

Henrik Crook Hummelsund

Etterisolering av skrå tak i småhus ved bruk av smart dampsperre

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk

Veileder: Stig Geving

Medveileder: Lars Gullbrekken

Juni 2021

Henrik Crook Hummelsund

Etterisolering av skrå tak i småhus ved bruk av smart dampsperre

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk
Veileder: Stig Geving
Medveileder: Lars Gullbrekken
Juni 2021

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



Norwegian University of
Science and Technology

Sammendrag

Etter andre verdenskrig ble det bygget mange småhus som i dag er regnet som dårlig varmeisolerte. Disse har behov for en oppgradering for å møte dagens behov for energieffektivitet. Gjennom forskningsprosjektet OPPTRE blir nye løsninger for energioppgradering av småhus undersøkt, hvor blant annet fuktsikkerhet er i fokus.

Tradisjonelt har skrå luftede tak hatt behov for et dampåpent sjikt mot uteluften for å kunne tørke. Med smart dampspærre er fukttransport mot inneluften mulig, noe som åpner for nye muligheter og løsninger som tidligere ikke har vært mulig uten høy risiko for fuktskader og muggsopp. I denne oppgaven er en løsning for etterisolering av skrå luftede tak i småhus ved bruk av smart dampspærre undersøkt. Med utgangspunkt i saltak fra 1950 til 1980 er løsningen mindre arbeidskrevende enn anbefalte etterisoleringsløsninger, samt at nedføring av himlingen mot innsiden kan bli redusert.

Oppgaven er gjennomført som en parameterundersøkelse, med beregninger av takkonstruksjonen i beregningsprogrammet for fukt- og varmetransport, WUFI 2D. Tilleggsprogrammet WUFI Mould Index VTT er også benyttet for beregning av muggvekst. Et utvalg parametere som varierer fra bolig til bolig, og som er antatt til å ha effekt på takets uttørkingsevne eller risiko for muggvekst er variert i beregningene.

Resultatene av parameterundersøkelsen viser at det hovedsakelig er en utfordring å få høyt nok varmebidrag fra kortbølget stråling, for at taket skal få god nok uttørkingsevne. Orientering, takhelling og geografisk posisjon påvirker kortbølget strålingsintensitet på takflaten, og absorptansen for solstråling påvirker hvor stort varmebidraget fra strålingen blir. Med lavt varmebidrag akkumulerer fukt i taket uten mulighet for å tørke ut. Med høyt varmebidrag kan uttørkingseffekten også kompensere for andre ugunstige effekter.

Dersom man forutsetter lav byggfukt og lavt fukttilskudd kan konstruksjonen være gunstig i mange forhold. Konservativ orientering av takflaten mot nord har da tilstrekkelig uttørkingsevne i nesten hele Norge. Dersom man lukker taket tidig på sommeren kan taket også tåle høyere nivåer av startfukt.

Tre smart dampspærre-produkter er også undersøkt, hvor den største forskjellen på dem er funnet til å være uttørkingsevnen på sommeren. AirGuard Smart har best uttørkingsevne for alle beregninger som er sammenlignet med de to andre smarte dampspærrene, Majrex og Intello.

Ved sammenligning med en takoppbygging med tradisjonell dampspærre og dampåpent undertak, er den tradisjonelle løsningen mer robust for byggfukt og høyt fukttilskudd enn løsningen med smart dampspærre. Dette ser man ved at den tradisjonelle takoppbyggingen har raskere uttørkingstid og tørker til et lavere totalt fuktinnhold. Den tradisjonelle takoppbyggingen fremstår også som mer robust ved at den ikke avhengig av varmebidrag fra kortbølget stråling.

Summary

After the Second World War, many small houses were built which today are considered poorly heat insulated. These need an upgrade to meet the current need for energy efficiency. Through the research project OPPTRE, new solutions for energy upgrading of wooden dwellings are investigated, where, among other things, moisture safety is in focus.

Traditionally, pitched ventilated roofs have needed a vapor-open layer against the outdoor air to be able to dry. With a smart vapor barrier, moisture transport to the indoor air is possible, which enables new possibilities and solutions that have not previously been possible without a high risk of moisture damage and mould growth. In this thesis, a solution for retrofitting pitched ventilated roofs in wooden dwellings using a smart vapor barrier has been investigated. Based on gable roofs from 1950 to 1980, the solution needs less work than recommended retrofitting solutions, and the lowering of the ceiling to the inside can be reduced.

The thesis has been carried out as a parameter study, with calculations of the roof structure in the hygrothermal simulation tool, WUFI 2D. The add-on WUFI Mould Index VTT is also used for calculating mould growth. A selection of parameters that varies in dwellings, and which are assumed to have an effect on the roof's drying ability or risk of mold growth, are varied in the calculations.

The results of the parameter study show that it is mainly a challenge to get a high enough heat contribution from short-wave radiation, for the roof to have good enough drying ability.

Orientation, roof slope and geographical position affect the short-wave radiation intensity on the roof surface, and the absorption for solar radiation affects how large the heat contribution from the radiation is. With a low heat contribution, moisture accumulates in the roof without the possibility of drying out. With a high heat contribution, the drying effect can also compensate for other adverse effects.

If one assumes low embedded moisture and low moisture excess, the construction can be favorable in many conditions. Conservative orientation of the roof surface to the north then has sufficient drying ability in almost all of Norway. If you close the roof early in the summer, the roof can also withstand higher levels of starting moisture.

Three smart vapor barrier products have also been investigated, where the biggest difference between them has been found to be the drying ability in the summer. AirGuard Smart has the best drying ability for all calculations compared to the other two smart vapor barriers, Majrex and Intello.

When compared with a roof structure with a traditional vapor barrier and a vapor-open sub-roof, the traditional solution is more robust for embedded moisture and high moisture excess than the solution with a smart vapor barrier. This can be seen in the fact that the traditional roof structure has a faster drying time and dries to a lower total moisture content. The traditional roof construction also appears to be more robust in that it does not depend on heat contributions from short-wave radiation.

Forord

Dette er en avsluttende masteroppgave etter fem år på studieprogrammet Bygg- og miljøteknikk ved NTNU i Trondheim. Fagområdet til hovedprofilen er bygnings- og materialteknikk. Omfanget på oppgaven er 30 studiepoeng og er gjennomført våren 2021.

Tema for oppgaven er initiert i forskningsprosjektet OPPTRE, med Lars Gullbrekken, forskningsleder ved SINTEF Community, som representant og medveileder på oppgaven.

Oppgaven har vært givende fordi løsningen kan muliggjøre en mer ansvarlig resursbruk, energibruk og gjøre det lettere å bevare eksisterende bebyggelse.

Jeg ønsker å rette en stor takk til min veileder, Professor Stig Geving, fra Institutt for bygg- og miljøteknikk for god veiledning og engasjement. Jeg vil også takke Lars Gullbrekken for gode innspill og veiledning under arbeidsprosessen.

Henrik Crook Hummelsund
Trondheim, 14. juni 2021

Innhold

Sammendrag	iii
Summary	v
Forord	vii
Innhold	ix
Figurer	xi
Tabeller	xiii
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.1.1 Løsning for etterisolering	2
1.2 Formål og problemstilling	3
1.3 Avgrensning	3
1.4 Tidligere arbeider	3
1.5 Oppgavens oppbygging	4
2 Innføring	5
2.1 Fukt- og varmetransport i skrå tak	5
2.1.1 Vanndampdiffusjon	6
2.1.2 Fuktkonveksjon	6
2.1.3 Varmebidrag fra solstråling	7
2.1.4 Langbølget stråling	7
2.1.5 Fukt i inneluft	7
2.1.6 Fukt i trematerialer	9
2.2 Tradisjonell oppbygging av skrå tak	10
2.3 Anbefalte løsninger for etterisolering	11
2.4 Konstruksjoner med smart dampsperre	12
2.5 Fuktskader	13
2.5.1 Generelt	13
2.5.2 Muggsopp	13
3 Metode	15
3.1 WUFI 2D	15
3.2 WUFI Mould Index VTT	16
3.3 Inngangsdata	18
3.3.1 Oppbygging av taket, materialer og startbetingelser	18
3.3.2 Uteklima	22
3.3.3 Orientering	23
3.3.4 Inneklima	23
3.3.5 Numerisk grid	24
3.3.6 Beregningsstart og beregningsperiode	24
3.3.7 Referansekonstruksjon: Tradisjonell takoppbygging	25
3.4 Monitorpunkter	26
3.5 Oppsummering av inngangsverdier	27
4 Resultater og diskusjon	29

4.1	Standardmodellen	30
4.2	Beregningsstart	32
4.3	Startfuktnivå	34
4.4	Orientering	36
4.5	Takhelling	38
4.6	Absorptans for solstråling	40
4.7	Uteklima (Sted)	42
4.8	Fukttilskudd	46
4.9	Gjennomsnittlig innetemperatur	48
4.10	Smart dampspærre-produkter	52
4.10.1	Lavt og middels fukttilskudd	52
4.10.2	Uteklima	54
4.11	Referansekonstruksjon: Dampåpent undertak	58
4.12	Sammendrag av resultater	60
4.13	VTT variasjoner	62
4.14	Praktiske utfordringer og løsninger	64
4.15	Beregningsmessige usikkerheter	66
5	Konklusjon	67
	Bibliografi	69
A	Valg av beregningsprogram	71
B	Tallverdier for s_d-profiler	73
C	Monitorundersøkelse	75
D	Parametermatrise	85
E	Standardsimulering oversikt	93

Figurer

1.1	To typiske takoppbygginger av skrå tak fra 1950-1980.	2
1.2	Etterisoleringsløsningen som blir undersøkt i oppgaven.	2
2.1	Utfelling av kondens ved omfordeling av fukt mellom to damptette sjikt. . . .	6
2.2	Sammenheng mellom RF i inneluften og fukttilskudd.	8
2.3	Fukttilskudd i sammenheng av fuktproduksjon og ventilasjon.	8
2.4	To tradisjonelle takoppbygginger.	10
2.5	Bærekonstruksjoner for skrå tak.	10
2.6	Dagens anbefalte etterisoleringsmetoder.	11
2.7	Prinsipp for tørking og sperring av fukt med smart dampsperre.	12
2.8	Typiske årsaker til fuktskader i skrå tak og tak med kaldt loft.	13
2.9	Forutsetninger og veksthastighet for muggsopp.	14
3.1	Oppbygging av takkonstruksjonen i WUFI.	19
3.2	s_d -profiler for dampsperrene som er brukt i beregningene.	21
3.3	Steder som er brukt i beregninger.	22
3.4	Horisontskjema for 64. breddegrad (Steinkjer).	23
3.5	Dimensjonerende fukttilskudd i boliger.	24
3.6	Oppbygging av referansekonstruksjonen i WUFI.	25
3.7	Monitorplassering i beregningsmodellene.	26
4.1	Resultater for beregninger av standardmodellen.	31
4.2	Resultater ved variasjon av beregningsstart.	33
4.3	Resultater ved variasjon av startfuktnivå.	35
4.4	Resultater ved variasjon av orientering.	37
4.5	Resultater ved variasjon av takhelling (mot nord).	39
4.6	Resultater ved variasjon av absorptans for solstråling	41
4.7	Resultater ved variasjon av uteklima/sted.	44
4.8	Globalstråling i referanseår for fuktberegningene.	45
4.9	Vanninnhold i uteluften i referanseår for fuktberegningene.	45
4.10	Resultater ved variasjon av fukttilskudd i nord- og sørvendte tak.	47
4.11	Resultater ved variasjon av innetemperatur.	49
4.12	RF ved den smarte dampsperran ved forskjellige innetemperature.	50
4.13	Resultater ved variasjon av smart dampsperre-produkt, med lavt og middels fukttilskudd.	53
4.14	Resultater for beregninger med Intello og ulike steder.	55
4.15	Resultater for beregninger med Majrex og ulike steder.	56
4.16	Resultater ved beregning av referansekonstruksjon.	59
4.17	Endring av vanninnhold i taket fra beregningsstart til beregningsslutt.	60
4.18	Timer av beregningene med fuktkriterier for muggsopp i det kritiske punktet.	61
4.19	Muggindeks i det kritiske punktet ved variasjon av parametere i VTT-muggmodellen.	63

4.20	Mulig løsning for uttørking av omfordelt fukt. Prinsipp.	64
A.1	1D- og 2D-beregninger av vanninnhold i midten av taktroen med WUFI 1D og WUFI 2D.	71
A.2	Oppbygging og monitorpunkter markert med rød firkant.	72
C.1	Kandidater til kritisk punkt.	76
C.2	Temperatur i punkt 1.1 ved standard inngangsparametere (for referanse). . .	76
C.3	Standard inngangsparametere.	77
C.4	Beregning av takflate mot sør.	78
C.5	Beregning med høy byggfukt.	79
C.6	Beregning med middels fukttilskudd.	80
C.7	Beregning med klima fra Bergen.	81
C.8	RF for beregning med klima fra Karasjok.	82
C.9	Beregning med Siga Majrex.	83

Tabeller

2.1	Noen absorptanser for ulike taktekkinger.	7
3.1	Transportmekanismer for fukt og varme som er inkludert og utelatt fra WUFI.	15
3.2	Beskrivelse av skala for muggindeks i VTT-muggmodellen	16
3.3	Sensitivitet for mugg og tilhørende materialgruppe.	16
3.4	Lyssignal ved muggindeks for materialer på innsiden av konstruksjoner.	17
3.5	Variasjoner av parametere i VTT-muggmodellen.	18
3.6	Inngangsverdier for trematerialenes startfukt gitt i prosent RF	20
3.7	Beskrivelse av fukttilskuddnivåer i boliger.	24
3.8	Oppsummering av inngangsverdier og parametervariasjoner i standardmodellen.	27
B.1	s_d -profiler for smarte dampsperrer brukt i oppgaven.	73
D.1	Parametermatrise (1/7).	86
D.2	Parametermatrise (2/7).	87
D.3	Parametermatrise (3/7).	88
D.4	Parametermatrise (4/7).	89
D.5	Parametermatrise (5/7).	90
D.6	Parametermatrise (6/7).	91
D.7	Parametermatrise (7/7).	92

Kapittel 1

Innledning

1.1 Bakgrunn

Etter andre verdenskrig oppstod en boligmangel i Norge, og det ble nødvendig å gjøre husbyggingen lettere. Det var etterspørsel etter raske, billige og materialbesparende løsninger [1]. Ny husbyggingsteknikk med blant annet lett bindingsverk, ble introdusert og mange av teknikkene ble grunnlaget for hvordan man bygger hus i Norge i dag. Eneboliger ble den dominerende boligtypen frem til rundt år 1990, og vi har i dag rundt 1,2 millioner eneboliger i Norge. Småhus har gått fra å ha lite varmeisolasjonsmaterialer på starten av 1950-tallet, fra for eksempel 5 cm isolasjon i skrå tak, til flere titalls centimeter isolasjon i dag [2]. Mange av husene står enda, og er fortsatt dårlig isolert.

