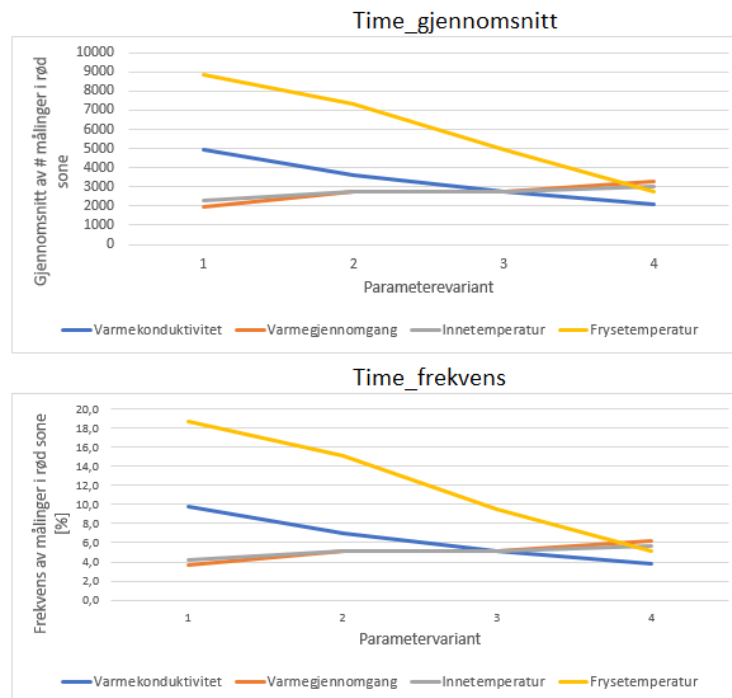
Innetemperatur	18,0		22,0		22,0		25,0	
Gjennomsnitt	2259,6	4,2	2719,4	5,1	2719,4	5,1	3005,4	5,7
Median	570,0	1,7	768,0	2,7	768,0	2,7	958,0	3,2
Min (flere)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Maks	20399,0 (Ringebu)	32,0	21517,0 (Ringebu)	35,4	21517,0	35,4	22105,0 (Ringebu)	37,3

Frysetemperatur	0,0		-1,0		-3,0		-5,6	
Gjennomsnitt	8868,0	18,7	7308,7	15,1	4930,2	9,6	2719,4	5,1
Median	5241,0	16,9	3946,0	12,8	2069,0	6,8	768,0	2,7
Min (flere)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Maks	48506,0 (Tromsø)	100,0	43189,0 (Ringebu)	100,0	33256,0 (Ringebu)	46,1	21517,0 (Ringebu)	35,4

reduksjon på ca. 70 % eller 13 prosentpoeng.

Som Sturm et al. (1997) skrev, vil $0,06W/mK$ være den laveste varmekonduktiviteten snø kan ha og vil opptre for tørr nysnø, men gjennomsnittlig varmekonduktivitete antakelig vil ligge nærmere $0,18W/mK$. Basert på grafen vil dette si endringer i varmekonduktiviet i verste fall vil gjøre at 10 % av målingene er i rød sone, mot mest sannsynlig rundt 5 %. En økning til $0,24W/mK$ vil imidlertid bare redusere andelen til 4 %, tilsvarende 1 prosentpoeng.

Innetemperatur vil i hovedsak være opp til brukerne å avgjøre. Likevel vil lavere inne-temperatur være fordelaktiv både for miljøet og for utvendig nedløp. Positivt vil det også være med godt isolerte tak, men lavt varmetap til omgivelsene.

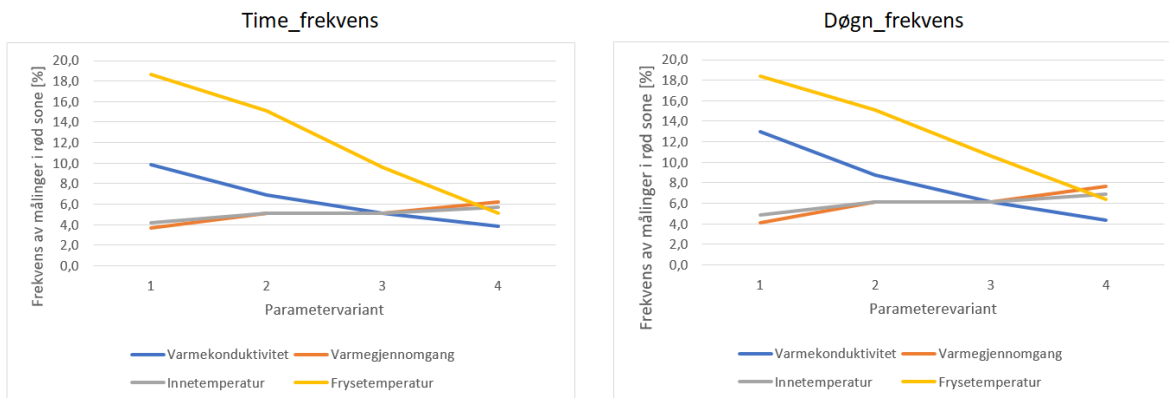


Figur 19: Grafer som viser resultatene fra sensitivitetsanalysen

4.2 Trinn 2: Endre timesdata til døgndata og sammenligning av timesdata og døgndata

Ved å bruke døgndata istedenfor timesdata ble tilgjengelige målestasjoner økt fra 188 stasjoner til 381 stasjoner, med lengre måleserier og større dekning av landet. Med døgndata vil imidlertid målingene ha lavere oppløsning i tid og ikke ta høyde for endringer iløpet av døgnet.

Resultatet fra sammenligningen av sensitivitetsanalysen er angitt i Figur 20. Her satt med timesdata til høyre og døgndata til venstre. Merk at grunnen til at grafene ikke møtes i samme punkt er at grunnscenariet for frysetemperatur er parametervariant 4, mens for de andre øvrige parameterevariantene er grunnscenariet variant 3.



Figur 20: Resultater fra sensitivitetsanalyse

Som grafene viser er de samme trendene å se både for døgn- og timesdata. Frysetemperatur vil være den faktoren som har størst påvirkning, i begge tilfeller fra rundt 18 % til 5 %. I gjennomgang av de inndataene er det små differanser, se Tabell 10 og Tabell 11. Bakgrunnen for differansen er flere stasjoner særlig i områder med ytterpunkter. Stasjonene som i begge tilfeller har høyeste verdi er begge i Finnmark, Kautokeino. Antall stasjoner i Finnmark er nesten doblet når det brukes data fra stasjoner med døgndata, istedenfor å begrense til kun stasjoner med timesdata.

Tabell 10: Frysetemperatur døgn

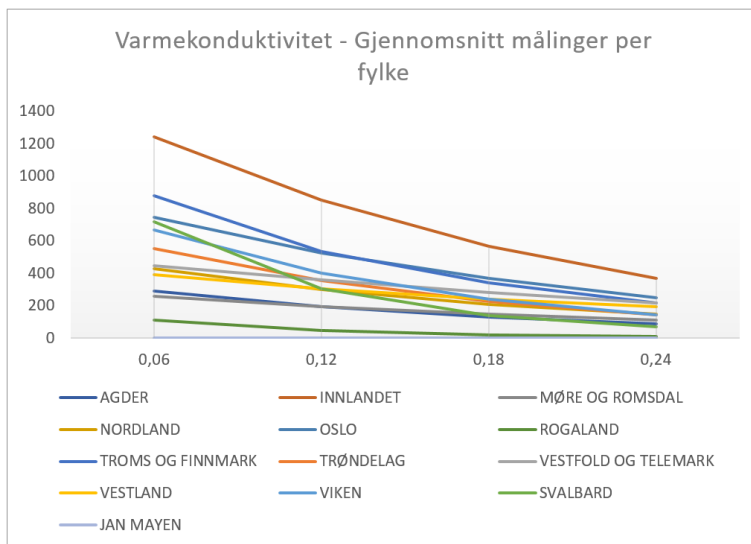
Frystemperatur	0	-1	-3	-5,6
Gjennomsnitt	18,4	15,1	10,6	6,4
Median	15,7	12,4	7,7	3,3
Min	0,1	0,0	0,0	0,0
Maks	100,0	100,0	63,9	45,1

Tabell 11: Frysetemperatur timedata

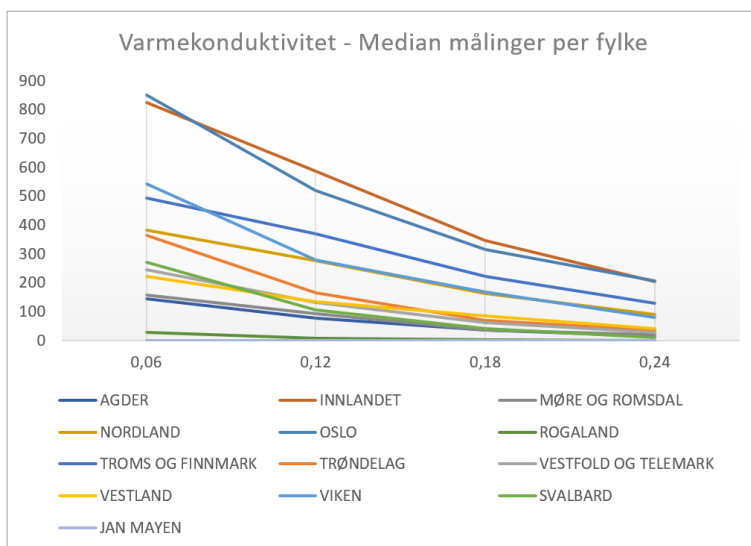
Frystemperatur	0,0	-1,0	-3,0	-5,6
Gjennomsnitt	18,7	15,1	9,6	5,1
Median	16,9	12,8	6,8	2,7
Min	0,0	0,0	0,0	0,0
Maks	100,0	100,0	46,1	35,4

Varmegjennomgang og innetemperatur vil ha litt større påvirkning, noe som vil henge sammen med tidspunkt for måling og at variasjonen gjennom dagen ikke blir hensyntatt. Varmekonduktiviteten har det største skiftet med en økning for $0,06W/mK$ fra 10 % for timesdata til 13 % for døgndata. Trenden avtar ned mot $0,24W/mK$, hvor forandringen er marginal, i begge tilfeller rundt ca. 4 %. Forandringen vil nok skyldes tidspunktet for måling, som er på kvelden som vil være kaldere.

Det spennende for varmekonduktiviteten fremkommer imidlertid ved sortering på fylker og påvirkningen endringer medfører på fylkesbasis, som vist i Figur 21 og Figur 22. Rogaland er det fylket som er minst påvirket av endringer, her ligger grafen helt ned mot null for alle verdiene. Det samme vil Agder. Dette er fylker som har kortere snøsesonger og mindre snømengde. Den samme utviklingen er også å se ved å se på medianen for fylkene. Her vil også fylker som Viken og Oslo vise store lokale forskjeller, som er enda tydeligere ved å se på differansen mellom stasjonene med høyeste og laveste påvirkning inne i hvert fylke. Forskjellene er basert på stasjonen som helhet over hele måleperioden.



Figur 21: Gjennomsnitt av resultat for varmekonduktivitet per fylke



Figur 22: Median av resultat for varmekonduktivitet per fylke

4.3 Trinn 3: Vurdering av alternative databaser

Fra litteratursøk og litteraturgjennomgang ble det avdekket flere alternative løsninger. Disse ble gjennomgått og vurdert. Enkelte av modellene er sammenlignet i Tabell 12.