Forskning viser at klimaskjermen i norske småhus fra 1950-1990 har et stort energisparingspotensial da varmetapet er stort og antallet hus er mange [3]. Ettersom energi er knyttet til klimagassutslipp, kan energioppgradering av småhus bli et stort bidrag til kutt i klimagassutslipp for å hindre klimaendringene.

Å rive gamle hus med høyt energiforbruk for å bygge nytt med lavt energiforbruk er ofte et dårlig alternativ til energioppgradering. Klimagassutslippene knyttet til riving, materialbruk og bygging er store ved bygging av nye hus, og flere bygg har arkitektoniske kvaliteter som bør vernes [4].

Denne oppgaven er en del av forskningsprosjektet OPPTRE som undersøker løsninger for ambisiøs energioppgradering av småhus bygget før 1990. OPPTRE skal utvikle energieffektive, fuktsikre og kostnadseffektive løsninger med høy arkitektonisk kvalitet, godt inn klima og lavt klimafotavtrykk [5]. OPPTRE skal også undersøke nye byggematerialer for oppgradering av bygningskroppen.

1.1.1 Løsning for etterisolering

Som et forprosjekt til masteroppgaven ble det høsten 2020 gjennomført en fordypningsoppgave hvor etterisoleringsmetoder for skrå tak i småhus fra 1950-1990 ble undersøkt. En ny løsning som inkluderer materialet *smart dampsperre* ble utarbeidet og anbefalt for videre undersøkelse. Løsningen er en etterisoleringsmetode som er enklere, mer plass- og materialbesparende, og mulig billigere enn tradisjonelle etterisoleringsmetoder. Løsningen krever ingen eller minimalt med arbeid på utsiden av taket, og på innsiden er løsningen enklere enn tradisjonell etterisolering ved at man ikke trenger å utforme luftespalte. Løsningen er dermed arbeidsbesparende, og nedfôringen blir mindre enn ved en tradisjonell etterisoleringsmetode.

Etterisoleringsløsningen er spesifikt tilpasset skrå saltak, som var vanlig å bygge opp som i Figur 1.1 fra rundt 1950 til 1980 [2]. Løsningen kan også være aktuell for andre typer tak som har damp tett undertak, hvor yttertaket er i god stand. Dette kan for eksempel være kalde loft som skal bygges om til varme loft, eller tak fra andre tidsperioder med lignende utgangspunkt.

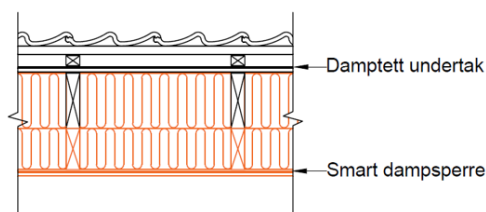


(a) 1950-tallet. Med 50 mm isolasjon av sydde matter (U-verdi på $0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$).

(b) 1960- og 1970-tallet. Med 100 mm mineralull (U-verdi på $0,31 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Figur 1.1: To typiske takoppbygginger av skrå tak fra 1950-1980.

Etterisoleringsløsningen som er undersøkt i denne oppgaven er vist i Figur 1.2, hvor oransje områder markerer nye materialer. Det eksisterende taket blir etterisolert fra innsiden, med isolasjonsmaterialer mellom taksperrene fra taktroen og ned, uten luftespalte. Etterisoleringsløsningen skal ha ambisiøse mengder varmeisolasjon sammenlignet med dagens nivå. Løsningen krever en nedfôring av de eksisterende taksperrene for å få plass til nok isolasjon. Smart dampsperre blir installert på innsiden av innvendig kledning. Denne skal hindre fukt fra å trekke inn i konstruksjonen ved diffusjon og luftlekkasjer, og la taket tørke mot innsiden på sommeren.



Figur 1.2: Etterisoleringsløsningen som blir undersøkt i oppgaven. Oransje område markerer nye materialer. Med 350 mm mineralull (U-verdi på $0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Ambisjonen for oppgaven er å kunne bidra til en fuktsikker og praktisk løsning for etterisolering av skrå tak, slik at det blir lettere og billigere å gjennomføre etterisolering. Det kan igjen bidra til at flere velger å etterisolere og at man kan ta vare på eksisterende

bebyggelse istedenfor å rive eller gjøre store unødvendige inngrep.

1.2 Formål og problemstilling

Formålet med oppgaven er å undersøke hvor robust den aktuelle løsningen er mot fukt, og muggsopp som konsekvens av fukt og temperatur. Oppgaven er gjennomført som en parameterundersøkelse med fuktregninger i WUFI 2D, hvor målet er å finne svar på følgende forskningsspørsmål:

- Hvordan, og i hvilken grad påvirker varmebidrag fra kortbølget stråling takets uttørkingsevne?
- Hvordan fungerer løsningen med forskjellige steder/uteklima i Norge?
- Hvordan fungerer løsningen med forskjellig inneklima?
- Hvordan fungerer løsningen med forskjellig startfuktnivå?
- Hvordan blir løsningen påvirket av tidspunktet man lukker taket, og eventuelt når på året bør man etterisolere taket?
- Hvordan fungerer løsningen med de tre smart dampsperre-produktene, DuPont AirGuard Smart, Pro Clima Intello og Siga Majrex?
- Hvordan virker løsningen i forhold til en anbefalt og velutprøvd etteriseringsløsning?
- Hvilke praktiske utfordringer er knyttet til gjennomføringen av løsningen?

1.3 Avgrensning

I oppgaven er det fokusert på varme- og fukttransport. Lekkasjer og andre mekanismer som kommer av skader og feilarbeid er ikke tatt med i beregningene, men utfordringer med disse er diskutert. Omfordeling av fukt fra fuktkonveksjon er ikke tatt med ettersom det ikke er inkludert i WUFI og krever en mer omfattende undersøkelse.

Oppgaven er avgrenset til småhus ettersom det er mest relevant for forskningsprosjektet OPPTRE. Løsningen kan likevel ha en viss overføringsverdi til andre skrå tak med dampnett undertak og luftet takteking.

Det er forutsatt at takene som blir etterisolert er en del av en større rehabilitering/energioppgradering av huset, hvor det blant annet blir installert balansert ventilasjon. Dette er relevant for valg av inneklima i beregningsmodellen.

1.4 Tidligere arbeider

I de siste årene er det gjort flere masteroppgaver på tema smarte dampsperrer i flate tak. Disse er listet opp under. Mulighetene for smart dampsperre i skrå tak er derimot lite undersøkt i tidligere masteroppgaver. Flere parametere som er undersøkt i denne oppgaven, har dokumentert påvirkning i de tidligere masteroppgavene som undersøker flate tak. Denne oppgaven skiller seg derimot ut fra tidligere masteroppgaver ved at taket som skal undersøkes er et rehabiliteringsprosjekt, og at taket er skrått med luftet takteking. Det medfører forskjeller som kan påvirke uttørkingsevnen.

Tidligere masteroppgaver med tema smart dampsperre i takkonstruksjoner ved NTNU er:

- Steller, M. *Smarte dampsperrer med uttørkingmulighet mot innelufta*, Masteroppgave, 2012.
- Thorsrud, E. *Smarte dampsperrer – betydning av vinterforhold*, Masteroppgave, 2013.
- Olsen, Tom-Andre. *Uttørking av kompakte tretak med smarte dampsperrer - bjelkelagets betydning for fuktforholdene*, Masteroppgave, 2017.
- Sletfjerding, E.B. *Smart vapour barriers in compact timber-framed roofs - Parameter analysis and field measurements*, Masteroppgave, 2019.
- Storaas, K. *Smart dampsperre i kompakte tretak – vurdering av fuktsikkerhet. Parameterstudie og feltundersøkelse*, Masteroppgave, 2020.

Det finnes eksempler på pilotprosjekter som tar i bruk smart dampsperre i skrå tak. ZEB lab ved NTNU er et slikt eksempel, og har tatt i bruk løsningen med smart dampsperre i kombinasjon med solceller vendt mot sør. Dette taket sparer mellom 30 og 50 cm byggehøyde med smart dampsperre i forhold til ”tradisjonell oppbygging” [6].

1.5 Oppgavens oppbygging

Masteroppgaven er delt inn i fem hovedkapitler, og er organisert slik: Kapittel 2 er en innføring i bakgrunnsteori for oppgaven. Denne inkluderer viktige transportmekanismer for fukt- og varme i skrå tak med smart dampsperre, prinsipiell oppbygging av skrå tak, og skader.

I Kapittel 3 blir valg av beregningsmetode, beregningsoppsettet og inngangsparametere for beregningsprogrammet presentert.

Resultatene fra beregningene blir presentert og diskutert i Kapittel 4. Usikkerheter med parameterundersøkelsen og utfordringer ved den praktiske gjennomføringen blir også diskutert på slutten av kapittelet.

I Kapittel 5 avsluttes oppgaven ved å konkludere oppgaven. Her blir også videre arbeid foreslått.

Kapittel 2

Innføring

I dette kapitlet presenteres først sentrale mekanismer for fukt- og varmetransport i skrå tak. Deretter presenteres materialer og oppbygging av skrå tak, med fokus på tak fra 1950-1980 og den aktuelle løsningen for etterisolering med smart dampsperre. Til slutt beskrives noen typiske skader og utfordringer med fukt i skrå tak.

2.1 Fukt- og varmetransport i skrå tak

Fukt- og varmetransport er utgangspunktet for valg av oppbygging og materialvalg i tak. Hovedsakelig består tak av en bærekonstruksjon, og fukt- og varmeregulerende materialer som varmeisolerer og beskytter mot uønskede fukt- og luftstrømninger. Uønsket fukt i tak kommer enten fra innsiden, utsiden eller er bygget inn i taket fra før, såkalt byggfukt.

Det er fire hovedmekanismer for fukttransport:

- Vanndampdiffusjon
- Fuktkonveksjon
- Kapillærsuging
- Væskestrømning

Av disse er vanndampdiffusjon og fuktkonveksjon sentrale transportmekanismer ved sikring av tak mot fuktig inneluft. Uønsket vanndamptransport inn i konstruksjonen og dårlige uttørkingsmuligheter medfører en risiko for skader i skrå tak.

2.1.1 Vanndampdiffusjon

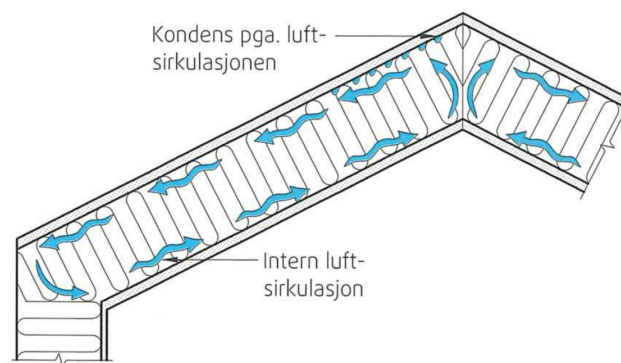
Vanndampdiffusjon skjer ved at vannmolekyler beveger seg fra områder med høyt damptrykk til områder med lavere damptrykk. I klimaskjermen er det ofte et skille mellom kald og varm side, og med en forskjell i damptrykk. Man kan da bruke dampette eller dampåpne materialer for å stoppe diffusjon eller la konstruksjonen tørke. For å beskrive motstanden mot vanndampdiffusjon i et materialsjikt, er s_d -verdi det mest brukte målet. s_d -verdi er en størrelse som tilsvarer ekvivalent luftlagstykkelse, og angir hvor tykt et stillestående lag med luft må være for å gi den samme vanndampsmotstanden som materialsjiktet. Størrelsen kan beregnes med Formel 2.1, hvor μ er vanndampmotstandsfaktoren og d er materialets tykkelse [7].

$$s_d = \mu \cdot d \quad [\text{m}] \quad (2.1)$$

2.1.2 Fuktkonveksjon

Fuktkonveksjon innebærer at luftstrømmer transporterer fukt fra områder med lavt lufttrykk til områder med høyt lufttrykk. Fuktkonveksjon opptrer blant annet ved at luft blir drevet gjennom utettheter i konstruksjonen. Under nedkjøling av luften utover i konstruksjonen stiger den relative fuktigheten (RF), og kondens kan bli felt ut. Tak er spesielt utsatt for luftlekkasjer fra innsiden da det befinner seg i høyere lufttrykk enn andre bygningsdeler. Det høye lufttrykket kommer av den såkalte skorsteinseffekten, og skyldes densitetsforskjeller på varm og kald luft.

Skrå tak har ofte hulrom fylt med luftpermeable isolasjonsmaterialer, hvor det oppstår intern luftsirkulering av temperaturforskjeller på innsiden og utsiden. Det kan føre til omfordeling av fukt fra nedre til øvre deler av taket. I tilfeller hvor fukt ikke tørker raskt nok ut, kan fukt akkumulere i øvre deler av taket, som vist i Figur 2.1. Feilbygde tak med isolasjon mellom to dampette sjikt uten lufting har derfor typisk størst skader i den øvre delen av taket [8]. Effekten av omfordeling av fukt øker også med økt isolasjonstykkelse [9].



Figur 2.1: Utfelling av kondens ved omfordeling av fukt mellom to dampette sjikt [8].

Konveksjonssperre kan begrense intern luftsirkulering i skrå tak. Sperresjiktet er et lufttett materiale som ligger mellom isolasjonsmaterialene og stopper luft fra å bevege seg fritt i hele isolasjonssjiktet. Isolasjonstykkelse over 200 mm har nytte av konveksjonssperre [10].

Et annet tiltak er å fylle hulrommet med isolasjonsmaterialer helt ut i kantene, slik at luft ikke sirkulerer fritt i hulrom i taket.

2.1.3 Varmebidrag fra solstråling

Solens høye temperatur resulterer i høytemperaturstråler som ligger i spekteret for kortbølget stråling. Evnen materialer har til å absorbere varme fra solstråling kalles ”absorptans for solstråling”. Dette er en faktor som i stor grad er knyttet til materialets farge.

Varmebidraget til utvendige overflater fra kortbølget stråling, q_{sun} , bestemmes av kortbølget strålingsintensitet, I_{sun} , og overflatens absorptans for kortbølget stråling, α_{sun} , ved Formel 2.2. Eksempler på verdier for absorptans for solstråling er vist i Tabell 2.1.

$$q_{sun} = \alpha_{sun} \cdot I_{sun} \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.2)$$

Tabell 2.1: Noen absorptanser for ulike taktekkinger [11] [12].

α_{sun}	Materiale
0,5-0,7	Gul tegl
0,7	Rå betong
0,65-0,8	Rød tegl
0,9	Grå skifer
ca. 1,0	Svart takpapp

Solstråling som blir absorbert av bygningsflater kan gi en betydelig oppvarming av konstruksjonen. Med høy solinnstråling kan flater komme opp i 70-80 °C [12]. Ved høyere overflatetemperatur på utsiden enn innsiden kan damptrykkgradienten endre retning til å peke innover, istedenfor utover som den ellers gjør når utsiden er kaldere enn innsiden.

2.1.4 Langbølget stråling

I motsetning til solens høytemperaturstråler, skjer det en varmeoverføring og varmeutveksling i det langbølgede spekteret mellom objekter med temperatur -50 til 50 °C [11]. Atmosfæren absorberer mye av den langbølgede strålingen fra jorden, og emitterer deler tilbake igjen på jorden. Styrken på den langbølgede strålingen mot jorden er dermed avhengig av blant annet skydekke og atmosfærens vanddampinnhold.

Utvendige bygningsflater er i konstant strålingsutveksling med omgivelsene. Bakken, objekter og atmosfæren emitterer stråling som blir absorbert av bygningsflatene, og bygningsflatene emitterer langbølget stråling ut. Ved klar himmel er ofte strålingsbalansen negativ for flater mot himmelen, og flaten kan få en lavere temperatur enn omgivende luft.

2.1.5 Fukt i inneluft

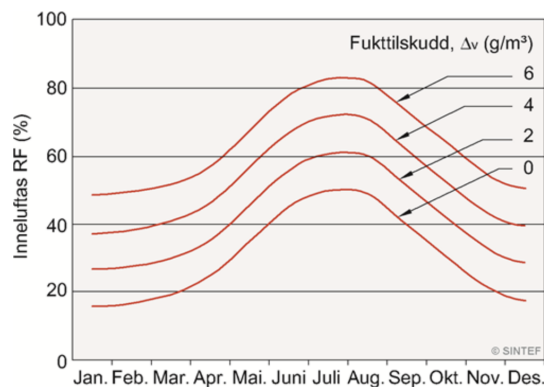
Den vanligste størrelsen for måling av vanddampinnhold i inneluft, og den viktigste parameteren for variasjon av dampmotstand i smarte dampsperrer er RF. RF er den vanddampmengden luften har ved en viss temperatur, i prosent av den totale

vanndampmengden som er mulig ved temperaturen. Ettersom temperaturen i inneluften holdes forholdsvis konstant gjennom året, er vanndampinnholdet i inneluft den største variabelen i den relative fuktigheten i inneluft.

Vanndampinnholdet i inneluft, v_i , består av vanndampinnholdet i uteluften, v_e , og fukttilskudd, Δv , forårsaket av fuktkilder på innsiden. Se Formel 2.3.

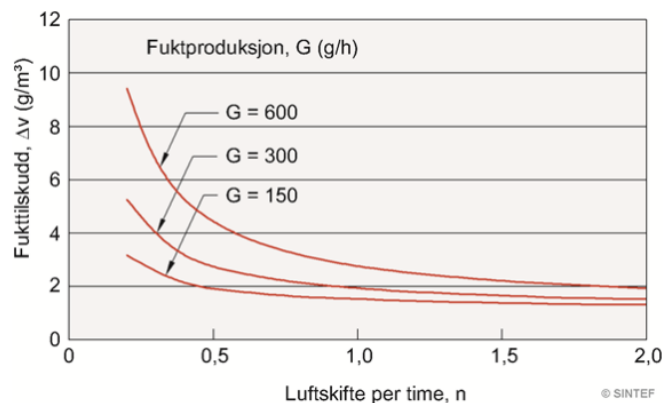
$$v_i = v_e + \Delta v \quad [\text{g/m}^3] \quad (2.3)$$

Som vist i Figur 2.2 varierer RF i inneluften gjennom året både med og uten fukttilskudd. Vanndampinnholdet fra uteluften er lavest på vinteren, fordi den kalde luften blir mettet ved lavere vanndampinnhold. Kald uteluft som blir varmet opp får lavere RF fordi vanndampinnholdet er likt, mens den varme luften kan holde på mer vanndamp. På sommeren er temperaturen i inneluften mer lik uteluften, slik at RF inne blir mer lik RF ute.



Figur 2.2: Sammenheng mellom RF i inneluften og fukttilskudd [13].

Forskjellen på vanndampinnholdet i inneluft og uteluft kalles fukttilskudd, og er en funksjon av fuktproduksjon og ventilasjon. Fuktproduksjon i inneluften er forårsaket av diverse fuktkilder og varme som fører til fordampning av vann. Det er i stor grad antall personer og deres rutiner som påvirker fuktproduksjonen [14]. Ventilasjon erstatter den fuktige inneluften med tørrere uteluft. Figur 2.3 viser hvordan graden av ventilasjon kan senke eller øke fukttilskuddet ved ulik fuktproduksjon.



Figur 2.3: Fukttilskudd i sammenheng av fuktproduksjon og ventilasjon [13].

SINTEF anbefaler balansert ventilasjon i småhus blant annet fordi det er energieffektivt og gir godt innneklima. Balansert ventilasjon begrenser varmetapet ved at avkastluften varmer opp tilluften i en varmegjenvinner. En case-studie som undersøkte oppgradering av 60- og 70-tallshus forventet at installasjon av balansert ventilasjon ville kutte 30 kWh/m² eller mer [15]. Moderne ventilasjonsanlegg kan også blant annet være behovsstyrt etter fukt, slik at fuktilskuddet holdes lavt.

2.1.6 Fukt i trematerialer

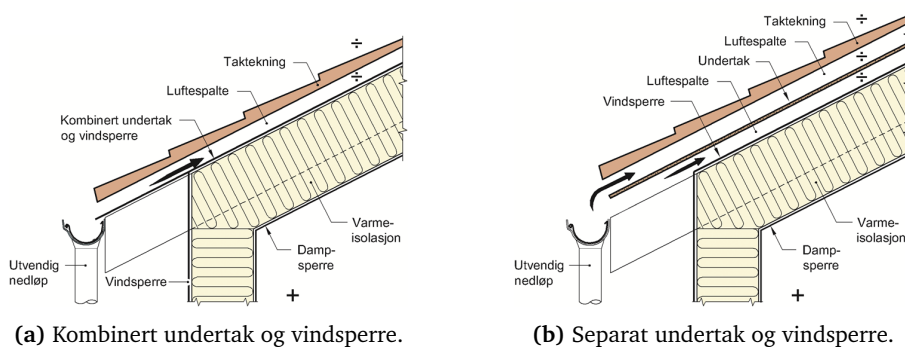
De vanligste treslagene til husbygging er furu og gran, og gran er dominerende til konstruksjonsformål [16]. Kjerneved av furu er mest motstandsdyktig mot råtesopp grunnet naturlige impregneringsstoffer. Yteveden i furu suger derimot til seg mer vann enn yteveden av gran, og er dermed noe mindre egnet til for eksempel taktro.

Byggfukt er fuktinnholdet over likevektsfuktigheten som materialer stabiliserer seg ved i en konstruksjon. Nye trematerialer kan ofte ha høyt fuktinnhold i forhold til likevektsfukten i inneluft. Det viktigste er å tørke ut overskuddsfukten, som er fuktinnholdet over det kritiske fuktnivået. Det er også viktig at uttørkingstiden til konstruksjonen er kort, slik at konstruksjonen ikke har kritisk fuktstand over lang tid. Det første året er derfor ofte mest kritisk for fuktskader. I Byggteknisk forskrift (TEK17) er fuktinnhold i trematerialer opp til 20 vektprosent akseptert i vanlige konstruksjoner [17]. I sårbare konstruksjoner er grensen 15 vektprosent.

Trematerialer har definerte sorpsjonskurver som viser RF ved absolutte fuktinnhold. Det er en viss variasjon mellom vektprosent og RF som er avhengig av om materialet er tørkende eller blir fuktet. For furu tilsvarende 15 vektprosent ca. 70-76% RF, og 20 vektprosent ca. 82-87% RF. Opp til 98% RF er trematerialet i det hygroskopiske området. Det vil si at fuktopptak skjer ved diffusjon av vanndamp i porene til materialet. Over dette er fuktopptaket i det kapillære området. Da øker fuktopptaket betydelig for trematerialer og de fleste andre materialer.

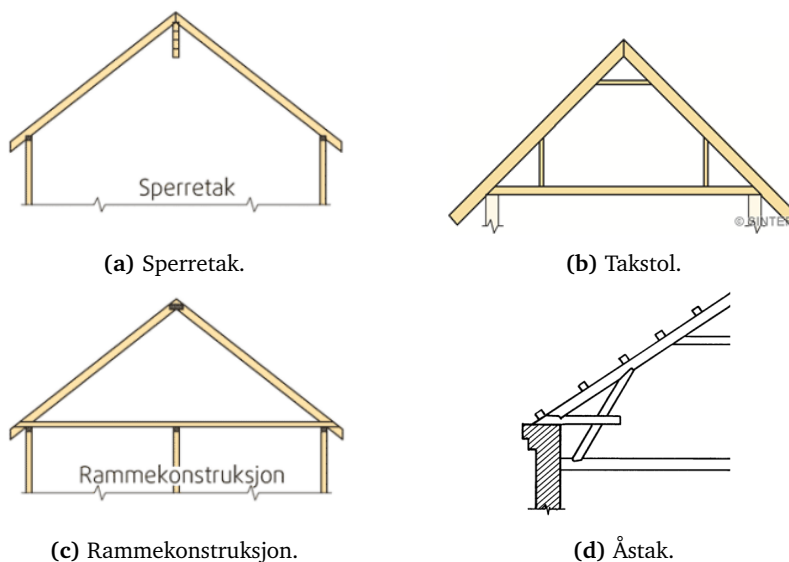
2.2 Tradisjonell oppbygging av skrå tak

Skrå tak er tradisjonelt bygget opp slik at uønsket fukt i konstruksjonen kan tørke mot utsiden. Undertaket er enten dampåpent, med såkalt kombinert undertak og vindsperre, eller damp tett med en separat vindsperre. Løsningen med kombinert undertak og vindsperre kom på 1980-tallet. Frem til dette ble separat undertak og vindsperre brukt som standard i skrå tak. I dag blir begge løsningene brukt, med oppbygging som vist i Figur 2.4.