Tabell 12: Sammenligning av fire værmodeller

	Fokusområde	Gridstørrelse	Kommentar
ERA 5 Land	Verden	9x9km	God kvalitet, men ikke like god oppløsning på snø som SeNorge
seNorge	Norge	1x1km	Norskmodell. Oppdatert en rekke ganger
MET Nordic	Norden	1x1km	Bruker samme løsninger som SeNorge
CERRA-land	Europa	5.5x5.5km	God løsning, men ikke like god oppløsning som SeNorge

SeNorge

Senorge.no er koblet mot MET og NVE sine databaser, og henter inn tidsserier fra målestasjonene både til MET og NVE. Dataene SeNorge gir tilgang til strekker seg fra historiske døgndata helt tilbake til 1957 og frem til i dag (Lussana et al., 2019) Modellen er utviklet også for å beregne vær- og klimadata inntil 9 dager frem i tid, basert på værprognoser. Portalen er et samarbeid mellom NVE, met.no og kartverket og inkluderer egne kart og modeller for Snø, Vann, Vær og Klima, der alle har sine bruksområder og fokusområder. For denne rapporten vil det være Snøkartene som er mest aktuelle.

Beregningsmodell

Snøkartene til SeNorge.no bruker et *single-layer temperature index model* som tar utgangspunkt i observasjoner fra værstasjoner rundt i landet (Saloranta, 2012, 2016). Modellen bruker døgntemperatur og nedbør som input-verdier sammen med snøvannekvivalent (SWE), snødybde (SD) og snømassetettheten (ρ) (Engeset, 2010). Resultatet presenteres gjennom med et observasjonsgrid som grunnlag og hvor det konstrueres kart med en oppløsning på 1×1 km.

Erfaring med modellen

En gjennomgang og evaluering av modellen som ble gjort i 2012 (Saloranta, 2014) viste det at snømodellen SeNorge bruker ofte overestimerer både SWE or ρ , og at overestimeringen av SWE

øker med snømengden gjennom snøsesongen (Saloranta, 2012). Etter gjennomgangen av modellen, ble modellen siden oppdatert både i 2016 og i 2019 (Lussana, 2020). Oppdateringen i 2016 inkluderte implementering av algoritmer for forbedret temperaturindeks snøsmelting, snøalbedoforfall og snøskred samt en analytisk algoritme for gjenfrysing. Den siste oppdateringen i 2019 gikk ut på å implementere en tapsterm for sublimering/fordampning. Etter oppdateringene ble modellen ansett som mer nøyaktig enn tidligere .

Fra analyser av modellen gjort av NVE i 2022, med særlig fokus på interpoleringen av værdata og hvordan modellen tar hensyn til variasjoner i nedbøren- og temperaturen ikke bare varierer fra sted til sted (i en gitt høyde), men også med høyden. I analysen ble det vist hvordan temperaturen stort sett synker med høyden i virkeligheten. Den tredimensjonale interpoleringen som SeNorge bruker tar høyde for dette og bruker observasjoner av nedbør og temperatur for ulike høyder til å korrigere for det.

Andre gjennomganger av modeller med fokus på snøkartene, oppsummerer seNorge.no som et godt bilde av snøforholdene de fleste steder, men at det er steder i fjellet særlig i Sør-Norge og innlandet i Nord-Norge hvor kartene ikke stemmer (Varsom.no, 2020). Begge steder opplever ofte svært mye snø.

For denne oppgaven vurderes disse problemene å være av mindre betydning, da det ikke er aktuelt med utvendige nedløp fra kompakte tak i områder med så store snømengder. Alt i alt viser erfaring at modellen til SeNorge jevnt over er god og at interpoleringen mellom stasjoner med værdata fungerer. Det er i forarbeidet til oppgaven sett på flere alternativer, men det er ikke funnet alternativer som passer bedre.

4.4 Trinn 4: Data fra SeNorge og vurdering av modellen

For å fylle “hullene” mellom værstasjoner er det sett videre på landsdekkende værmodeller som SeNorge. Her vil værdata fra hele landet være tilgjengelig på dagnivå tilbake til 1959. Det er hentet ned data fra forskjellige byer i landet. De innhentede dataene er til sammenligning med data fra Seklima kontinuerlige for hele tidsperioden. Dataene fra SeNorge dekker også større områder enn Seklima sine data.

Vurdering av data fra SeNorge

Siden SeNorge bruker døgndata som inputparamtere, vil det ikke være hensiktsmessig å sammenligne data fra SeNorge med døgndata fra Seklima på samme måte som sammenligningen mellom timesdata og døgndata. En empirisk vurdering basert på litteratursøk og tilgjengelig informasjon om modellen funnet gjennom utforskende litteratursøk, avdekket likevel interessante funn for modellen.

4.5 Trinn 5: Produsere datasett og sensitivitetsanalyse

Modellen ble kjørt på SeNorge sine snødybde- og temperaturdata for et område tilsvarende Rogaland fylke, med variasjoner i de to viktigste rammeparametre for å undersøke sensitiviteten til variasjoner i disse. Antall kvadratkilometer på kartet i de ulike risikozonene for hver variasjon er oppsummert i Figur 23. Fordi mesteparten av området er fjell og innland vil rød sone dominere dataene. Dersom de strengeste rammeparametrene legges til grunn - snø med lav varmekonduktivitet, som gjenfryser ved 0°C - vil kun 154 kvadratkilometer av området regnes som “grønn sone”. Tallet stiger til nesten 10 000 kvadratkilometer dersom snøen antas å isolere dårlig og smeltevannet gjenfryse først ved lav temperatur.

Fra sensitivitetsanalysen ble det sett hvor mye endring i de ulike parameterne påvirker antall målepunkter innenfor rød-, gul- og grønn sone. Det er likevel vanskelig å forstå utfallet og omfanget.

For å vurdere sensitiviteten av lengde på rød periode, ble det gjort nye kjøring med perioder redusert til 4 og økt til 10. Med utgangspunkt i det som ble antatt å være mest realistisk vises variasjonene i Figur 24. Av figuren kan man formode at ugunstige perioder på mer enn 7 dager ofte også varer mer enn 10 dager, ettersom forskjellen i resultatene for 7 og 10 dager er såpass liten. Størst endring skjer når minste lengde for periodene reduseres til 4 dager, altså at det telles som en ny periode når risiko for gjenfrysing oppstår i fire dager på rad. Det virker som at ugunstige perioder på mellom 4 og 7 dager er en god del vanligere enn perioder på 7 dager eller mer.

		0,06	0,12	0,18
Frysetemperatur [$^{\circ}\text{C}$]	0	26129	24348	23212
		1494	2100	1755
		154	1329	2810
	-3	23125	21126	20263
		2123	1956	1508
		2529	4695	6006
	-5,6	20342	18963	17763
		2337	1738	1907
		5098	7076	8107

Figur 23: Antall kvadratkilometer på kart i hvert risikotone ved ulike antakelser for inputparametre

Lengde på periode [døgn]

4	7	10
23467	21126	20008
1656	1956	1846
2654	4695	5923

Figur 24: Forsøkt med ulik periode for gjenfrysning for antatt mest realistiske parameterverdier

4.6 Trinn 6: Generere kart og tabeller sammenligning med klimasoner

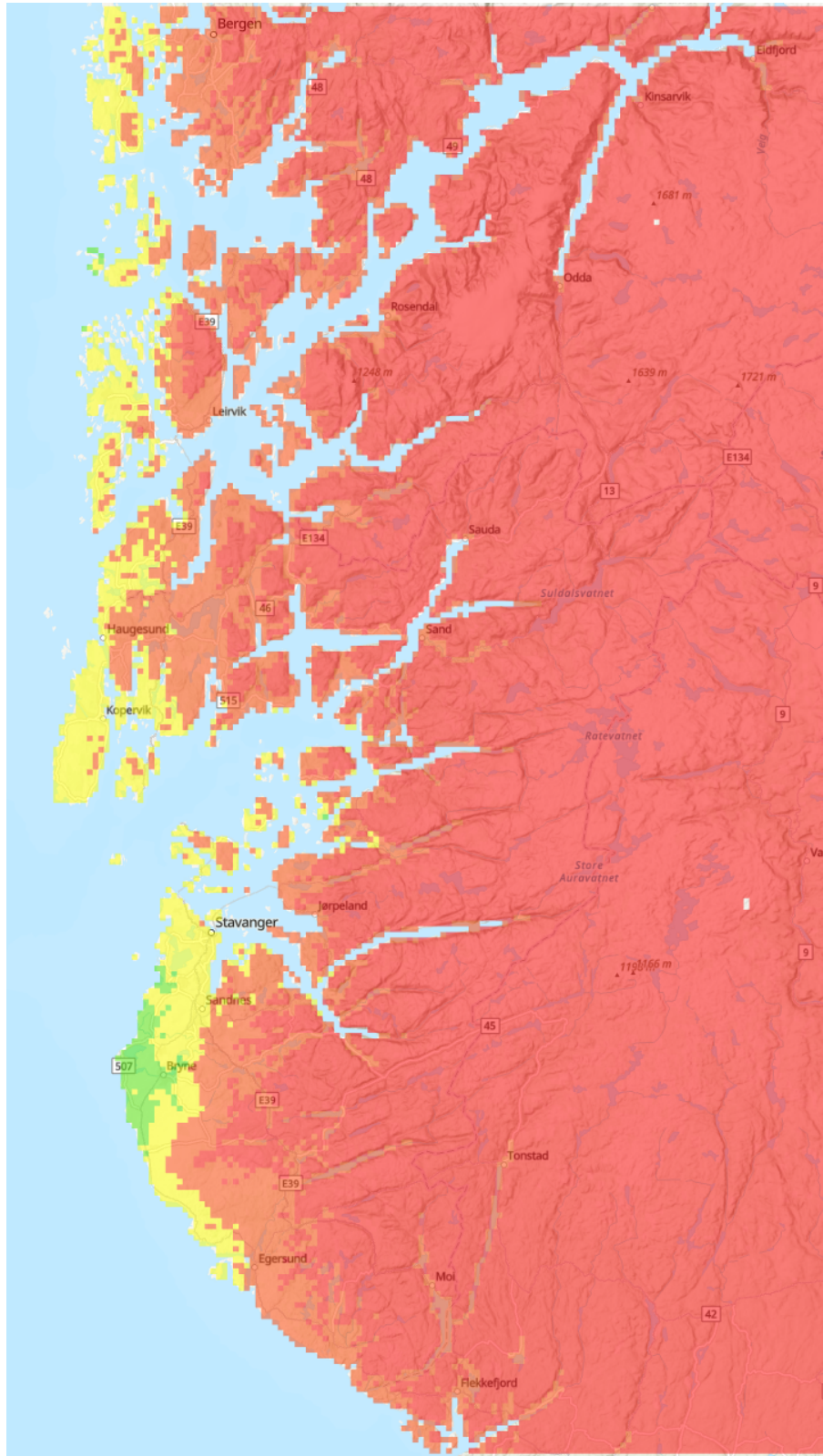
Det er generert ett kart per kjøring, med variasjoner i snøens varmekonduktivitet og smeltevannets gjenfrysingstemperatur. Parametrene innetemperatur og takets U-verdi var uendret i alle kjøringene. Sensitivitetsanalysen viste at disse hadde liten påvirkning på resultatene. Alle kartene ligger vedlagt som vedlegg 7. Tre særlig interessante kart presenteres nedenfor. Dette er kartet generert fra de mest konservative verdiene av input-parametre, kartet generert med de minst konservative verdiene, og et kart hvor de antatt mest realistiske verdiene er brukt.