Figur 2.4: To tradisjonelle takoppbygginger [18]

Bærekonstruksjonen bærer takets laster og er rammeverk for klimaskjermen. Bygningskroppen i norske småhus er typisk av bindingsverk og det skrå taket har bæring av sperrer, takstoler, rammekonstruksjon eller åser, se Figur 2.5. Åstak er forskjellig fra de tre andre konstruksjonene ved å ha bærende "åser" på tvers av fallretningen.



Figur 2.5: Bærekonstruksjoner for skrå tak.

Sperrere i sperretak, og overgurtene i takstoler og rammekonstruksjoner spenner fra mønet til raften i fallretningen av taket. Sperrer og overgurter blir videre omtalt som sperrer ettersom de har den samme funksjonen i bygningsfysikken. Rommet mellom sperrere kalles "takfakk", og av praktiske grunner legges som regel varmeisolasjon i takfakk. Tidligere da

varmeisolasjonen ikke fylte opp takfaket var det vanlig å utnytte hulrommet til å montere vindsperre og luftespalte for tørking av taket, som vist i Figur 1.1. Merk at åstak ikke har mulighet for luftespalte i fallretningen uten å plassere den under eller over åsene.

Dampsperre

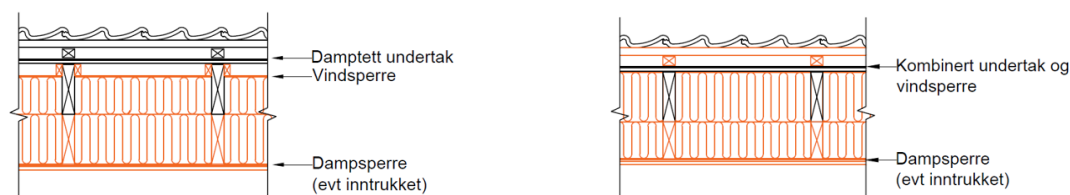
I kalde klima som i Norge er det vanlig å montere dampsperre på innsiden av varmeisolasjonen. Dampspærren skal stoppe fukttransport fra inneluften og inn i konstruksjonen ved diffusjon og luftlekkasjer. Vanndampmotstand og lufttetthet er dermed viktige parametere for fuktsikkerheten til taket. I dag anbefaler SINTEF Community kun tradisjonelle dampsperrer i Byggforskserien, og disse skal ha s_d -verdi på minst 10 meter, ha god aldersbestandighet og ha tykkelse på minst 0,15 mm for tilstrekkelig rivemotstand [19]. Et typisk materiale for tradisjonell dampsperre er folie av polyeten (PE-folie). Dampspærren må monteres lufttett for å hindre luftlekkasjer. Dette kan gjøres ved klemming, teiping eller en kombinasjon av disse.

Isolasjonsmaterialer

I Norge har mineralull vært dominerende for isolasjon over grunnen i småhus siden 1950. Mineralull brukes fortsatt i dag, men materialegenskapene har utviklet seg til å blant annet ha lavere varmekonduktivitet enn på 1950-tallet, samt at tykkelsene har økt med forskriftskravet for varmeisolering. I undersøkelser av høyisolerte konstruksjoner og fukt er det vist at 400 mm isolasjon i vegger gir nesten dobbelt så lang uttørkingstid, og har høyere muggvekstrisiko enn 100 mm isolasjon [9].

2.3 Anbefalte løsninger for etterisolering

Det finnes flere anbefalte metoder for etterisolering av skrå tak fra 1950- til 1980-tallet. Valg av metode er avhengig av flere faktorer, blant annet av oppbyggingen og tilstanden til det eksisterende taket, og om man aksepterer nedføring av himlingen. To metoder som er alternativ til løsningen som undersøkes i denne oppgaven, er presentert i Figur 2.6. Disse løsningene er anbefalt av SINTEF Community [2].



(a) Etterisolering fra innsiden med eksisterende undertak.

(b) Etterisolering fra innsiden med nytt dampåpent undertak.

Figur 2.6: Dagens anbefalte etterisoleringsmetoder. Oransje områder markerer nye materialer.

Dersom yttertaket likevel må fornyes eller etterisolering fra innsiden bygger for mye ned mot innsiden, kan man benytte etterisoleringsmetode som vist i Figur 2.6a. Da er det ikke behov for en ekstra luftespalte under taktroen, og det er heller ikke behov for å bruke løsningen med smart dampsperre som er undersøkt i denne oppgaven. Ulempen er at etterisolering fra

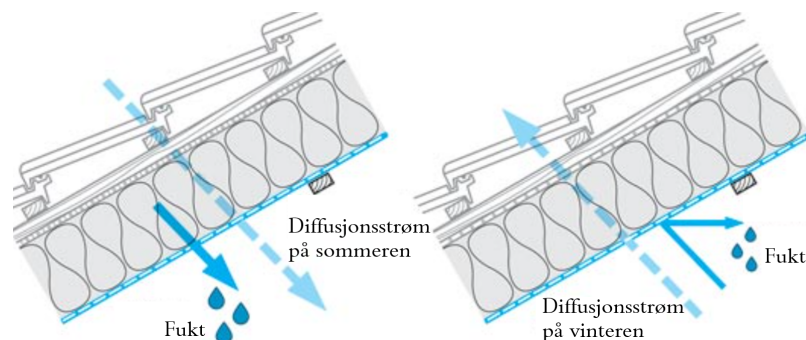
både utsiden og innsiden gir mer arbeid, og konstruksjonen er sårbar for dårlig vær under arbeidet.

Dersom det ikke er behov for å gjøre tiltak på utvendig side kan man etterisolere på innsiden. Da må man montere luftespalte mellom undertak og vindspærre mellom takspærrene, og føre ned himlingen med ønsket isolasjonstykkelse, som vist i Figur 2.6b. Ulempen med denne metoden i forhold til løsningen med smart dampspærre er at montering av luftespalten krever mye arbeid, og at luftespalten gir større byggehøyde slik at nedføringen blir større.

2.4 Konstruksjoner med smart dampspærre

Smart dampspærre, eller fuktadaptiv dampspærre, er et dampspærre-materiale som endrer vanndampmotstanden etter omgitt RF. Hovedprinsippet for smart dampspærre er at den har samme funksjon som tradisjonell dampspærre, i tillegg til at den er dampåpen i perioder hvor konstruksjonen kan og har behov for å tørke mot inneluften.

Inneluft har en naturlig variasjon av RF gjennom året. De smarte dampspærrene som blir brukt i denne oppgaven følger variasjonen ved å ha høy dampmotstand ved lav RF, og lav dampmotstand ved høy RF. Normalt er RF i skandinavisk inneluft under 40% om vinteren, og mellom 50 og 70% om sommeren [20]. Inneluften bidrar dermed til at den smarte dampspærren får høy vanndampmotstand om vinteren, og lav vanndampmotstand om sommeren.



Figur 2.7: Prinsipp for tørking og sperring av fukt med smart dampspærre [21].

Jo mer fukt som er i taket, jo høyere blir også RF ved den smarte dampspærren. Den smarte dampspærren blir derfor mer dampåpen ved behov. Oppvarming av konstruksjonens utside kan også bidra til en innadrettet damptrykkgradient, slik at vanndamp diffunderer gjennom den dampåpne smarte dampspærren, og taket tørker, som vist i Figur 2.7. Varmebidrag fra solstråling kan dermed være gunstig parameter for takets uttørkingsevne.

Hvert smart dampspærre-produkt har en kurve som viser s_d -verdi mot RF, denne kalles s_d -profil. RF ved den smarte dampspærren varierer med konstruksjonens oppbygging, byggfukt og med inneluften fra bygg til bygg på grunn av forskjellig temperatur, uteklime og fukttilskudd. s_d -profilen bør derfor være best mulig tilpasset disse, slik at konstruksjonen får best mulig uttørkingsevne.

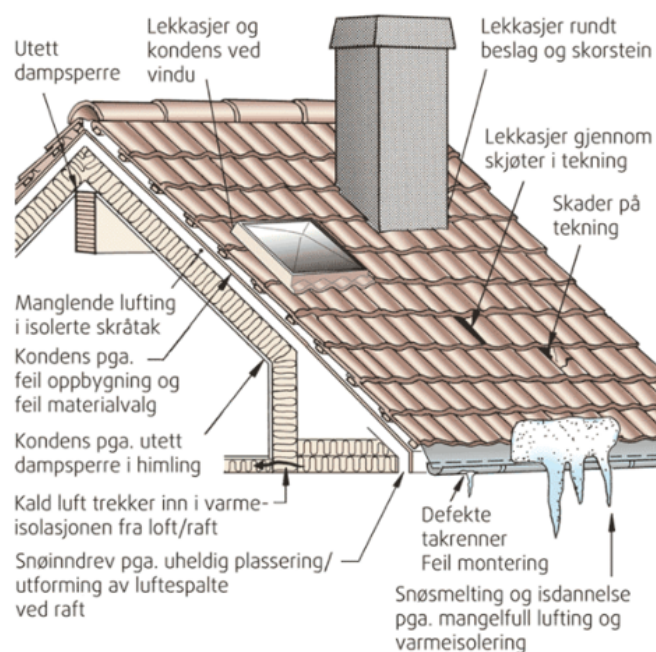
Ettersom fuktig luft skal tørke mot innsiden av konstruksjonen ved diffusjon, er det viktig at øvrige materialer på innsiden av den smarte dampspærren har så lav vanndampmotstand som mulig. Dette gjelder for eksempel maling og kledning.

Smart dampsperre er fremdeles under utvikling og verifisering [22], og anbefales ikke i Byggforskeren enda. To produkter, Pro Clima Intello og Isola AirGuard Smart2, har derimot SINTEF Teknisk Godkjenning [23][24].

2.5 Fuktskader

2.5.1 Generelt

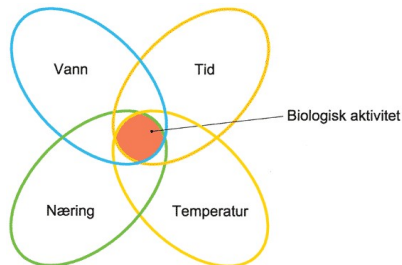
I SINTEF sin oversikt over byggeskader i Norge mellom 1993 og 2002 skyldes 76% fuktpåvirkning. Fuktskader i tak kan oppstå ved ugunstig materialvalg, ugunstig oppbygging, eller skader på den eksisterende takkonstruksjonen. Typiske årsaker til skader i skrå tak er vist i Figur 2.8. Figuren viser at sårbare punkter for vannlekkasjer er rundt vinduer, beslag og skorstein. Luftlekkasjer fra innsiden gjennom utett dampsperre kan gi kondens i konstruksjonen. Også feil oppbygging eller materialvalg kan føre til kondens.



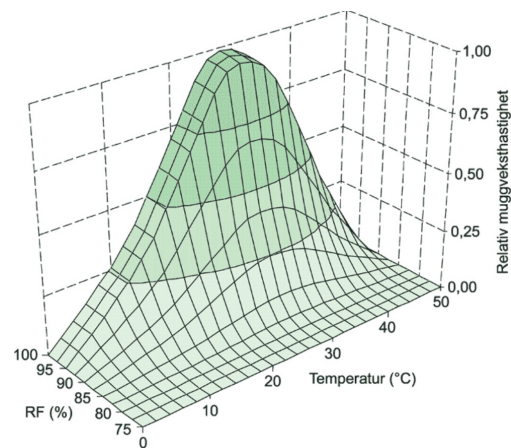
Figur 2.8: Typiske årsaker til fuktskader i skrå tak og tak med kaldt loft [25].

2.5.2 Muggsopp

Bygging med tre i klimaskjermen medfører en risiko for muggsopp. Som illustrert i Figur 2.9a er det fire elementer som må ligge til grunn for at muggsopp skal vokse. Disse er vann/fukt, næring, temperatur og tid. Tre og annet organisk materiale regnes som næring for muggsoppen. Ved bygging med tre er derfor næring og tid til stede, og det er kombinasjonen av fukt og varme som avgjør om muggsopp kan vokse. Figur 2.9b viser hvilke kombinasjoner av RF og temperatur som gir best vekstvilkår for muggsopp.



(a) Forutsetninger for biologisk aktivitet.



(b) Relativ muggveksthastighet for de mest vanlige muggsoppene.

Figur 2.9: Forutsetninger og veksthastighet for muggsopp [26].

De fleste muggsoppartene trives best i temperaturer rundt 25-30 °C , og mange arter trives også godt i lavere temperaturer. Ned mot 0 °C går muggsoppen i dvale, og den overlever ofte nedfrysing. Hastigheten til muggveksten blir redusert ved temperaturer over 25-30 °C , og ved 40 til 50 grader dør muggsoppen. Råtesopp har de samme betingelsene for temperatur, men utvikler seg som regel ikke like raskt som muggsopp. Råtesopp bryter derimot ned treverket og kan svekke bæreevnen til konstruksjonen.

De vanligste muggsoppene trenger 80-85% RF for å vokse. Over dette bedrer vekstbetingelsene seg jo nærmere 100% RF materialet kommer. Over 90% RF opptrer også andre organismer, som råtesopp, bakterier, midd og insekter [26].