Dersom snøens varmekonduktivitet antas å være lik $0,06W/mK$ og smeltevannet antas å fryse ved $0^{\circ}C$, blir risikokartet som i Figur 25. Ved disse forutsetningene har ugunstige forhold oppstått i sammenhengende perioder på mer enn 7 dager, 20 eller flere ganger i løpet av måleperioden over nesten hele kartet (rød farge). Kun en liten del av kysten av Jæren, utenfor Bryne, har opplevd færre enn 10 slike ugunstige perioder (grønn farge). Dersom disse verdiene legges til grunn vil høyeste risikosone opptre nesten overalt. Merk at kartet ikke nødvendigvis forteller noe om egnetheten til løsningen med utvendige nedløp fra kompakte tak, da det ikke er kjent hvor mange og lange ugunstige perioder som må inntreffe før byggskader oppstår.

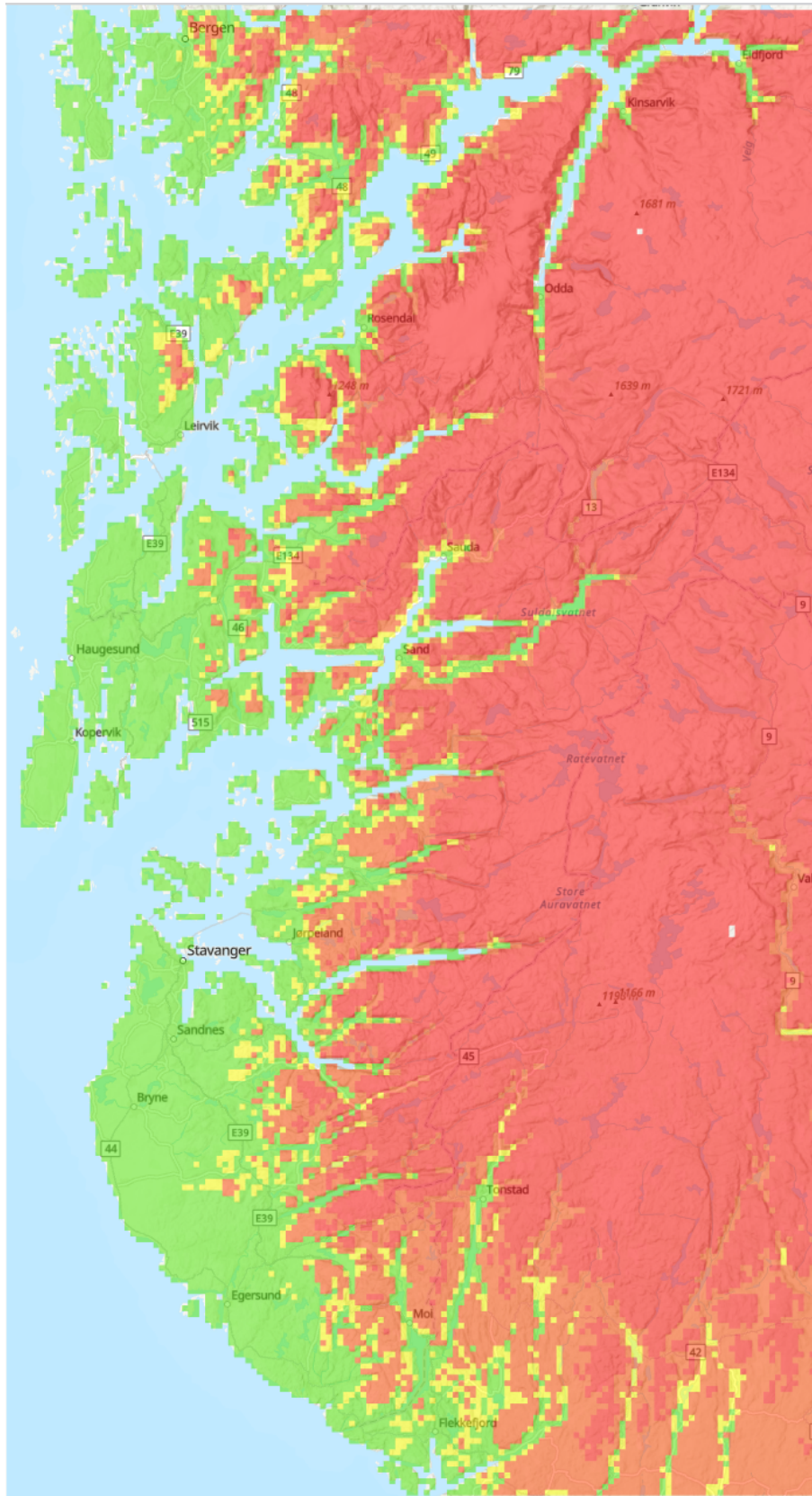
I motsatt ende av skalaen genereres kartet Figur 26. Snøens varmekonduktivitet antas å være $0,24 W/mK$ og gjenfrysing skjer først ved $-5,6^{\circ}C$. Denne varmekonduktiviteten er høyere enn målt gjennomsnittlig varmekonduktivitet i målingene til Sturm et al. (1997), men vil være rimelig

for våt, sammentrykket og gammel snø. Minste risikoklasse er da utbredt over hele kysten, også på lesiden av øyer og innover langs fjordene. Grønn sone finnes også i dalfører som strekker seg innover i landet, som Suldal og Sirdal. Merk at Setesdal (helt til høyre, litt sør for midten av utsnittet) fremdeles befinner seg i høyeste risikoklasse under disse antakelsene.

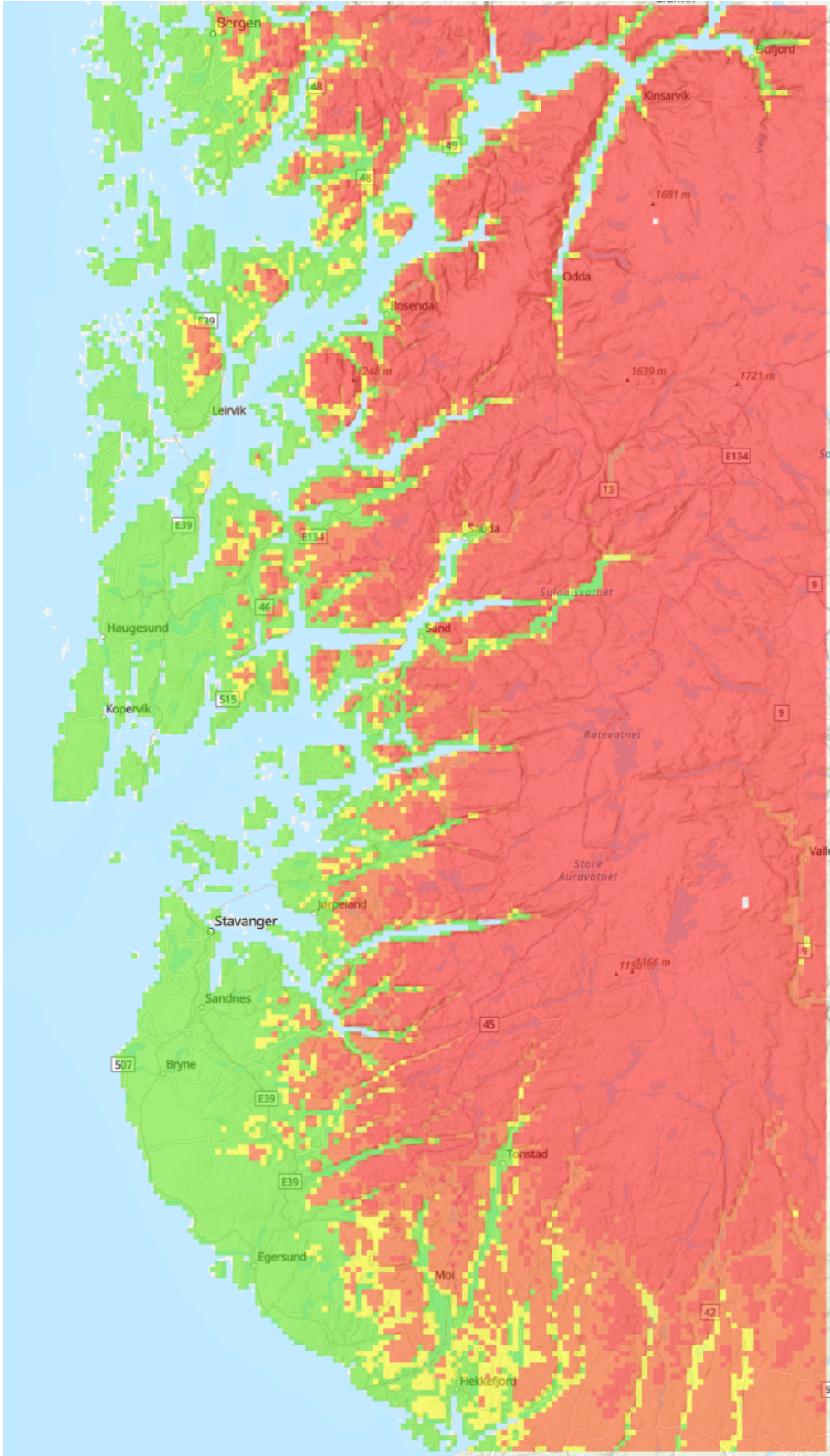
Som mest realistiske kart er det antatt en varmekonduktivitet for snø lik $0,18 \text{ W/mK}$, og en gjenfrysningstemperatur på -3°C , se Figur 27. I studien til Sturm et al. (1997) ble gjennomsnittlig varmekonduktivitet til snø målt til $0,18 \text{ W/mK}$, mens -3°C er en verdi mellom øvre og nedre gjenfrysningstemperatur etter studien til Tobiasson et al. (1998). Dette vil dermed kanskje være det kartet som gir det riktigste bildet av risikoområdene. Kartet ligner på det minst konservative anslaget, med litt større områder i gul sone innerst i fjordbunner og i fjellområdene sør i Rogaland. Mesteparten av Jæren og Haugalandet er helt grønne.



Figur 25: Kartresultat for antatt mest konservative resultat



Figur 26: Kartresultat for antatt minst konservative resultat



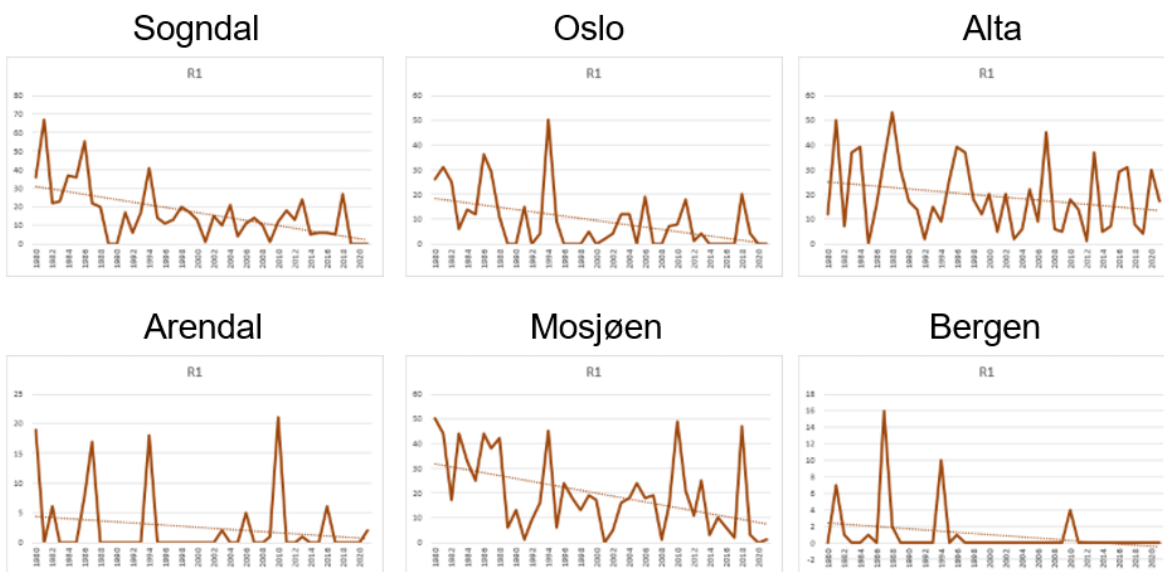
Figur 27: Kartresultat for antatt mest realistisk resultat

Vurdering av kvalitet og begrensninger av datagrunnlag

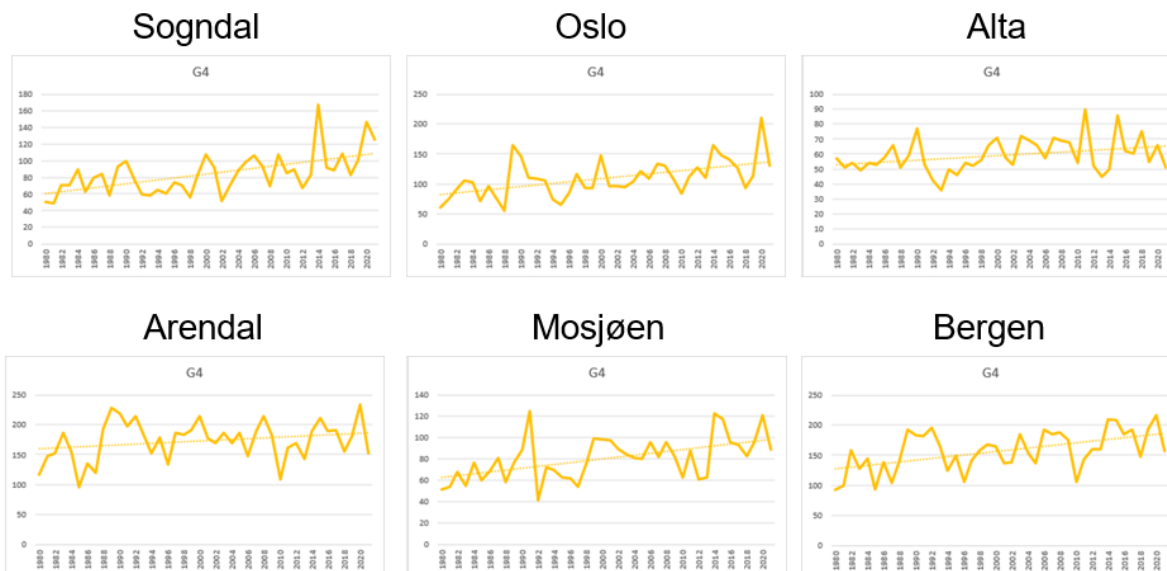
En utfordring med modellen er likevel at værdataene som analyseres ikke er kontinuerlige og heller ikke dekker hele landet. Det er ca. 320 værstasjoner i landet som driftes og leverer målinger av klimaet (Vegdirektoratet, 2012). Av disse er det imidlertid bare ca. 246 som måler både snødybde og temperatur. Plasseringen av værstasjonene og dekningen graden av landet gir store geografiske områder som ikke er dekket. Stasjonenes plassering er også begrenset til områder med interessante klima og ikke alltid de områdene der folk bor og eller en løsning med utvendig nedløp er aktuell å se på.

4.7 Trinn 7: Trender og utvikling

For å se på utvikling over tid i en større norsk kontekst ble det hentet ned værdata fra byer spredt over hele landet, over en tidsperiode fra 1. januar 1980 til 31. desember 2020. For hver by ble det laget åtte grafer, én for hver sone i diagrammet i Figur 15. Alle grafene er lagt ved oppgaven som vedlegg 8, men et utvalg vises i Figur 28 og Figur 29. Sonene R1 (høy risiko for isdannelse) og G4 (plussgrader og ingen snø) er valgt ut for å illustrere utviklingen og forklare hvordan grafene ser ut.



Figur 28: Antall dager hvert år i risikosone R1 (høy risiko for isdannelse) i utvalgte byer



Figur 29: Antall dager hvert år i risikosone G4 (plussgrader og ikke snø på bakken) i utvalgte byer

For resten av grafene henvises det til vedlegg 8. Noen observasjoner beskrives her: Alle byer har en synkende trend for målinger i sone R1, mens trenden stiger for målinger i sone G4. Altså har det over tid blitt færre dager i året med høy risiko for isdannelse, og færre dager med snø på bakken i det hele tatt. Alle byer bortsett fra Alta og Tromsø har synkende O1-verdi (stor fare for snøsmelting, usikkert hvorvidt smeltevannet gjenfryser). Dette antyder at det over tid har blitt vanligere med snø og temperaturer like under frysepunktet i Nord-Norge. Alle byer bortsett fra i Innlandet har synkende trender i sone G2 (snø på taket, men nullisotermeren går ikke gjennom snølaget). Målinger i sone G1 (snø på bakken, plussgrader i lufta) er synkende for alle kystbyer i Sør-Norge. Sogndal og Stryn har svakt stigende trender, det samme har Alta og Tromsø. Det begynner å flate ut i Fauske og Bodø. Mo I Rana er eneste by med stor stigning. Målinger i sone G1 og O1 ser ut til å følge hverandre. O1 henger litt igjen og har en noe flatere trendlinje.

Grafene viser i praksis hvordan klimaendringene har gjort utslag i Norge. Det blir mindre snø langs kysten og i Sør Norge (G1 synker). Temperaturen blir høyere (G2 synker og G4 stiger). Lavere R1-verdier over hele landet henger igjen sammen med klimaendringene, mindre snø og høyere temperatur. En del av toppene i R1-oversikten indikerer at de snørike årene stor sett påvirker hele landet. De blir imidlertid (dessverre) mildere og færre. De ser ut til å opptre annenhver eller hvert tredje år, som er noe flere ofte hevder om snørike og snøfattige år. Den observerte utviklingen stemmer overens med litteraturen, som f.eks. Lisø (2007), Flæte (2010) og Masson-Delmotte (2021).

Det fremkommer også av grafene at det er store variasjoner fra år til år, selv om trenden er synkende. Som sett i R1-grafen for Arendal i Figur 28 er det mange år hvor risikoen for isdannelse i praksis er null, men plutselig kommer en snørik vinter med mange dager i høyere risikosoner. I Arendal kan et tak ha stått uten istapper fra 1994 til 2009, før forholdene plutselig ble svært

risikable vinteren 2010. Dette illustrerer at risikoen for isdannelse kan svinge brått, og dermed at en dårlig løsning tilsynelatende kan fungere fint i mange år før den blir satt på prøve av risikable værforhold.

5 Diskusjon

Dette kapitlet er strukturert rundt de tre forskningsspørsmålene, med et underkapittel for hvert spørsmål.

5.1 Hvilke begrensninger, usikkerhetsmomenter og forbedringsområder har modellen til Skagseth?

Skagseth sin modell viser prinsipper for metoder som kan videreutvikles. Stasjonære beregninger av forhold i snøen for å bestemme risiko for snøsmelting og gjenfrysing gir en drastisk forenkling av fysikken, men dette gjør det også mulig å benytte relativt få parametre som inndata i beregninger. Slik kan temperatur og snødybde brukes direkte for å avgjøre om situasjonen på et gitt tidspunkt gir risiko for isdannelse. Lange dataserier med temperatur- og snødybdemålinger vil dermed si noe om hvor ofte risikable situasjoner oppstår på en gitt lokasjon. Disse dataene kan igjen brukes til å angi et risikotall for lokasjonen.

En kvalitativ vurdering av modellen viste noen begrensninger og usikkerhetsmomenter som modellen inneholder, som må løses for at modellen skal fungere.

Begrensninger

Blant begrensninger som særlig påvirket modellen til Skagseth var:

- Begrensninger i dataserienes lengde (tid)
- Begrensninger i dataserienes mengde (antall)
- Begrensninger i målestasjonenes plassering (variasjon)

Modellen ble basert på målinger fra værstasjoner som måler snødybde på timebasis. Av 381 målestasjonene som Meteorologisk institutt har plassert ut i landet, begrenset studien seg til kun 183 av disse stasjonene. Dette gav svært begrenset datamengde for å vurdere hvor utvendige nedløp kan fungere i landet som helhet. Målestasjonenes plassering er begrenset til steder hvor det faller nok snø til at det er interessant å måle snødybden en gang i timen. Som del av studiet presenteres et kart over alle stasjonene, hvor stasjoner på vestlandet langs kysten var mangelvare. Å basere modellen på kun disse værstasjoner gav resultatet en form for prøvetakingskjevhet, skriver Skagseth selv. Vestlandet er den delen av landet Byggforskserien nok legger opp til at løsningen kan fungere. Med

kun 4 stasjoner tilgjengelig langs kysten fra Larvik til Molde er det svært lite data å vurdere. Også tilgjengelig data over tid var begrenset, særlig for stasjonene langs kysten, som i stor grad ble rangert med lav datakvalitet på grunn av få år med sammenhengende data.

Å begrense datagrunnlaget til kun stasjoner med både snømåling og timeregistrering gav modellen en veldig lite grunnlag for å gjøre en helhetlig vurdering av hvor i landet løsningen kan brukes. Mesteparten av landet har ikke gode nok værdata tilgjengelig. Dette vurderes å være den største begrensningen.

Usikkerhetsmomenter

Som del av studien gjorde Skagseth en vurdering av enkelte av parametre. Det ble imidlertid ikke belyst hvordan endring av parameterne ville påvirke resultatet eller tatt høyde for utvikling og trender og variasjoner i datagrunnlaget. Enkelte av parameterne som ble brukt har stor usikkerhet og vil i stor grad påvirke hvor kompakte tak med utvendig nedløp kan brukes.

Snøens varmekonduktivitet

Snøen varmekonduktivitet er sentral for termiske simuleringer og beskriver snøens varmeledningsevne. Varmekonduktiviteten svært vanskelig å måle, da den er sensitiv for både ytre og indre påvirkning, og den endrer seg når snøen smelter eller fryser. Snøens varmekonduktivitet kan i stor grad sammenlignes med isolasjonsmaterialer som brukes i bygg, der tørr snø og ny snø med høyt luftinnhold isolerer godt, mens eldre, våt snø og sammenpresset snø har mindre luftinnhold og dårligere isoleringsevne.