Det finnes ulike metoder for vurdering av risiko for muggvekst. Man kan vurdere det ut fra generelle kriterier med fukt og temperatur, eller man kan bruke programmer som regner ut muggveksten matematisk, som for eksempel WUFI Mould Index VTT [27]. Et generelt kriterie for vekst av mugg- og råtesopp er RF over 80% for muggsopp og 85% for råtesopp, begge i kombinasjon med temperaturer over null grader.

Kapittel 3

Metode

Dette kapittelet tar for seg valg av beregningsprogram, inngangsparametere og inngangsverdier for beregningene.

3.1 WUFI 2D

Beregningene av fukt- og varmetransport i takkonstruksjonen er gjort med WUFI 2D versjon 4.3 [28]. WUFI 2D er et numerisk beregningsverktøy med koblet fukt- og varmetransport for simulering av bygningskomponenter i to dimensjoner. Programmet er flere ganger blitt validert mot fysiske eksperimenter. WUFI 2D blir videre kalt WUFI.

WUFI har også sine begrensninger. Tabell 3.1 viser oversikt over hvilke transportmekanismer for fukt og varme som er inkludert og utelatt i WUFI.

Tabell 3.1: Transportmekanismer for fukt og varme som er inkludert og utelatt fra WUFI [29].

	Inkludert i WUFI	Ikke inkludert i WUFI
Vanndamptransport	Dampdiffusjon	Fuktkonveksjon
	Løsningsdiffusjon	
Væsketransport	Kapillærledning	Dreneringsstrømning
	Overflatekryping	Hydraulisk strømning
		Elektrokinese
		Osmose
Varmetransport	Varmeledning	Konveksjon
	Varmestråling	
	Entalpitransport	

Etter innledende beregninger med både WUFI 1D og WUFI 2D viste resultatene at taksperrene hadde en betydelig fuktkapasitet som påvirket vanninnholdet i taket, også i det kritiske punktet. WUFI 1D var dermed ikke tilstrekkelig, ettersom taksperrer blir utelatt ved beregning i én dimensjon. Vedlegg A viser forskjellene på vanninnholdet ved beregning i 1D og 2D, samt en kontrollberegning hvor 1D-beregningen ble beregnet i WUFI 2D for å bekrefte at beregningsprogrammene hadde like inngangsverdier.

WUFI har en materialbank med et stort utvalg materialer. Materialene har materialdata som brukes i beregning av varme- og fukttransport, og utgjør materialenes egenskaper. Noen av størrelsene er konstant, og noen er temperatur- eller fuktavhengig. Det er mulig å legge til nye materialer, og endre eksisterende materialegenskaper til ønskede verdier.

Relevante materialer og innstillinger i WUFI blir ytterligere beskrevet under aktuelle punkt i metodekapittelet.

3.2 WUFI Mould Index VTT

WUFI Mould Index VTT [27], også kalt VTT-muggmodellen, er et tilleggsprogram for WUFI som modellerer muggvekst etter en matematisk modell. Modellen er basert på empiriske funn fra en laboratorieundersøkelse av muggvekst på furu og norsk gran gjennomført av forskningsinstitusjonen VTT i Finland. WUFI Mould Index VTT versjon 2.1.4 er brukt til å sammenligne resultatene fra parameterundersøkelsen med hensyn på risiko for muggvekst. Skalaen som programmet bruker til å beskrive mengden mugg i et modellert område er beskrevet i Tabell 3.2

Tabell 3.2: Beskrivelse av skala for muggindeks i VTT-muggmodellen [27].

Muggindeks	Beskrivelse av muggvekst
0	Ingen muggvekst
1	Små mengder muggvekst på overflaten (mikroskopisk)
2	Flere lokale muggkolonier på overflaten (mikroskopisk)
3	<10% dekning av overflaten (visuell), eller, <50% dekning (mikroskopisk)
4	10-50% dekning av overflaten (visuell), eller, >50% dekning (mikroskopisk)
5	Mye muggvekst på overflaten, >50% dekning (visuell)
6	Mye og tett muggvekst, rundt 100% dekning (visuell)

WUFI mould index VTT bruker de fire essensielle parameterne som påvirker muggvekst: Tid, temperatur, relativ fuktighet og materialets næring for muggsopp. Fra WUFI blir RF- og temperaturdata fra et såkalt isopleth-diagram eksportert til VTT-muggmodellen i de interessante punktene i konstruksjonen. Deretter blir materialdata og informasjon om konstruksjonen valgt. Det er mulig å velge forhåndsdefinerte materialer eller gjøre egendefinerte materialvalg basert på parametere som er brukt i den matematiske modellen. For trematerialer er materialvalgene: Sensitivitet for mugg, reduksjonsfaktor, type overflate og type trevirke. Valgene i muggmodellen er beskrevet under.

Sensitivitet for mugg

Sensitivitet for mugg er delt inn i fire klasser, avhengig av type materiale og behandling. De fire klassene er presentert i Tabell 3.3 med tilhørende materialgruppe.

Tabell 3.3: Sensitivitet for mugg og tilhørende materialgruppe [27].

Sensitivitetsklasse	Materialgruppe
Veldig sensitiv	Ubehandlet tre med mye næring
Sensitiv	Glatt tre, tre- og papirbaserte produkter
Middels motstandsdyktig	Sement-, plast- og mineralbaserte produkter
Motstandsdyktig	Glass og metall

Veldig sensitive materialer gjelder for materialer med mye næring, for eksempel ubehandlet tre med overflater i kontakt med jord og luft over lang tid [27]. Høy sensitivitet er dermed vurdert som for konservativt for takkonstruksjonen. Sensitiviteten til materialet i denne oppgaven er valgt til sensitiv fordi treverket er antatt til å være behandlet, relativt glatt og rent. Ruheten til rupanelet er kompensert for under parameteren ”overflate”.

Overflate

For trematerialer velges enten glatt eller ru overflate. Taktro av rupanel er regnet som ru i denne oppgaven.

Reduksjonsfaktor

Reduksjonsfaktor, også kalt materialklasse, er faktorer som har ulik reduksjon av muggsopp i perioder uten oppfylte vekstvilkår. Reduksjonsfaktorene er delt inn i signifikant reduksjon, relevant reduksjon, relativt lav reduksjon og nesten ingen reduksjon. Ved signifikant reduksjon er reduksjonsfaktoren høy. Det vil si at muggsoppen dør raskt dersom livsbetingelsene for muggsopp forsvinner. Furu har reduksjonsfaktor *signifikant reduksjon*, og bord av gran har en reduksjonsfaktor litt over *relativt lav reduksjon*. Relativt lav reduksjon er valgt i muggmodellen, av konservative hensyn.

Tremateriale

På siste materialvalg kan man velge bartre eller løvtre, hvor bartre er valgt fordi gran er valgt som materiale i oppgaven.

Vurdering av konstruksjon

Programmet vurderer alvorlighetsgraden av muggvekst med eksponeringsklasse, basert på muggindeksen og eksponering av mugg til inneluften. ”Trafikklys” med grønt, gult og rødt lyssignal indikerer om konstruksjonen kan godkjennes. Overflater med mugg i direkte kontakt med inneluften slår sterkere ut enn mugg som er bygget inn i en konstruksjon uten kontakt med inneluft. I denne oppgaven er det kun risiko for mugg på innsiden av konstruksjonen, og programmet har vurdert skalaen for lyssignalene deretter. Lyssignalene for materialer på innsiden av konstruksjoner er beskrevet i Tabell 3.4.

Tabell 3.4: Lyssignal ved muggindeks for materialer på innsiden av konstruksjoner [27].

Lyssignal	Muggindeks	Kommentar
Grønn	<2	Vanligvis akseptabelt
Gul	2-3	Må vurderes eller undersøkes videre
Rød	>3	Vanligvis ikke akseptabelt

Oppsummering av valgte inngangsverdier i VTT-muggmodellen er i Tabell 3.5. ”Standard” inngangsverdier er brukt sammen med alle beregninger i parameterundersøkelsen, og resterende sammensetninger av parametere av muggmodellen er sammenlignet for å undersøke usikkerheten og spennet av mulige muggindekser.

Tabell 3.5: Variasjoner av parametere i VTT-muggmodellen.

Navn på modell	Sensitivitet	Materialklasse	Overflate
"Standard"	Sensitiv	Relativt lav reduksjon	Ru
"Veldig sensitiv"	Veldig sensitiv	Relativt lav reduksjon	Ru
"Relevant reduksjon"	Sensitiv	Relevant reduksjon	Ru
"Glatt"	Sensitiv	Relativt lav reduksjon	Glatt
"Relevant reduksjon og glatt"	Sensitiv	Relevant reduksjon	Glatt

3.3 Inngangsdata

Alle beregningsmodellene som er simulert har en og samme modell med de samme inngangsparametere som utgangspunkt. Modellen med standard inngangsparametere blir videre i oppgaven kalt standardmodellen. Ulike parametere er variert for å undersøke effekten av disse. I dette delkapittelet beskrives og begrunnes parametervariasjonene og inngangsdataene i beregningene. Inngangsdataene i modellen er mange, den består blant annet av oppbygging, materialvalg og materialparametere, som i varierende grad påvirker resultatet.

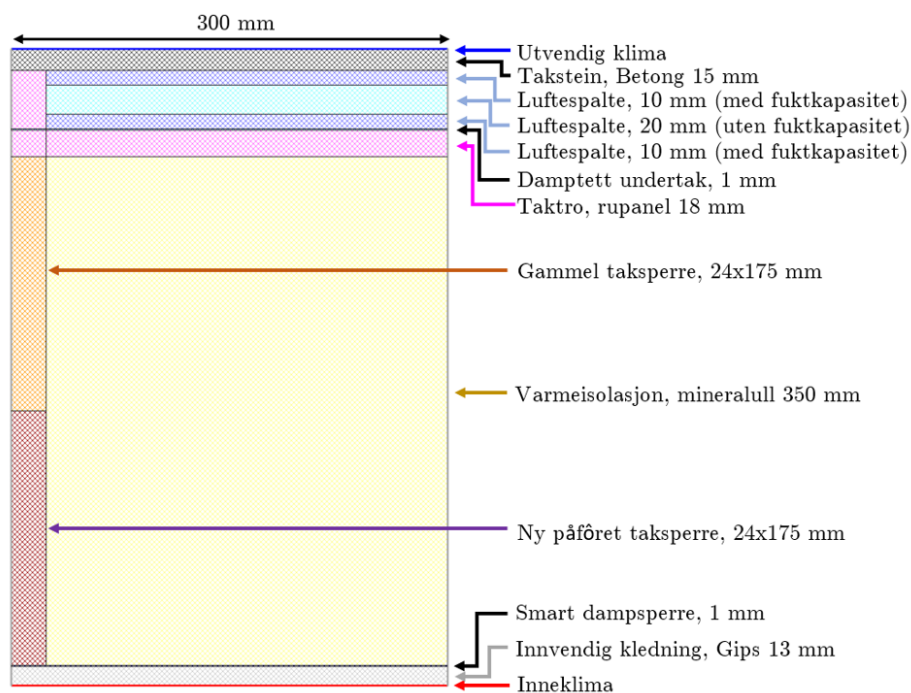
For at standardmodellen og parametervariasjonene skulle ha høy kvalitet og være så realistiske som mulig, var det behov for å gjøre innledende beregninger før hovedberegningene for flere deler av oppgaven. De innledende beregningene ble gjort for inngangsparametere som er usikre, og få best mulig resultater balansert mot kortest mulig beregningstid. Problemer som ble løst ved innledende beregninger er:

- Velge beregningsprogram: WUFI 1D eller 2D.
- Velge startfuktnivå for materialene.
- Finne kritiske punkter i konstruksjonen og hvor monitorpunktene skulle plasseres.
- Velge finhet for numerisk grid.

Sentrale innledende beregninger er presentert under relevant avsnitt.

3.3.1 Oppbygging av taket, materialer og startbetingelser

Den geometriske modellen i WUFI er bygget opp av et snitt av den ferdige etterisoleringsløsningen, som vist i Figur 3.1. Modellen grenser mot utsiden ved blå linje øverst, mot innsiden ved rød linje nederst, og har adiabatisk grenser mot sidene. De adiabatisk grensene har ingen temperatur- eller fukttransport, og etterligner derfor virkeligheten godt langs linjer konstruksjonen er symmetrisk om. Etersom takfakkene både er symmetrisk om taksperrene og midten av isolasjonen er det kun nødvendig å beregne et halvt takfakk i beregningsmodellen.



Figur 3.1: Oppbygging av takkonstruksjonen i WUFI. Modellen bygget opp som et halvt takfakk.

Taktekking

Luftet takstein av betong er valgt som taktekkning i alle beregningene. Varmekapasiteten og absorptansen for solstråling er vurdert som de viktigste parameterne i modellen for riktig gjengivelse av varme- og fukttransport i en fysisk taktekkning. Materiale som ble valgt i WUFI, var "Concrete w/c=0,5" og tykkelsen er 15 mm. Overflatens absorptansen for solstråling påvirker varmebidraget til taket fra kortbølget stråling. Absorptansen er beregnet med 0,8 for standardmodellen, og med 0; 0,6 og 0,7 for variasjon. Absorptans på null er en teoretisk beregning, som er gjort for å undersøke hva som skjer ved null varmebidrag fra solen.

Langbølget strålingsutveksling er slått på for å få en reell nedkjøling av taket ved negativ strålingsbalanse.

Regnabsorpsjon er slått av i modellen ettersom det blir ansett som neglisjerbart for formålet av denne oppgaven.