I modellen til Skagseth forutsettes stasjonære forhold. Det blir imidlertid ikke undersøkt hvordan faktiske forhold avviker fra stasjonære forhold. Modellen bruker tidsdata og snødybde over tid, men vurderer ikke nærmere hvordan snøens egenskaper vil endres utover å vurdere ulike verdier for varmekonduktivitet. I oppgaven brukte Skagseth to verdier for varmekonduktivitet, $0,06W/mK$ og $0,18W/mK$ som øvre og nedre grense. Det er imidlertid stort sprik mellom disse og ble ikke gjort nærmere vurderinger av dette.

Smeltevannets frysetemperatur

Smeltevannets frysetemperatur er preget av usikkerhet. Normalt vil vann fryse rundt $0^{\circ}C$. Likevel vil varmegjennomgang fra taket, stråling fra solen mm. medføre at smeltevann kan opptre flytende ved lavere utetemperaturer enn $0^{\circ}C$, i hvert fall en stund. Muligens kan smeltevannet rek-

ke å renne vekk fra taket før det fryser igjen. Skagseth fant i sin forstudie studier hvor det ble gjort empiriske målinger av isdannelsen og snøsmelting (Skagseth and Bunkholt, 2019b). I studiet Tobiasson et al. (1998) ble det sett på isdannelse på en taket av et kaldt loft med utilstrekkelig lufting. Her ble det sett hvordan snøen smeltet ned til $-5,6^{\circ}\text{C}$ utetemperatur, så lenge lufttemperaturen på loftet var over $-1,1^{\circ}\text{C}$. Ved temperaturer høyere enn $-5,6^{\circ}\text{C}$ rant mesteparten av smeltevannet vekk fra taket før det rakk å fryse igjen og kun en mindre mengde is ble dannet. Takets utforming vil ha stor betydning for når snøens smelter og fryser på taket. Skagseth tok utgangspunkt i funnet fra Tobiasson et al. (1998) og brukte $-5,6^{\circ}\text{C}$ som kritisk temperatur for isdannelse med og regnet området mellom 0 og $-5,6^{\circ}\text{C}$ å være usikkert. For området over 0°C vil det ikke dannes is under stasjonære forhold.

Det er ikke funnet litteratur som verken bekrefter eller avkrefter nærmere frysetemperatur. Det er likevel i denne studien sett på variasjoner med -1°C og -3°C som frysetemperatur.

Forbedringsområder

Som forbedringsområder vil det være viktig å etablere et mer fullstendig datagrunnlag. Begrensninger til kun værstasjoner med timesdata reduserer datagrunnlaget og områdene som er tilgjengelig. Det vil også være mer hensiktsmessig å evaluere ulike parametere og deres utslag heller enn å vekte risikotall basert på en antatt risiko. Videre er det hensiktsmessig å finne en annen vurderingsform enn datasikkerhet. Datasikkerhet sier lite om klima og ble sett gi stor utslag i modellen.

5.2 Hvordan kan modeller gi mer dekkende data for å vurdere risiko for isdannelse i kompakte tak med utvendig nedløp?

I gjennomgangen av modellen til Skagseth ble det konkludert at manglende datagrunnlag er et viktig usikkerhetsmoment. For å gi mer dekkende data for å vurdere risiko for isdannelse på kompakte tak med utvendig nedløp, er det forsøkt å bruke værmodeller med mer dekkende data enn timesdata. Timesdata er ideelt, men tilgangen på data er for svak til å trekke entydige konklusjoner for mesteparten av landet. I første omgang ble det forsøkt med døgndata fra værstasjoner. Senere ble data fra værstasjoner byttet ut med modellerte døgntemperaturer og snødybder fra en landsdekkende værmodell. Sensitivitetsanalyser avdekket at risikoberegninger basert på døgndata vil gi omtrent tilsvarende resultater som beregninger basert på timesdata. Litteratursøket og gjennomgang av værmodeller la grunnlag for at SeNorge sin værmodell ville være den beste tilgjengelige datakilden å gå videre med for beregninger i Norge.

En gjenstående usikkerhet som enda ikke har latt seg løse er hvilke verdier som bør brukes for snøens varmekonduktivitet, smeltevannets gjenfrysingstemperatur, og hvor lenge/ofte kritiske

forhold må pågå før det oppstår problemer. Dette er inputparametre som inngår i alle kjente beregningsmodeller og som ikke har latt seg verifisere. Litteraturen har gitt grunnlag for antagelser, men det gjenstår å bestemme nøyaktige grenseverdier. Sensitivitetsanalysen viser at enkelte av disse parameterene også har svært stor påvirkning på resultatene. Derfor har det i oppgaven blitt kjørt flere forskjellige iterasjoner av modellen basert på ulike input-verdier for de usikre parametrene, altså snøens varmekonduktivitet, gjenfrysingstemperatur og kritisk lengde på ugunstige perioder. Modellen returnerte kart hvor hver kvadratkilometer av det undersøkte område ble farget etter risikokategorier, definert som hvor ofte det oppstår sammenhengende perioder med risikable forhold. Til sammen ble modellen kjørt for 19 forskjellige konfigurasjoner av de usikre parametrene, og det ble generert tolv kart som illustrerer hvordan risikobildet endrer seg avhengig av valgte parametervarianter.

Usikkerhet til tross vil kartene fremdeles kunne brukes for å indikere risiko for isdannelse ved brukt av utvendig nedløp på de undersøkte områdene. Kartene gir tydelige indikasjoner på steder der det vil være mindre risiko for isdannelse. Selv med de mest konservative verdiene vil det være steder som modellen betegner som helt grønne. I kartutsnittet omfatter dette området langs kysten på Jæren, fra Bryne og utover, samt ytterst på Karmøy. Med mindre konservative og kanskje mer realistiske verdier omfatter de grønne sonene hele Jæren, mesteparten av Haugalandet og i hovedsak alle kystområder i utsnittet fra Flekkefjord til Bergen. Fjordbunnene er også grønne under disse forutsetningene. Selv de minst konservative kjøringene viser høy risiko i innlandet, f.eks. Setesdal, og høyereliggende strøk langs kysten, f.eks. fjellene på Stord og byfjellene rundt Bergen.

Interessant nok finnes det områder som skifter fra gult til grønt avhengig av forutsetningene. Feltundersøkelser i disse områdene kan være aktuelt for å verifisere modellen. Dette gjelder spesielt fjordbunnene og dalstrøk i lavlandet ut mot kysten, f.eks. Odda, Eidfjord og Tonstad. Dersom det erfaringsmessig går bra å benytte utvendige nedløp fra kompakte tak på disse stedene, vil det indikere at de mindre konservative anslagene kan være mer riktige enn de konservative.

Når anslagene blir mindre konservative er det også tendenser til at områdene som er gule i større grad blir grønne, mens områder som er røde forblir røde. Altså blir områdene med middels høy risiko mindre når forutsetningene endres. Områdene trender mot enten høy eller lav risiko og områder i grenseområdene blir færre. Det betyr at områdene innenfor utsnittet enten er godt egnet eller dårlig egnet og kanskje-områdene er små og få.

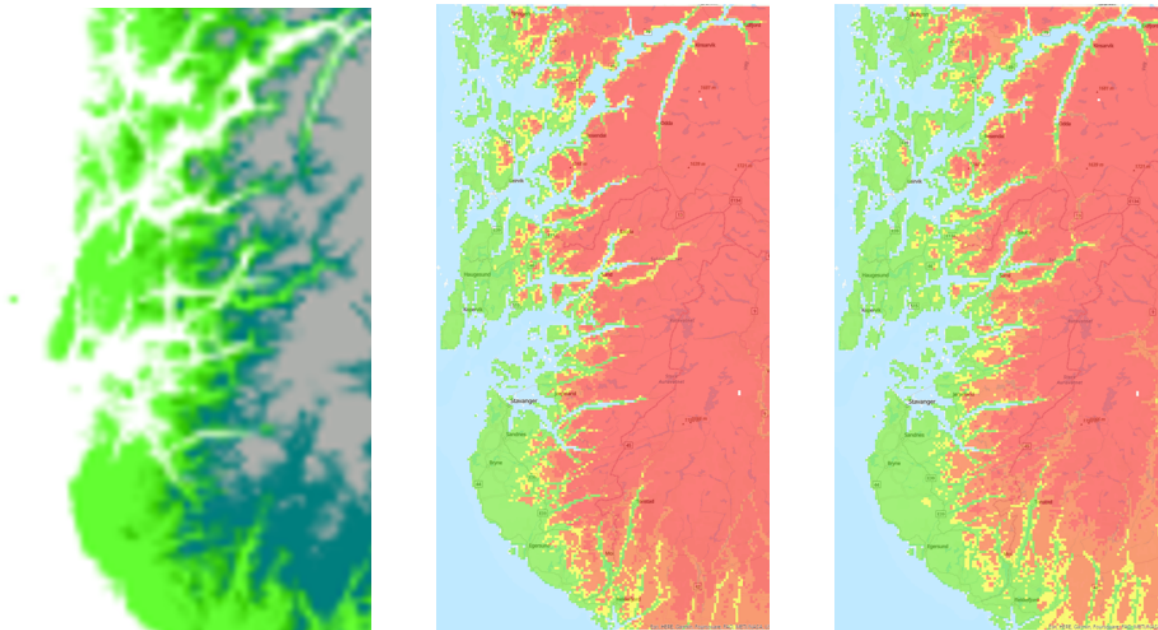
Usikkerheten i modellen kan potensielt reduseres ved å bestemme sikrere verdier for noen av inputparametrene. Temperaturen der smeltevannet fryser før det kan renne av taket (gjenfrysingstemperaturen) kan la seg undersøke gjennom felt- eller laboratorieforsøk. Den vil nødvendigvis avhenge av lokale forhold, men forsøk kan likevel bestemme en standardisert verdi som kan brukes i beregninger. Det samme gjelder for å fastslå hvor lenge/ofte kritiske forhold kan oppstå før det forekommer skadelig isdannelse. I denne oppgaven er det antatt verdier fra 3 til 10 dager, men i virkeligheten kan den kritiske perioden være kortere, lengre eller et sted i midten og også avhengig av ytre og

lokale forhold. For snøens varmekonduktivitet antas det at det vil være komplisert å definere en verdi som kan brukes i beregningene, da varmekonduktiviteten varierer veldig avhengig av lokale forhold, men det hadde vært til stor nytte hvis det lot seg gjøre å definere en standard verdi. En nøyaktig verdi vil også være avhengig av tid. Nysnø vil ikke opptre som nysnø mer enn en kort stund før ytre påvirkning vil endre snøens egenskaper. Mens nysnø mot taket vil oppleve å tine, kan det hende at nysnø som kommer oppå eksisterende snø vil presses sammen under egen vekt, fryse og tine som følge av solstråling og danne en hard ytre hinne eller den kan rett og slett blåse bort. Dette vil ha stor påvirkning for hvordan varmekonduktiviteten til snølaget utvikler seg.