Undertak

Undertaket skal simulere det eksisterende undertaket som er damp tett. I modellen er "Roof membrane V13" valgt som materiale, som er en damp tett membran med s_d -verdi lik 100 m. Undertaket er antatt å være i god stand uten lekkasjer.

Luftespalte

I beregningene ble luftespalten utformet som i Figur 3.1. Lekter ble sløyfet fra konstruksjonen ettersom utformingen av snittet er i to dimensjoner. Den viktigste funksjonen til luftespalten over undertaket er transport av uteluftstemperert luft som kjøler ned

undertaket og taktekkingen dersom taktekkingen er varmet opp av solen. Mekanismen opptrer også motsatt ved at luften varmer opp taket dersom det er nedkjølt på grunn av negativ strålingsbalanse.

Selv om beregningene av taket med damptett undertak ikke er påvirket av fukttransport i luftespalten, ble luftespalten utformet mest mulig riktig for fukttransport. Modellen ble dermed også gyldig for referansekonstruksjonen med kombinert undertak og vindspærre som er beskrevet i Underkapittel 4.11.

For å lage en luftespalte som gir mest mulig realistisk fukttransport ble luftespalten bygget opp av tre lag luft, for å håndtere både kondensering og fuktkapasitet [30]. To av luftlagene har fuktkapasitet, hvor det ene er plassert mot taktekkingen og det andre er plassert mot undertaket. Det tredje laget er uten fuktkapasitet, og er plassert mellom de to lagene med fuktkapasitet. Luftskiftet er plassert i dette luftlaget.

Luftskiftet i luftespalter i skrå trectak er målt i forsøk ved SINTEF/NTNU og funnene har vært et varierende luftskifte mellom 11 og 84 luftskifter per time [31]. Dette var utgangspunktet for tallsetting av luftskiftet i modellen. WUFI beregner med konstant luftskifte, og 40 h^{-1} ble valgt som standard luftskifte.

Trematerialer

Alt treverk i modellen er gran. Materialet i beregningsmodellen, ”Scandinavian spruce transverse direction II”, er laget av NTNU og er hentet fra materialdatabasen i WUFI. Gran er best egnet i taktro av gran og furu dersom man ser bort fra kjerneved, og er det mest vanlige treverket til konstruksjonsformål i Norge [16].

Taksperrere har senteravstand på 600 mm og 48 mm tykkelse. En nedføring under de eksisterende sperrere er satt til å fylle den resterende isolasjonstykkelsen på totalt 350 mm.

Taktroen er valgt til å være rupanel, som er vanlig i eldre norske småhus. Tykkelsen er satt til 18 mm.

Nedføringen under den gamle taksperreren er et nytt bygningsmateriale, og er satt til et relativt lavt startfuktnivå som standard, RF 80%. Startfuktnivået i trematerialene fra den eldre konstruksjonen er undersøkt i innledende beregninger. Tre startfuktnivåer ble valgt til utgangspunkt for videre beregninger: lavt, middels (standard) og høyt startfuktnivå. Standardmodellen har en viss byggfukt for å være konservativ, og for å kunne sammenligne uttørkingsevnen for takkonstruksjoner med ulike parametere.

Tabell 3.6: Inngangsverdier for trematerialenes startfukt gitt i prosent RF.

Nivå for startfukt	Taktro	Gammel takspærre	Ny nedføret spærre
Lav [%]	70	50	70
Middels [%]	80	60	80
Høy [%]	85	80	80

Isolasjon

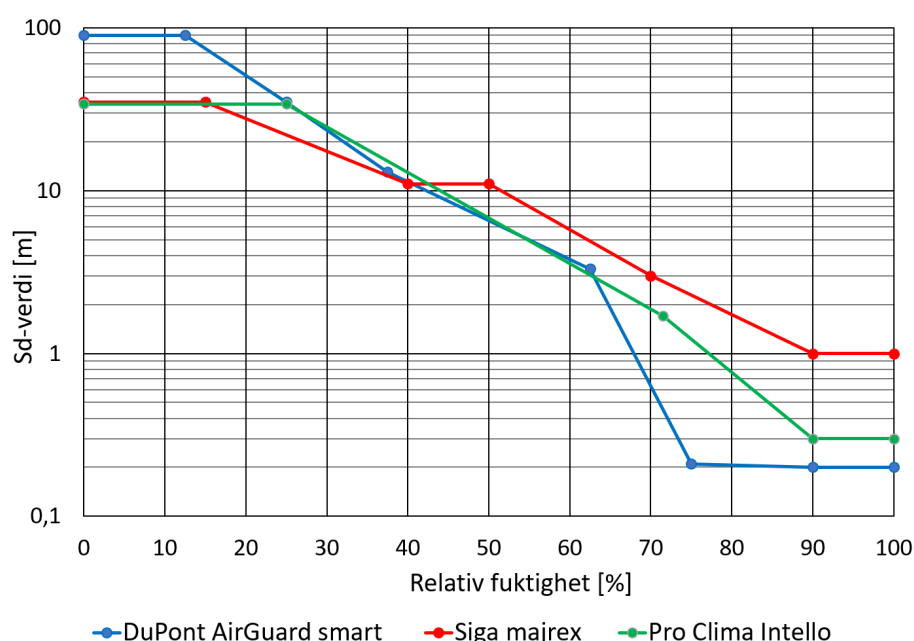
Taket blir etterisolert til totalt 350 mm mineralull. Materialet er fra materialbanken til WUFI, og heter materialet ”ISOVER GW Integra ZKF - 032”. Varmekonduktiviteten til materialet er

32 mW/m²K. Dette er en høysolert konstruksjon med U-verdi på 0,10 W/m²K, mot 50-100 mm isolasjon og U-verdi på 0,5-0,31 W/m²K som var vanlig fra 1950-1970 tallet [2].

Smart dampsperre

I denne oppgaven er det valgt å undersøke tre smart dampsperre-produkter: DuPont AirGuard Smart, Siga Majrex og Pro Clima Intello.

s_d -profil for de tre produktene er vist i Figur 3.2. Tallverdier er i Vedlegg B. s_d -profilen til DuPont AirGuard Smart er hentet fra produktbladet [32], Siga Majrex er hentet fra masteroppgaven til Ellinor B. Slettfjerding [33], og Pro Clima Intello er hentet fra materialbanken til WUFI [28]. DuPont AirGuard Smart har også tilsvarende s_d -profil som produktet Isola AirGuard Smart2, som har SINTEF Teknisk Godkjenning [33].



Figur 3.2: s_d -profiler for dampsperrere som er brukt i beregningene.

Etter innledende beregninger ble AirGuard Smart valgt som standard smart dampsperre i standardmodellen, fordi den ga best resultater for uttørking av taket.

For vanddampmotstand opererer WUFI med størrelsen μ -verdi i materialene. Der s_d -verdier er brukt i oppgaven ble disse omregnet til μ -verdi ved hjelp av Formel 2.1. For tynne materialsjikt er tykkelsen satt til 1 mm som standard i WUFI. Intello ligger i WUFI sin materialbank, mens s_d -profilen til de to resterende materialene er lagt inn manuelt.

Figur 3.2 viser at s_d -verdiene til AirGuard Smart er høyere ved lav RF, og lavere ved høy RF enn både Majrex og Intello. Alle smart dampsperre-produktene har s_d -verdi over ti meter ved RF under 40%, som inneluften pleier å ha på vinteren. Det er vanskeligere å skille produktene fra hverandre rundt 50%. Forskjellen mellom produktene øker med høy RF i inneluften, hvor AirGuard Smart har lavest s_d -verdi. Den har for eksempel s_d -verdi lik 0,2 meter ved 75% RF, mot rundt 2,5 m for Majrex ved samme RF.

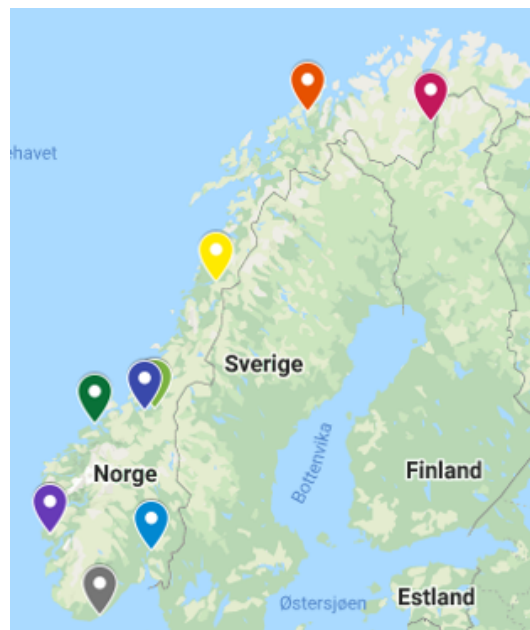
Innvendig kledning

Gips med dampåpen maling er valgt som innvendig kledning for å ha lavest mulig dampmotstand mot innsiden. I beregningsmodellen er materialene ”Gypsum board interior” for kledning og ”silicate paint” med s_d -verdi lik 0,01 m for maling.

3.3.2 Uteklima

For beregning av fukt- og varmetransport i bygningskomponenter brukes ofte et referanseår kalt moisture design reference year (MDRY) [34]. Dette er klimadata for et år som gir mer kritisk fuktbelastning enn gjennomsnittssituasjonen for et utvalg bygningskomponenter. Bygningskomponentene er tradisjonelle oppbygginger av vegger, gulv og tak. Det finnes MDRY beregnet for tolv steder i Norge, med grunnlag fra Det norske meteorologiske institutt. Dataene er samlet inn i forskjellige tidsperioder mellom 1961 til 1994, og referanseåret skal representere et år med returperiode på omtrent ti år. Ved beregninger blir det samme året brukt om igjen ved beregning av flere år.

De norske MDRY-klimafilene er i denne oppgaven brukt for å undersøke etterisoleringsløsningen i et utvalg steder i Norge som representerer diversiteten i norsk klima. MDRY fra Trondheim er valgt som standard uteklima, og åtte andre steder i Norge er brukt i variasjoner. Av disse inngår Bergen, Oslo, Værnes, Tromsø, Kristiansand, Kristiansund, Mo i Rana og Karasjok. Den geografiske plasseringen av de forskjellige stedene er vist i Figur 3.3.



Figur 3.3: Steder som er brukt i beregninger [35].

Selv om Trondheim og Værnes er nært hverandre geografisk og klimatisk, er Værnes tatt med som en kontrollberegning for å undersøke hvor like resultatene blir.

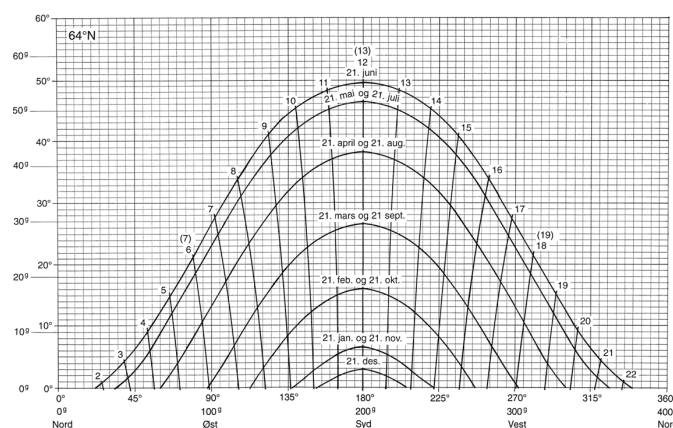
3.3.3 Orientering

Orientering av taket har betydning for kortbølget strålingsintensitet fra solen som bidrar til å varme opp taket. Inngangsparametere for takflatens orientering mot solen i WUFI er består av himmelretning og helling på taket.

Solens plassering på himmelen, og dermed strålingsintensiteten av kortbølget stråling, varierer med geografisk plassering på jorden. Norge strekker seg fra 58. breddegrad i sør (Lindesnes) til 71. breddegrad i nord (Honningsvåg) og har dermed stor variasjon i solforholdene. Figur 3.4 er et horisontskjema for den 64. breddegrad, som viser høydevinkelen til solen ved forskjellig orientering. Man kan se at nordvendte tak minst sol, og sørvendte tak mest. Orientering av taket i beregningsmodellen er vendt mot nord som standard, ettersom det har flest timer med skygge, som i teorien gir dårligst forhold for uttørking av taket.

Hellingen på den nordvendte flaten påvirker også strålingsintensiteten og tiden taket er i skygge. Fra Figur 3.4 kan man se når på året og døgnet den 64. breddegrad får direkte solstråling. I Norge får nordvendte tak noe sol når den står nord for øst og vest i sommerhalvåret. Perioden og intensiteten med sol avgjør varmebidraget av strålingen. Takets nordvendte flate vil også få sol dersom solen står høyt nok til å stråle fra sør og ned på den nordvendte flaten.

I beregningen er takhellingen er satt til 45 grader og mot nord, en relativt bratt vinkel for å undersøke konstruksjonen med relativt lite direkte sol. Variasjoner av hellingen er gjort med 15 og 30 grader. 15 grader er minimum helling for taktekking av betong og tegl, mens anbefalt takhelling er over 22 grader [12].