I modellen er det benyttet værdata fra de siste 40 årene. Været vil forandre seg som følge av klimaendringer og det synes i datagrunnlaget at endringer allerede har skjedd. Når modellen baserer seg på målinger 40 år tilbake i tid, vil nødvendigvis halvparten av målingene komme fra klimaet som fantes for over 20 år siden. Å basere beregningene på en kortere og nyere klimaperiode vil i større grad reflektere dagens klima, likevel vil det være variasjoner i været som da ikke vil dekkes. Det vil også være store variasjoner fra år til år, hvor her ekstremverdiene vil påvirke enkelte områder hardere enn andre. Som det fremgår i vurderingen av datagrunnlaget er værmodellen heller ikke perfekt. Fra erfaringene som er sett på, meldes det avvik mellom det faktiske været og det beregnede været som gjengis i værmodellen. Det kan riktignok nevnes at avvik i datagrunnlaget faller utenfor problemstillingene i denne oppgaven.

Resultatene ved å bruke datagrunnlaget fra seNorge sin værmodell, gir likevel et godt datagrunnlag for å vurdere risiko for isdannelse i utvendig nedløp fra kompakte tak. Oppløsningen på modellen gir en dekningsgrad som gjør det mulig å vurdere hvilke områder av landet hvor det er mindre risiko for isdannelse i utvendige kompakte nedløp. Med nok tid og datakapasitet kan værdata fra seNorge sin værmodell enkelt skaleres opp og gi resultater for hele landet.

Ved å sammenligne de genererte kartene med klimasonekartet fra Köppen-Geiger systemet, kan det se ut som områdene med lav risiko i stor grad tilsvarer områdene som karakteriseres som *temperert klima*, i hvert fall innenfor det utsnitt som er vurdert i beregningsmodellen. Figur 30 viser klimasonekartet til Köppen-Geiger for Rogaland sammen med kartet med varmekonduktivitet satt til $0,18W/kK$ og frystetemperatur på henholdsvis $-3^{\circ}C$ $-5.6^{\circ}C$. Her der tydelige sammenhenger mellom *grønne* områder i området med *temperert klima*. Videre undersøkelser for resten av landet er nødvendig og ytterligere vurdering av varmekonduktivitet og frystetemperatur. Dersom likheten likevel kan la seg verifisere, kan det bety at Köppen-Geigers klimasonekart kan benyttes til forenklet prosjektering. Implikasjonen er da at områdene betegnet som *temperert klima* har lav risiko for isdannelse i utvendige nedløp fra kompakte tak, mens *kontinentalt klima* og *arktisk klima* er uegnet.



Figur 30: Sammenligning av Koppen-Geiger klimasonekart (Peterson, 2016) og to klimakart med L18T3 og L18T5.6.

5.3 Hvordan har klimautvikling påvirket risiko for isdannelse i kompakte tak med utvendig nedløp?

At det skjer endringer i klimaet er tydelig både med kortere vintre, mindre snø, mer regn og høyere temperaturer. Dette fremkommer så vel fra teori som fra innsamlede værdata. Utfordringene med utvendige nedløp fra kompakte tak er hovedsakelig knyttet til fryse- og tineprosesser. Klimaendringene vil derfor i utgangspunktet virke positivt for bruken av kompakte tak med utvendig nedløp. Mindre snø og varmere gjennomsnittlig temperatur gir færre dager hvor snø som smelter og fryse igjen vil være et problem, for steder som i dag allerede har lite snø. Utfordringen vil likevel fortsatt forekomme steder med mye snø i dag.

Ved å se på værutvikling og trender samt gjentakelsesrate for ulike værscenarier er det på bakgrunn av data fra snømodellen til SeNorge avdekket trender som samsvarer med forventninger og beregninger til klimaendringene. Det er sett hvordan synkende nedbør i form av snø opptrer sjeldnere i enkelte deler av landet som sammen med stigende gjennomsnittstemperatur som gir klimatiske forhold hvor utvendig taknedløp kan egne seg.

I resultatene som er hentet ned fra byer, er det likevel avvik fra trendlinjen som viser at det også vil være variasjoner og inntreffe skadelige vintre selv etter år med milde vintre. I det endelige resultatet er sett på hvordan lengden med risikoforhold vil påvirke vurderingen av “trygge” soner hvor perioder på henholdsvis 3, 7 og 10 ble vurdert. Lengden på periodene er ikke basert på vitenskapelig

risikovurdering, men viser hvor sensitiv analysen er for endringer.

Som en del av studien ble det sett på lengde og frekvens av perioder hvor fryse-tineprosesser vil være tilfelle og hvordan dette har utviklet seg på bakgrunn av data fra SeNorge sin modell. Det ble her sett at lengden og periodene ble kortere og at det ble færre perioder hvert år. Dette svarer overens med klimaendringene og forventningene om et mildere klima hvor tak med utvendig nedløp på sikt kan bli en mindre risikoutsatt løsning. Modellen viser imidlertid at det vil forekomme perioder hvor snøsmelting og gjenfrysning på tak kan være et problem, men at hyppigheten og lenden vil avta.

Snøkartene er produsert fra 40 år med data som ikke medregner utvikling og variasjoner. Antallet perioder med ugunstige forhold er det eneste som teller, uten at det sies noe om *når* disse periodene fant sted. Kartene vil derfor være konservative for dagens situasjon. Ettersom klimaet utvikler seg til å bli mildere vil negative bidrag hovedsakelig komme fra de tidlige årene i perioden. Positive bidrag i senere år, f.eks. snøfattige vintre, vil ikke merkes i dataene på samme måte.

Kartene viser store variasjoner som følge av endrede inputparametere og antakelser, f.eks. hvor lenge en ugunstig periode må være før den bør telles som risikabel, eller hvor kaldt det må være for at gjenfrysing av smeltevann finner sted. Dette viser viktigheten av å bestemme gode verdier for inputparametere. Dette er et område med lite forskning med rom for videre arbeid og validering fra praktiske forsøk.

Andre forhold

Enkelte problemstillinger som faller utenfor oppgavens forskningsspørsmål vil også være av stor betydning for problemstillingen og aktuelle for videre arbeid. Dette avsnittet vil kort diskutere enkelte av disse forholdene.

Mange av utfordringene med isdannelse skyldes varmestrømmen gjennom kompakte tak. Det kan være fordelaktig å vurdere muligheten for å benytte andre takformer enn kompakte tak i områder med usikker risiko. Luftede tak kan fungere dersom skrå tak er mulig å bygge, men for større bygninger er det vanskelig å komme utenom flate tak, som i hovedsak bygges som kompakte tak.

Tilsvarende kan det undersøkes andre løsninger for nedløpet. Hovedmotivasjonen for å velge utvendig nedløp er ønske om å redusere belastningen på overvannsnett. I prinsippet er det ingenting i veien for innvendige nedløp dersom de ikke kobles på overvannsnett. Infiltrasjon til grunnen under bygningen kan muligens være aktuelle ved visse grunnforhold. Eventuelt kan det etableres utløp til terreng i bygningens første etasje. Hydrologisk sett er det utløpet fra bygningen som skal frikobles, ikke nedløpsrøret. Becker et al. (2016) belyste denne problemstillingen i 2016, hvor det ble sett gode hydrologiske egenskaper ved enkelte jordsmonn. Disse løsningene vil alle likevel være beheftet med andre utfordringer, og det må vurderes hvorvidt de er mer eller mindre overkommelige

enn utfordringene med utvendige nedløp. Bygninger bygget delvis under bakken og eller med tak mot terreng vil også kunne utføres som kompakte uten utvendig nedløp, hvor vann heller ledes over bakkekanten og dreneres mot omkringliggende terreng (Berg, 2020).

6 Konklusjon

Oppgaven hadde som mål å etablere en modell som kan illustrere hvor i landet kompakte tak med utvendig nedløp kan brukes uten ytterligere tiltak som for eksempel varmekabler. Som utgangspunkt ble det sett på studien og metode utarbeidet av Skagseth (2021). Gjennom metodetriangulering med kvalitativ- og kvantitativ metode ble det avdekket enkelte mangler i modellen. De største manglene er et utilstrekkelig datagrunnlag og feil bruk av datasikkerhet som parameter i risikovurderingen. Derimot ble det vurdert fordelaktig ved valg av beregningsmodell, å bruke en modell for snøsmelting med relativt få parametre som inndata. Dette gjør det enkelt å hente inn data og det blir håndterbart å følge risiko og antakelser som er gjort senere i vurdering av resultatene. En mer kompleks modell ville hatt store problemer med å skaffe gode inndata til praktisk bruk. Modellen til Skagseth ble vurdert å være et egnet utgangspunkt for videreutvikling i denne oppgaven.

For å utvikle modellen ble det sett på ulike kilder for mer kontinuerlige værdata. Tilgangen på timesdata var svært begrenset. Gjennom sammenligning av resultater og trender i parametre, ble det sett tilsvarende trenglinjer ved bruk av døgndata som ved timesdata. Å bytte til døgndata tredoblet mengden tilgjengelig værdata fra værstasjoner. For å øke datamengden ytterligere ble det sett på beregnede klimamodeller. Snømodellen til SeNorge gir kontinuerlige værdata fra hele landet med en oppløsning på 1x1 km over hele fastlandet, og ble vurdert å være tilstrekkelig pålitelig til å brukes direkte i beregningsmodellen.

I beregningsmodellen som er utviklet, benyttes enkelte inputparametre der nøyaktige tallverdier er utfordrende å stadfeste. Dette gjelder spesielt snøens varmekonduktivitet, temperaturen der smeltevannet fryser før det kan renne av taket, og takets tålegrense for ugunstige forhold - altså hvor lenge det kan være forhold for isdannelse før problemer oppstår. Sensitivitetsanalysen viser at noen av disse parametrene kan ha stor innvirkning på resultatet. I denne oppgaven er det derfor kjørt flere iterasjoner av modellen, der verdien av disse inputparametrene varierer. Slik kan resultatene fange opp alle kombinasjoner av input-parametere, selv om de ikke nødvendigvis kan fortelle hvilke kombinasjoner som er mest realistiske. Til en slik vurdering er det nødvendig med en verifisering mot reelle forhold, ved å gjøre målinger eller samle erfaringsdata fra prosjekter.

Samtlige iterasjoner av modellen viser at lavlandet langs kysten har relativt lav risiko for isdannelse, men at risikoen stiger til uakseptable nivåer i områder som ligger i innlandet eller høyt over havet. Grensetilfeller, som er akseptable i noen scenarier og uakseptable i andre, omfatter kysten langs fjorder og østsiden av øyer med fjell. I området som har blitt undersøkt i denne oppgaven samsvarer sonen med lavest risiko ganske godt med sonene merket *Maritimt klima* i Köppen-Geigers klassifiseringssystem. Dette kan bety at Köppen-Geiger-systemet kan benyttes til forenklet vurdering av egnetheten til utvendig nedløp fra kompakte tak i det enkelte prosjekt.

Klimautvikling kan både virke fordelaktig for bruk av utvendig nedløp fra kompakte tak, men

også by på utfordringer. Fra innsamlede værdata synes en synkende trend i antall dager i ugunstige sone for de fleste undersøkte byer som ble undersøkt, med tilsvarende økning med antall dager i gunstig sone. Disse endringene vil påvirke hvilke soner som kan regnes som “trygge” for utvendig nedløp fra kompakte tak. Risikovurderingene som er gjort preges av kuldeperioder fra tidlig i data-settet, gårsdagens klima”. Det er likevel skummelt å ekstrapolere fremtidige scenarier, da det er flere enkelt som skiller seg ut negativt og som får stor innvirkning på den overordnede risikovurderingen. Fremtidige hendelser med enkeltår som bidrar negativt kan ikke utelukkes fra å oppstå og fra teorien skal det ikke mer til en én hendelse for å forårsake store skader på bygningen.

Veien videre

For videre arbeid kan det i første omgang være interessant å skalere opp prosjektet med data fra hele landet. Omfanget av soner hvor utvendig nedløp fra kompakte tak kan anses som mindre risikoutsatt, kan da bli tydeligere. En helhetlig vurdering av landet kan gjøre eventuell likhet mellom klimasoner og grenser. Ved kjøring kan det også forsøkes med varierende tidsperioder. I denne studiet er det brukt værdata fra de siste 40 årene, men som undersøkelser tydelig viser og øvrig forskning bekrefter, skjer det endringer som gjør at målingene de siste 10 årene kanskje vil gi et riktigere bilde enn når lengre tidsperioder inkluderes.

Verifikasjon av faktiske tak kan også være et område som burde belyses for å verifisere erfaringer fra reelle prosjekter. I en av forstudien til oppgaven ble det avdekket flere bygde tak med utvendig nedløp på Vestlandet. Det er også gjort observasjoner av kompakte tak med utvendig nedløp uten varmekabler i Trondheim og nordover i Mosjøen og også i Tromsø.

Videre arbeidet bør også forsøke å verifisere inndataverdiene; snøens varmekonduktivitet, smeltvannets gjenfrysingstemperatur og tålegrensen for ugunstige forhold. Dette er forhold som er vanskelig å vurdere. Eventuell risikovurdering på bakgrunn av usikkerhetene vil også være en interessant før løsningen og områder betegnes som helt trygge. Dette gjelder kanskje spesielt i grenseområdene der valget av scenario og parametre er vist å ha stor innvirkning på risikovurdering; fjordbunner og daler i lavlandet.

Referanser

- Aall, C., Aamaas, B., Aaheim, A., Alnes, K., van Oort, B., Dannevig, H. and Hønsi, T. (2018), Oppdatering av kunnskap om konsekvenser av klimaendringer i norge, Technical report, Cicero, Vestlandsforskning.
- URL:** <https://pub.cicero.oslo.no/cicero-amlui/bitstream/handle/11250/2582720/Rapport%202018%2014%20web.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Andenæs, E., Kvande, T., Muthanna, T. M. and Lohne, J. (2018), 'Performance of blue-green roofs in cold climates: A scoping review', *Buildings* **8**.
- Andenæs, E., Skagseth, V., Bunkholt, N., Kvande, T. and Lohne, J. (2020), Experiences with external drainage systems from compact roofs in Norwegian climates, in 'NSB2020', Vol. 172, NSB 2020: 12th Symposium on Building Physics, Tallinn, Estonia.
- Andenæs, E., Time, B., Muthanna, T., Asphaug, S. and Kvande, T. (2021a), 'Risk reduction framework for blue-green roofs', *Buildings* .
- URL:** <https://www.mdpi.com/2075-5309/11/5/185>
- Andenæs, E., Time, B., Muthanna, T., Asphaug, S. and Kvande, T. (2021b), 'Risk Reduction Framework for Blue-Green Roofs', *Buildings* **11**(5), 185. Number: 5 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- URL:** <https://www.mdpi.com/2075-5309/11/5/185>
- Arksey, H. and O'Malley, L. (2005), 'Scoping studies: towards a methodological framework', *International Journal of Social Research Methodology* **8**(1), 19–32.
- URL:** <https://doi.org/10.1080/1364557032000119616>
- Becker, M. A., Muthanna, T. and Braskerud, B. C. (2016), 'Trinn 1: Reduser overvannet i avløpsnettene ved å frakoble taknedløp', *Vann* **4**(4), 359–369.
- Berg, M. (2020), 'Prosjektoppgave - grønne tak mot terreng'.
- Boris F. Blumberg, Donald R. Cooper, P. S. S. (2014), 'Business research methods', Mc Graw Hill Education.
- Borrebæk, P.-O. A., Jelle, B. P. and Zhang, Z. (2019), 'Avoiding snow and ice accretion on building integrated photovoltaics – challenges, strategies, and opportunities', *Solar Energy Materials and Solar Cells* p. 110306.
- URL:** <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024819306348>
- Breuning, J. (2013), 'Green Roofs: Fixer-Upper or Lawsuit? Sloped Extensive Green Roofs. Green roof technology'.

URL: http://www.greenrooftechnology.com/Modern%20Technology/Benefits/green_roofs_fixer_upper_or_lawsuit

Bunkholt, Nora S.; Time, B. and Gullbrekken, L. (2021), Byggskader — sammenligning av nye og eldre byggskader i sintefs byggskadearkiv, Technical Report NO117, SINTEF Community, Trondheim, Norway. Klima 2050 Note 117.

Byggebolig.no (2018), 'Utvendig nedløp på kompakte tak'.

URL: <https://byggebolig.no/eksterior-tak-ytterkledning-og-maling-%28ute%29/utvendig-nedlop-pa-kompakte-tak>

Byggforskserien 525.002 (2018), '525.002 Takformer, taktyper og oppbygning - Byggforskserien SINTEF Community'.

URL: https://www.byggforsk.no/dokument/381/takformer_taktyper_og_oppbygning

Byggforskserien 525.207 (2018), '525.207 Kompakte tak - Byggforskserien SINTEF Community'.

URL: https://www.byggforsk.no/dokument/387/kompakte_tak

Byggforskserien 725.118 (2012), '725.118 Skader i kompakte tak. Årsaker og utbedring - Byggforskserien SINTEF Community'.

URL: https://www.byggforsk.no/dokument/687/skader_i_kompakte_tak_aarsaker_og_utbedring

Bøhlerengen, T. (2019), Unngå byggskader ved prosjektering av tak, Technical report.

URL: <https://www.sintef.no/community/fagblogg/poster/unnga-byggskader-ved-prosjektering-av-tak/>

Carmen N. B., Hunt W. F. and Anderson A. R. (2014), 'Evaluating the Performance of Disconnected Downspouts on Existing and Amended Lawns as a Stormwater Control Measure', *World Environmental and Water Resources Congress 2014* pp. 125–134.

URL: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/9780784413548.015>

Carmen, N., Hunt, W. and Anderson, A. (2016), 'Volume Reduction Provided by Eight Residential Disconnected Downspouts in Durham, North Carolina', *Journal of Environmental Engineering (United States)* **142**(10).

Daniels, M. J. and Hogan, J. W. (2008), *Missing Data in Longitudinal Studies - Strategies for Bayesian Modeling and Sensitivity Analysis*, Taylor Francis Group.

URL: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781420011180/missing-data-longitudinal-studies-michael-daniels-joseph-hogan>

Dolhon, A. M. and Ratakonda, R. (2011), Snow Removal Strategies of Lightweight, Flat Roof Structures.

URL: <https://trid.trb.org/view/1109796>

Engeset, R. (2010), ‘Hvordan lages vær- og snødata for senorge.no?’.

URL: <https://www.yumpu.com/no/document/read/24836314/hvordan-lages-var-og-snadata-for-senorgeno-nve>

Esri (2022), ‘Introduction to arcgis pro’.

URL: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/get-started/get-started.htm>

Flæte, O. m. (2010), Tilpassing til eit klima i endring, Technical report, Servicesenteret for departementa, informasjonsforvaltning.

Grange, H. L. and Hendricks, L. T. (1976), Roof-snow behavior and ice-dam prevention in residential housing, Technical report, University of Minnesota.

URL: https://conservancy.umn.edu/bitstream/handle/11299/168996/mn_2000_eb_399.pdf;sequence=1

Grynning, S., Gaarder, J. E. and Lohne, J. (2017), ‘Climate Adaptation of School Buildings through MOM – A Case Study’, *Procedia Engineering* **196**, 864–871.

URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817331387>

Grønmo, S. (2023), ‘Kvalitativ metode’.

URL: https://snl.no/kvalitativ_metode

Gullbrekken, L., Kvande, T., Jelle, B. P. and Time, B. (2016), ‘Norwegian Pitched Roof Defects’, *Buildings* **6**(2), 24. Number: 2.

URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/6/2/24>

Hafskjold, L. S., Nie, L. and Bruaset, S. (2012), ‘Vann i by - håndtering av overvann i bebygde områder. Byggforskserien 311.015’.

URL: https://www.byggforsk.no/dokument/2562/vann_i_by_haandtering_av_overvann_i_bebygde_omraader

Hanssen-Bauer, I., Førland, E. J., Haddeland, I., Hisdal, H., Mayer, S., Nesje, A., Nilsen, J. E. , Sandven, S., Sandø, A. B., Sorteberg, A. and Ådlandsvik, B. (2015), Klima i Norge 2100 - Miljødirektoratet, Oppdragsrapport M-406, Norsk klimaservicesenter.

URL: <https://www.miljodirektoratet.no/publikasjoner/2015/september-2015/klima-i-norge-2100/>

Hersbach, H. e. a. (2020), ‘The era5 global reanalysis’, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **146**.

URL: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/qj.3803>

Hoover, S. R. (1989), ‘Roof ponding and how to prevent it. The Peril behind the Parapet’, *Construction Specifier* **42**(11), 76–82.

Hosøy, Eirik og Savosnick, N. (2022), 'Sommerværet delt i to: Varmt og solfylt i sør, kaldt og grått i nord'.

URL: <https://www.vg.no/nyheter/innenriks/i/KzOV87/sommerværet-delt-i-to-varmt-og-solfylt-i-soer-kaldt-og-graatt-i-nord>

Isaksen, K., Førland, E. J., Dobler, A., Benestad, R., Haugen, J. E. and Mezghani, A. (2017), Klimascenarioer for longyearbyen-området, svalbard, Technical report, Meteorologisk Institutt.

URL: https://www.met.no/publikasjoner/met-report/met-report-2017/_/attachment/download/8932a8b1-17b4-4567-8559-ed4b78d61aee:6fe02353a8212c195f00bd59dc5b2baaa6c4118c/2017-10-METreport_Statsbygg-Svalbard_final.pdf

Jiang, A., McBean, E., Binns, A. and Gharabaghi, B. (2019), 'Quantifying Rainfall-Derived Inflow from Private Foundation Drains in Sanitary Sewers: Case Study in London, Ontario, Canada', *Journal of Hydrologic Engineering* **24**(9).

Jørgensen, G. (2020), 'Overvann i urbane strøk fører til skader for milliarder'.

URL: <https://www.nrk.no/rogaland/harrys-uthus-har-statt-under-vann-fire-ganger-pa-ti-ar-1.15220538>

Kartverket (2022), 'Kor stort er noreg?'.

URL: <https://www.kartverket.no/til-lands/fakta-om-norge/storleiken-pa-landet>

KDD (2019), 'Meld. st. 5 (2019-2020) levende lokalsamfunn for fremtiden - distriktsmeldingen'.

URL: <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/meld.-st.-5-20192020/id2674349/?ch=3>

KMD (2015), Overvann i byer og tettsteder, Technical report, Klima- og Miljøverndepartementet.

Knight, C. A. (1980), 'Icicles as crystallization phenomena', *Journal of Crystal Growth* **49**(1), 193-198.

URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022024880900822>

Kvande, T. and Bunkholt, N. S. (2020), 'Temasamling | Fordrøyende tak og utvendig taknedløp - hvorfor er ikke det helt rett fram?. Klima 2050 Note 111'.

Lisø, K. R. (2006), Building Envelope Performance Assessments in Harsh Climates: Methods for Geographically Dependent Design, Doctoral thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway. Accepted: 2014-12-19T11:26:03Z.

URL: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmli/handle/11250/231348>

Lisø, Kim Robert og Kvande, T. (2007), Klimatilpasning av bygninger, Technical report, SINTEF Byggforsk.

Lstiburek, J. W. (2010), ‘Dam Ice Dam’, *ASHRAE Journal; New York* **52**(6), 49–50,52,54,56.

URL: <https://search.proquest.com/docview/507894029/abstract/42CE2BBEC60D4E42PQ/1>

Lussana, C. (2020), senorge observational gridded datasets, Technical report, Meteorologisk institutt, Oslo, Norge.

URL: https://www.met.no/publikasjoner/met-report/met-report-2020/_/attachment/download/9f79d391-62d8-4fc1-a61a-9f0e7f1de389:8c74ebf2118593aa75272e6aff416ce66f86e73f/MET-report-07-2020.pdf

Lussana, C. (2023), ‘Met nordic dataset’.

URL: <https://github.com/metno/NWPdocs/wiki/MET-Nordic-dataset>

Lussana, C., Tveito, O. E., Dobler, A. and Tunheim, K. (2019), ‘senorge 2018, daily precipitation, and temperature datasets over norway’, *Earth System Science Data* **11**, 1531–1551.

Lørenskog, Rælingen og Skedsmo kommune (2017), ‘Retningslinjer for overvannshåndtering for kommunene Lørenskog, Rælingen og Skedsmo’.

URL: https://www.lorenskog.kommune.no/_f/p11/i3cc789c6-8622-40f4-a418-285ecc76b136/retningslinjer-overvannshandtering.pdf

Mackinlay, I., Flood, R. and Heidrich, A. (2000), Roof design in regions of snow and cold, in ‘Snow Engineering 2000: Recent Advances and Developments’, pp. 213–224.

Masson-Delmotte, Zhai, e. a. (2021), Climate change 2021 - the physical science basis, Technical report, IPCC. Publisher: IPCC.

URL: https://report.ipcc.ch/ar6/wg1/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf

Meteorologisk Institutt (2022), ‘Norsk Klimaservicesenter’.

URL: <https://seklima.met.no/stations/>

Nielsen, A. (2005), ‘Istappar på tak – se opp!’, *Bygg & teknik* **4**, 40–42.

URL: <http://www.ankernielsen.dk/faglig/pdf/Istappar.pdf>

Nielsen, A. (2019), Sensitivity Analysis of Melting and Freezing of Snow on Roofs, in D. Johansson, H. Bagge and Wahlström, eds, ‘Cold Climate HVAC 2018’, Springer Proceedings in Energy, Springer International Publishing, Cham, pp. 1019–1029.

Nielsen, A. and Claesson, J. (2011), Melting of snow on a roof: Mathematical report, Technical report, Chalmers tekniska högskola. Publisher: Chalmers tekniska högskola.

URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/60456362.pdf>

Oslo Kommune (2017), ‘VA-Norm, Avsnitt 7.0’.

URL: <https://www.va-norm.no/dokument/7-transportssystem-overvann/7-0-generelle-bestemmelser/>

O'Rourke, M. J., Ganguly, M. and Thompson, L. (2010), 'Eave Ice Dams', *Journal of Architectural Engineering* **16**(1), 11–19. Number: 1 Publisher: American Society of Civil Engineers.

URL: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%291076-0431%282010%2916%3A1%2811%29>

Peterson, A. (2016), 'Köppen climate types of norway'.

URL: https://no.wikipedia.org/wiki/Fil:Norway_K%C3%B6ppen.svg

Piroglu, F. and Ozakgul, K. (2016), 'Partial collapses experienced for a steel space truss roof structure induced by ice ponds', *Engineering Failure Analysis* **60**, 155–165.

URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630715301588>

Ringerike Kommune (2018), 'Retningslinjer for overvannshåndtering i Ringerike kommune'.

URL: <https://www.ringerike.kommune.no/globalassets/bilder-blokker-og-filarkiv/bilder-og-dokumenter/samfunn/teknisk-forvaltning/retningslinjer-overvann-ringerike.pdf>

Rostad, Ida Louise og Tomassen, J. K. (2020), 'Store værforskjeller i nord og sør i norge – her skiller det 50 grader'.

URL: <https://www.nrk.no/tromsogfinnmark/store-vaerforskjeller-i-nord-og-sor-i-norge--her-skiller-det-50-grader-1.14878107>

Saloranta, T. (2012), 'Simulating snow maps for norway: description and statistical evaluation of the senorge snow model', *The Cryosphere* **6**, 1323–1337.

Saloranta, T. (2014), New version (v.1.1.1) of the senorge snow model and snow maps for norway, Technical report, Meteorologisk institutt, Oslo, Norge.

URL: https://nve.brage.unit.no/nve-xmlui/bitstream/handle/11250/2500669/rapport2014_06.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Saloranta, T. (2016), 'Operational snow mapping with simplified data assimilation using the senorge snow model', *Journal of Hydrology* **538**, 314–325.

Sekse, T. (2012), Klimatilpasningstiltak innen vann og avløp i kommunale planer, Technical report, Norsk Vann rapporter.

ShelbyTeknikkAS (n.d.), 'Loro x takavvanningssystemer'.

URL: <https://static1.squarespace.com/static/5cd95645e6666977bbe48122/t/601a6cf56238c21c01ef0010/1612344577441/Lorotak+kpl.pdf>

Skagseth, V. A. (2020), Ising i nedløp fra kompakte tak, Technical Report NO106, SINTEF Community, Trondheim, Norway. Klima 2050 Note 106.

Skagseth, V. A. (2021), 'Masteroppgave - ising i nedløpssystemer fra kompakte tak'.

- Skagseth, V. A. and Bunkholt, N. S. (2019a), Kompakte tak med utvendig nedløp, Technical Report NO85, SINTEF Community, Trondheim, Norway. Klima 2050 Note 85.
- Skagseth, V. and Bunkholt, N. S. (2019b), ‘Kompakte tak med utvendig nedløp. Klima 2050 Note 85. Trondheim 2019’.
- Stavseth, M. R. (2020), ‘Sensitivitetsanalyser – hvor robust er resultatet?’, *Tidsskriftet Den Norske Legeforening* .
URL: <https://tidsskriftet.no/2020/04/medisin-og-tall/sensitivitetsanalyser-hvor-robust-er-resultatet>
- Stjernberg, M. and Penje, O. (2019), Population change dynamics in nordic municipalities: – grid data as a tool for studying residential change at local level, Technical report, Nordregio.
- Stovin, V. (2010), ‘The potential of green roofs to manage Urban Stormwater’, *Water and Environment Journal* **24**(3), 192–199. Number: 3 _eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1747-6593.2009.00174.x>.
URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1747-6593.2009.00174.x>
- Stovin, V., Vesuviano, G. and Kasmin, H. (2012), ‘The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions’, *Journal of Hydrology* **414-415**, 148–161.
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169411007347>
- Sturm, M., Holmgren, J., König, M. and Morris, K. (1997), ‘The thermal conductivity of seasonal snow’, *Journal of Glaciology* **43**(143), 26–41.
- Taguchi Vinicius J., Carey Erin S. and Hunt William F. (2019), ‘Field Monitoring of Downspout Disconnections to Reduce Runoff Volume and Improve Water Quality Along the North Carolina Coast’, *Journal of Sustainable Water in the Built Environment* **5**(1). Publisher: American Society of Civil Engineers.
URL: <https://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/JSWBAY.0000872>
- Tegnander, D. (2021), ‘Meteorologen om væromslaget: – blir full krig mellom øst og vest’.
URL: https://www.nrk.no/nordland/na-snur-vaeret_-blir-full-krig-mellom-ost-og-vest-1.15763632
- Thodesen, B., Kvande, T., Tajet, H. T. T., Time, B. and Lohne, J. (2018a), ‘Adapting green-blue roofs to nordic climate’, *Nordisk arkitekturforskning* **2**.
- Thodesen, B., Kvande, T., Tajet, H. T. T., Time, B. and Lohne, J. (2018b), ‘Adapting Green-Blue Roofs to Nordic Climate’, *Nordisk arkitekturforskning* **30**(2). Accepted: 2018-10-17T12:45:32Z Publisher: SINTEF akademisk forlag.
URL: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlii/handle/11250/2568506>

Thorsnæs, G. (2022), ‘Norges befolkning’.

URL: https://snl.no/Norges_befolkning

Thue, J. V. (2016), *Bygningsfysikk - grunnlag*, Fagbokforlaget.

Tobiasson, W., Buska, J. and Greateorex, A. (1998), ‘Attic ventilation guidelines to minimize icings at eaves’, *Interface (Raleigh, North Carolina)* **16**(1), 17–18, 21.

Varsom.no (2020), ‘Snøkartene på senorge.no bommer’.

URL: <https://www.varsom.no/nyheter/snorapporter-fra-nve/snokartene-pa-senorge-no-bommer/?ref=mainmenu>

Vegdirektoratet (2012), *Håndbok R613 - Værstasjoner*, Statens Veivesen.

URL: <https://www.vegvesen.no/globalassets/fag/handboker/hb-r613-vaerstasjoner.pdf>

Verrelle, A., Glinton, M., Bazile, E., Le Moigne, P., Randriamampianina, R., Ridal, M., Berggren, L., Undén, P., Schimanke, S., Mladek, R. and Soci, C. (2022), ‘Cerra-land sub-daily regional reanalysis data for europe from 1984 to present’.

URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-cerra-land?tab=overview>

Vestheim, E. (2009), ‘Takskader og frosne rør koster dyrt’.

URL: <https://viivilla.no/bygging/tak/takskader-og-frosne-ror-koster-dyrt>

Vigoureux, D. and Vigoureux, J.-M. (2018), ‘How can freezing water burst pipes and containers?’, *European Journal of Physics* **39**(4).

Zhou, X., Zhang, Y. and Gu, M. (2018), ‘Coupling a snowmelt model with a snowdrift model for the study of snow distribution on roofs’, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* **182**, 235–251.

URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167610518305038>

Åstrand, Y. (2010), ‘Rekordmånga samtal till istappsjouren. SVT Nyheter’.

URL: <https://www.svt.se/nyheter/lokalt/stockholm/rekordmanga-samtal-till-istappsjouren>

Liste over vedlegg

Vedlegg 1: Kode for innhenting av værdata fra seKlima

Vedlegg 2: Kode for analyse av værdata fra seKlima

Vedlegg 3: Bildeserie tilhørende forstudie med snøkart fra 1958 til 2021

Vedlegg 4: Kode for innhenting av værdata fra seNorge

Vedlegg 5: Kode for analyse av værdata fra seNorge

Vedlegg 6: Kode for behandling av værdata til trender og utvikling

Vedlegg 7: Genererte kart for utsnitt Rogaland

Vedlegg 8: Klimautvikling i utvalgte norske byer