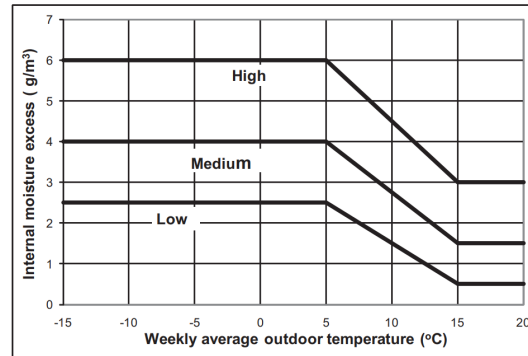
Figur 3.4: Horisontskjema for 64. breddegrad (Steinkjer). Figuren angir solbanen som funksjon av himmelretning, høydevinkel, tidspunkt på døgnet og året.

3.3.4 Inneklima

Inngangsparametere som er brukt for å simulere inneklima i WUFI er gjennomsnittlig innetemperatur, fuktinnhold fra uteluften og fukttilskudd som funksjon av utetemperatur. Parametere som er avhengig av uteluften er koblet til samme MDRY-klimafilten som uteklima.

Den gjennomsnittlige innetemperaturen ble satt til 21 °C som standard, og er variert med 20, 22 og 23 °C.

Dimensjonerende nivåer av fukttilskudd er hentet fra en undersøkelse av fukttilskudd i boliger i Norge [14]. Figur 3.5 viser de tre nivåene som funksjon av ukentlig gjennomsnittlig utetemperatur, hvor fukttilskuddet er lavere ved høyere utetemperatur. De tre nivåene av fukttilskudd er beskrevet i Tabell 3.7.



Figur 3.5: Dimensjonerende fukttilskudd i boliger [14].

Tabell 3.7: Beskrivelse av fukttilskuddnivåer i boliger [8].

Fukttilskudd, nivå	Beskrivelse
Lavt	Godt ventilert, få beboere
Middels	Middels ventilert, middels antall beboere
Høyt	Dårlig ventilert bolig, mange beboere, badrom

Standardmodellen er antatt å ha lavt fukttilskudd ettersom det er forutsatt at småhuset oppgraderer til balansert ventilasjon samtidig med energioppgraderingen av taket. Rom som typisk er i kontakt med skrå tak er også ofte soverom eller andre rom med lav fuktproduksjon. Middels og høyt fukttilskudd er også beregnet for å undersøke effekten av flere fuktsituasjoner, som for eksempel badrom.

3.3.5 Numerisk grid

Numerisk grid er delt opp av elementer i x- og y-retning i den geometriske modellen. WUFI genererer grid automatisk basert på valget om grovt, medium og fint grid. Med økt grad av finhet er elementene tettere, og nøyaktigheten og beregningstiden høyere.

I innledende beregninger ble standardmodellen og et utvalg parametervariasjoner med grovt, medium eller fint numerisk grid beregnet for å undersøke nøyaktigheten, beregningstiden og konvergensfeil. Medium og fint grid ga nokså like resultater, mens beregningene med grovt grid avviket noe fra disse. Ettersom fint grid bruker betydelig lengre beregningstid og forskjellen mellom medium og fint grid var neglisjerbar, ble det ble besluttet å bruke medium grid. Med medium grid er konstruksjonen delt inn i 112x112 elementer i planet.

3.3.6 Beregningsstart og beregningsperiode

Beregningsstart simulerer tiden taket er ferdig etterisolert og de fysiske prosessene starter å skje med gitte startbetingelser. Valg av beregningsstart er gjort på bakgrunn av konstruksjonens materialer og tørkemekanisme.

Tak med smart dampsperre skal i prinsippet tørke om sommeren. Dersom man lukker taket etter sommeren, vil dermed ikke byggfukt tørke ut før neste sommer. Beregningsstart før sommeren vil derimot gå direkte inn i en tørkeperiode. En konservativ beregningsstart for standardmodellen er derfor satt til 1. oktober. Effekten av forskjellig beregningsstart er undersøkt med variasjonene 1. april og 1. juli.

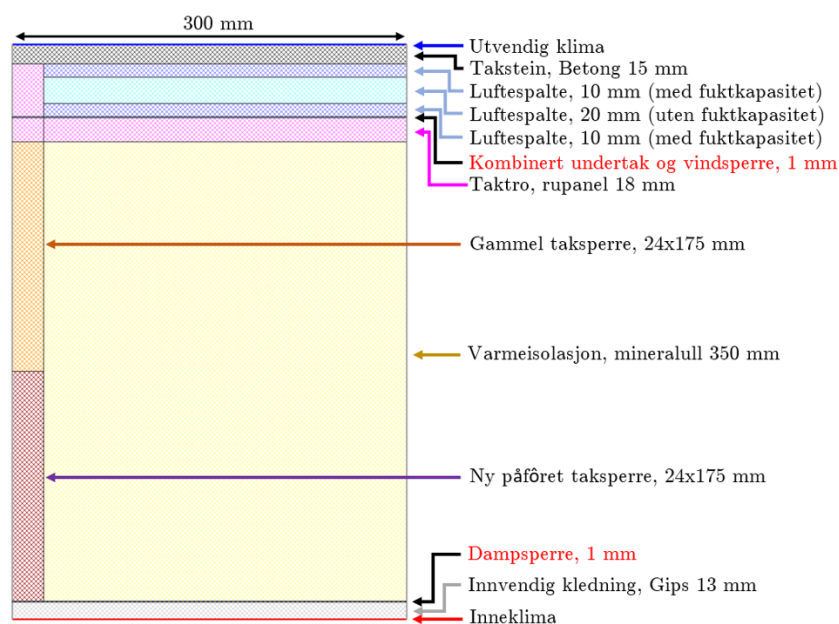
Antall tidssteg i modellen er satt til 43 800, som tilsvarer antall timer i fem år. Beslutningen ble tatt på bakgrunn av at de innledende beregningene bruker mange år på å nå en likevekt av totalt vanninnhold. Antall tidssteg kunne med fordel vært ytterligere økt for at vanninnholdet skulle stabilisere seg ved likevekt i flere beregninger, men av hensyn til beregningstid var vurderingen at fem år var best resultat avbalansert mot beregningstid.

Året for beregningsstart er ubetydelig for beregningene ettersom referanseåret til MDRY filen går om igjen hvert år. Starttidspunkt må uansett velges i WUFI, og for å følge tiden i resultatene er beregningstiden satt fra år 2018 til 2023.

3.3.7 Referansekonstruksjon: Tradisjonell takoppbygging

En referansekonstruksjon med tradisjonell oppbygging er beregnet for å sammenligne den nye løsningen med en velutprøvd og anbefalt konstruksjon. Takkonstruksjonen er bygget opp som i Figur 3.6, og tilsvarer etterisoleringsløsningen i Figur 2.6b. Løsningen er forskjellig fra standardmodellen ved at den har dampåpent undertak og tradisjonell dampsperre, istedenfor damptett undertak og smart dampsperre. Det dampåpne undertaket er kombinert undertak og vindsperre med s_d -verdi på 0,5 m, og den tradisjonelle dampsperreren har s_d -verdi på 87 m. Den praktiske forskjellen ved etterisolering med tradisjonell oppbygging er at denne løsningen krever montering av nytt undertak på utsiden.

Løsningen er beregnet med standard inngangsverdier, i tillegg til variasjoner med høyt startfuktnivå og høyt fukttilskudd.



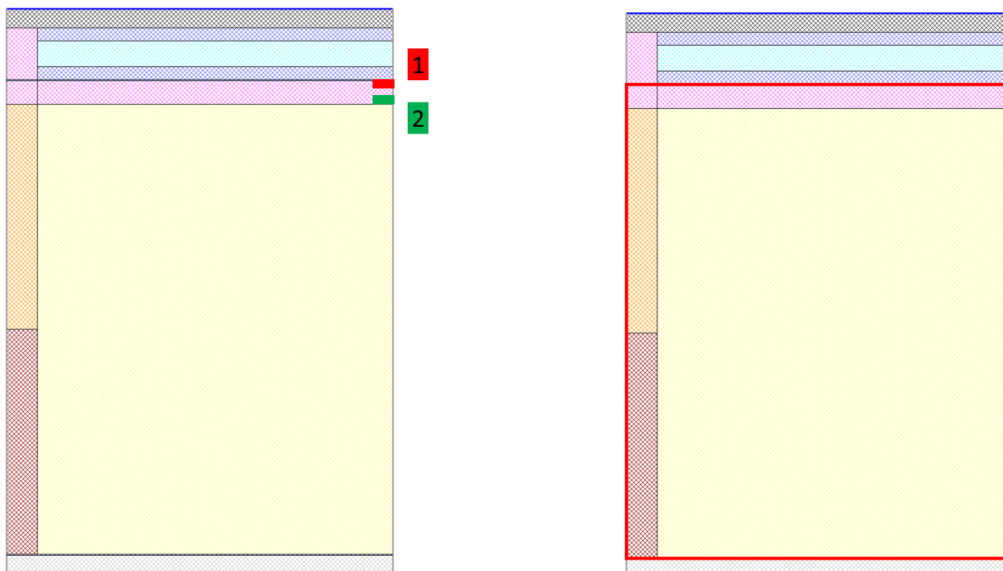
Figur 3.6: Oppbygging av referansekonstruksjonen i WUFI.

3.4 Monitorpunkter

I resultatfilen til beregningene fra WUFI velger man monitorpunkter eller -områder i konstruksjonen hvor man ønsker fukt- eller temperaturdata. Det er derfor viktig å vite hvilket eller hvilke punkt som er relevante for undersøkelsen. Før hovedberegningene ble kjørt, ble konstruksjonen undersøkt for hvilket punkt som var kritisk for et utvalg beregninger. Undersøkelsen av kritisk punkt var basert risiko for muggvekst, med tid med RF over 80 % og temperatur over 0 °C, og med muggindeks i VTT-muggmodellen. Ved variasjoner av syv utvalgte parametere og åtte forskjellige monitorpunkter var det mest kritiske punktet for alle beregningene den ytterste delen av taktroen, midt mellom taksperrene, som vist med "1" i Figur 3.7a. Punktet markert med "2" hadde periodevis høyest RF, men i kombinasjon med høyere temperatur var punkt 1 mest kritisk. Dette viser også modellering i VTT-muggmodellen. Punkt 1 er dermed valgt som kritisk punkt i beregninger med smart dampsperre. Resultater av de innledende beregningene og grunnlaget for valget av kritisk punkt ligger i Vedlegg C.

Tilsvarende undersøkelse ble gjort med referansekonstruksjonen, ettersom konstruksjonen har en annerledes fuktsituasjon med uttørkingmulighet mot utsiden. Det kritiske punktet til referansekonstruksjonen er ble etter undersøkelsen vurdert til å være på innsiden av taktroen midt i takfaket. Punktet er markert med "2" i Figur 3.7a.

Figur 3.7b viser monitorområdet som ble brukt for å måle vanninnholdet i taket. Alle punkter mellom undertaket og den smarte dampsperran ble markert. Ved å undersøke fuktinnholdet mellom de to sperresjiktene kan man studere hvor mye fukt som beveger seg inn og ut av konstruksjonen over tid.



(a) Kritiske punkt: (1) i standardmodellen, (2) i referansemodellen.

(b) Monitorering av vanninnhold i taket markert med rød firkant.

Figur 3.7: Monitorplassering i beregningsmodellene.

3.5 Oppsummering av inngangsverdier

Inngangsverdier for standardmodellen og enkelte parametervariasjoner er oppsummert i Tabell 3.8. Beregninger med variasjon av mer enn én parameter er ikke inkludert. Dette gjelder for eksempel ved bruk av både Majrex og høyt fukttilskudd. Parametermatrise med alle parametervariasjoner ligger i Vedlegg D. Også flere standard inngangsverdier er utelatt fra tabellen. Disse er lagt ved i en oversikt av standardmodellens inngangsverdier i Vedlegg E.

Tabell 3.8: Oppsummering av inngangsverdier og parametervariasjoner i standardmodellen.

Parameter i WUFI	Std inngangsverdi	Variasjon(er)
Beregningsstart	1. oktober	1. april 1. juli
Numerisk grid	Medium	
Beregnet tidsperiode	5 år (43 800 steg á 1 time)	
Sted	Trondheim	Kristiansand, Oslo, Bergen, Kristiansund, Værnes, Mo i Rana, Tromsø, Karasjok
Orientering	Nord	Nord-Øst, Øst, Sør, Vest, Nord-Vest
Takvinkel	45 grader	15 grader 30 grader
Smart dampsperre	Dupont AirGuard smart	Siga Majrex Pro Clima Intello
Fukttilskudd	Lav (0,5-2,5 g/m ³)	Middels (1,5-4,0 g/m ³) Høy (3,0-6,0 g/m ³)
Absorptans solstråling	0,8	0 0.6 0.7
Innetemperatur	21 °C	20 °C 22 °C 23 °C
VTT parameter		
Sensitivitet	Sensitiv	
Reduksjonsfaktor	Relativt lav reduksjon	Relevant reduksjon
Overflate	Ru	Glatt
Tremateriale	Bartre	
Eksponeringsklasse	Materiale i konstruksjonen uten kontakt med inneluft	

Kapittel 4

Resultater og diskusjon

I dette kapittelet blir resultatene fra parameterundersøkelsen presentert og diskutert. Resultatene er kategorisert etter parametere slik at variasjonene kan bli sammenlignet i samme diagram. Etter at parameterene er presentert og diskutert hver for seg, blir de sammenlignet mot hverandre. Til slutt blir praktiske utfordringer og usikkerheter med beregningene diskutert.

For hver parameter hvor det er relevant, er følgende tre figurer presentert: Utviklingen av vanninnhold i taket per kubikkmeter av konstruksjonen, RF og temperatur i det kritiske punktet, og muggindeks i det kritiske punktet. Horisontalaksen i alle figurene er beregningstiden, som er fem år for alle beregninger.

I den første figuren er det mulig å undersøke transporten av fukt inn og ut av taket, og hvilken likevektsfukt det stabiliserer seg ved, eventuelt om det ikke stabiliserer seg. Merk at monitorområdet for figuren som viser vanninnhold per kubikkmeter konstruksjon er hele området fra den smarte dampsperran til undertaket, som vist i Figur 3.7b.

Den andre figuren viser temperatur og RF i det kritiske punktet. Disse angir den hygrotermiske tilstanden til materialet, og impliserer hovedsakelig faren for muggvekst. Timesverdiene fra beregningene er regnet om til månedsgjennomsnitt for å gjøre figurene mer oversiktlige. Dersom bare én temperatur er vist, gjelder den for alle beregningene. Dataene fra RF- og temperaturkurvene er råmaterialet i beregningene som er brukt til å produsere VTT-muggmodellen.

Den siste figuren som blir vist for hver parametervariasjon er muggindeks i det kritiske punktet. Som beskrevet i metode indikerer muggindeks under 2 grønt lys, muggindeks mellom 2 og 3 gult lys og muggindeks over 3 rødt lys. Lysgrensene er markert med linjer i figurene.

I slutten av resultatene blir resultatene sammenlignet i to figurer, hvor man kan se total uttørking og risiko for muggvekst mot hverandre.

4.1 Standardmodellen

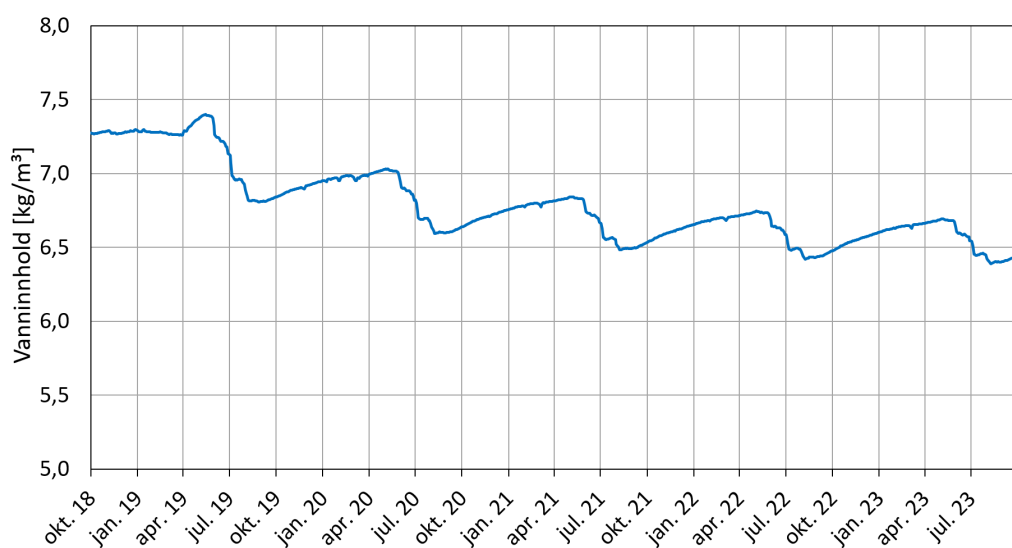
Standardmodellen er beregningsmodellen med inngangsparametere som er utgangspunktet for alle beregningene. Inngangsverdiene er oppsummert i Tabell 3.8. Resultatene for standardmodellen er vist i Figur 4.1a - 4.1c, og modellen er presentert alene for å vise og diskutere generelle betraktninger ved standard inngangsverdier.

Figur 4.1a viser vanninnholdet i taket, og man kan se hvordan taket tørker og fuktes gjennom de fem årene konstruksjonen er beregnet. Man kan se at det tar over et halvt år fra beregningsstart til takkonstruksjonen begynner å tørke. Uttørkingen av taket skjer på sommeren hvert år, fra mai til september. Utenfor tørkeperiodene trenger noe fukt inn i konstruksjonen. De første årene er uttørkingen større enn oppfuktingen, før taket stabiliserer seg ved likevektsfukt etter cirka fire år. Dette viser at det er byggfukt i konstruksjonen som tørker ut.

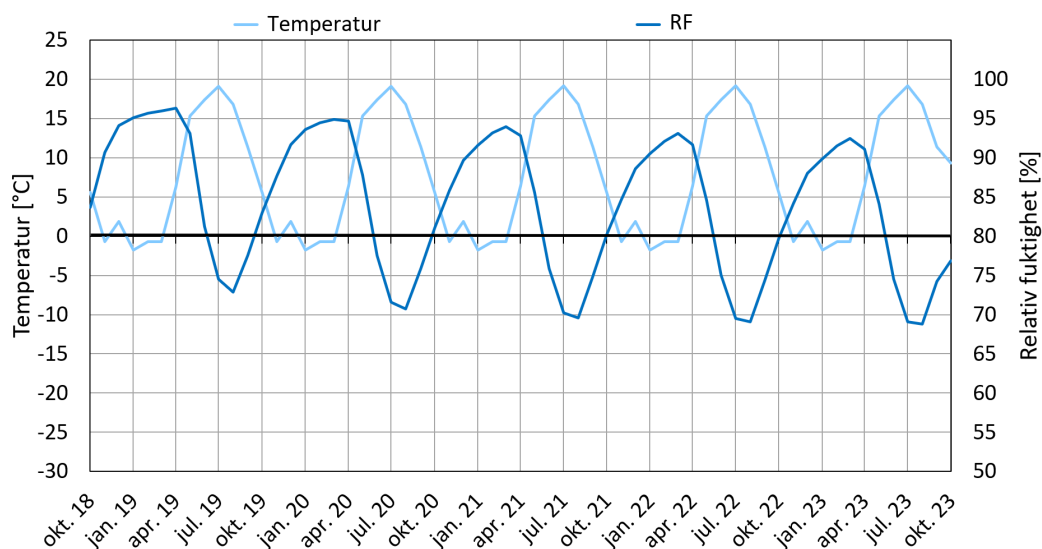
I Figur 4.2b kan man se at RF i det kritiske punktet er høyest det første året, og synker etter hvert som konstruksjonen tørker. Konstruksjonen har størst risiko for muggvekst fra midten av mars til midten av juni hvert år, da månedsverdiene av RF og temperatur er høyest over 80% RF og 0 °C samtidig. Dette ser man også i Figur 4.1c hvor muggindeksen har høyest stigning i den samme perioden. Tilfeller av RF over 80% og temperatur over 0 °C opptrer også enkelte døgn og timer i døgnet store deler av året, fra oktober til juni.

I VTT-muggmodellen er muggindeksen over 2 i to korte perioder de første somrene, før den synker. Konstruksjonen er derfor kategorisert til gult lys i "trafikklys"-skalaen til programmet. Konstruksjonen er dermed verken regnet som akseptabel eller uakseptabel, og trenger en annen vurdering før konstruksjonen kan bli regnet som akseptabel. Muggindeksen stabiliserer seg ikke ved likevekt i løpet av fem år, men nærmer seg lave verdier av mugg som er akseptable, isolert sett.

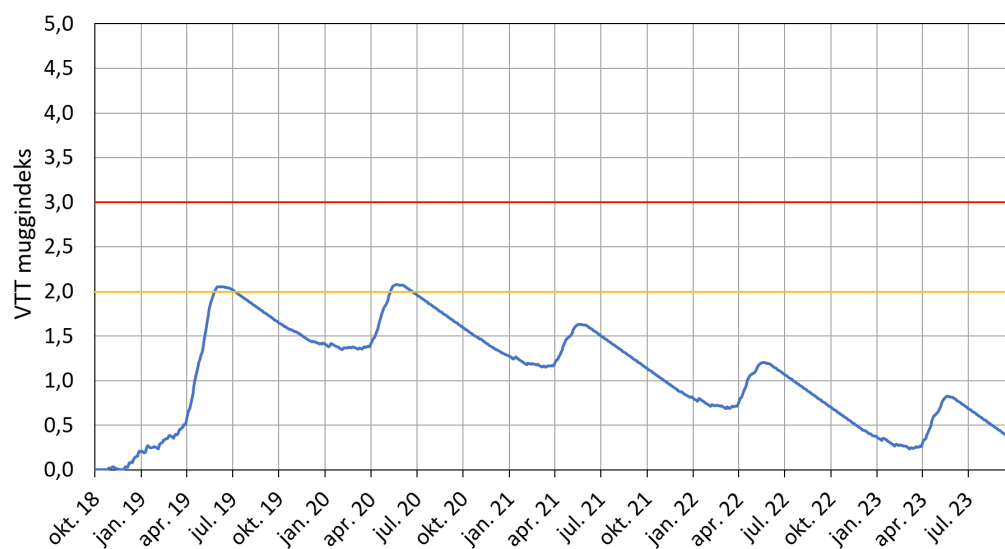
Ut fra utviklingen av vanninnholdet og vurderingene av risiko for muggvekst er fuktsituasjonen i taket mest kritisk de første årene før overskuddsfukten er tørket ut. Høy muggvekst kunne blitt unngått dersom det hadde vært mindre overskuddsfukt eller konstruksjonen hadde hatt bedre uttørkingsevne med kortere uttørkingstid.



(a) Utvikling av vanninnhold i taket.



(b) Månedsverdier av temperatur og RF i det kritiske punktet.



(c) Muggindeks i det kritiske punktet.

Figur 4.1: Resultater for beregninger av standardmodellen.

4.2 Beregningsstart

Dato for beregningsstart simulerer tidspunktet taket blir lukket under etterisoleringen. Resultatene for parametervariasjon av beregningsstart er vist i Figur 4.2a-4.2c. Beregningsstart i standardmodellen er 1. oktober, og variasjonene er 1. april og 1. juli.

Som forventet for en konstruksjon med smart dampspærre, tørker taket på sommeren mellom mai og august, som vist i Figur 4.2a. Standardmodellen med beregningsstart 1. oktober har dermed tilnærmet null uttørking det første halvåret, mens beregningsstart 1. april og 1. juli går direkte inn i en tørkeperiode. Ettersom konstruksjonen har byggfukt og ikke har tørket noe det første halvåret ved lukking 1. oktober, er RF høy når temperaturene begynner å stige på våren. Dette kan man se i Figur 4.2b. I beregningene med beregningsstart 1. april og 1. juli blir denne perioden med høy RF unngått, og taket tørker ut store deler av byggfukten den første sommeren.

VTT-muggmodellen i Figur 4.2c viser at vekstforholdene for muggsopp er spesielt gode i mai og april det første halvåret ved beregningsstart 1. oktober. Muggmodellen viser også at mye muggsopp overlever ved at muggindeksen forblir høyere de påfølgende årene, til tross for at vanninnholdet har stabilisert seg ved samme nivå som de to andre beregningene. Muggindeksen i standardmodellen blir redusert med tiden og stabiliserer seg på omtrent likt nivå som med beregningsstartene 1. april og 1. juli etter fire år.

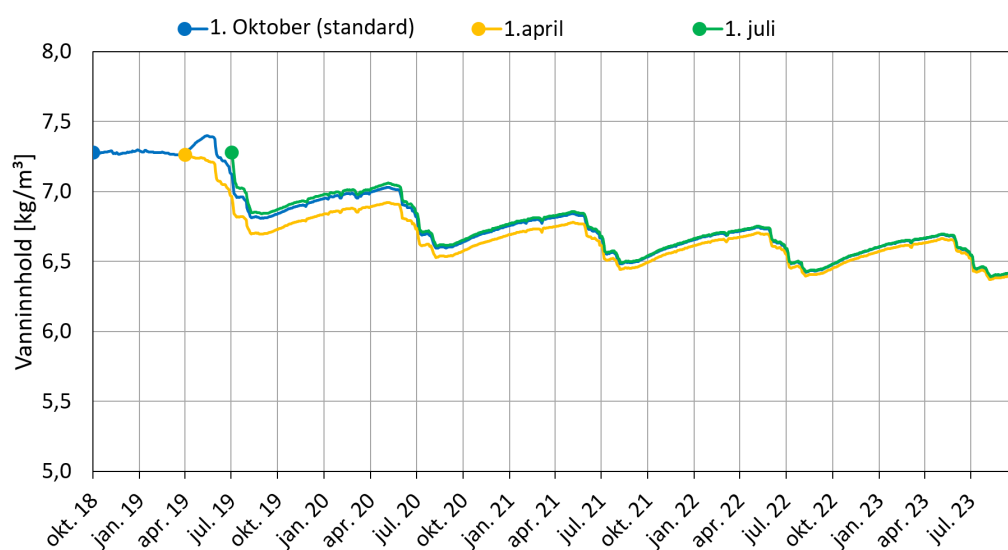
Muggindeksen for beregningsstart 1. april og 1. juli vokser tilnærmet likt, med størst muggvekst de tre påfølgende årene fra beregningsstart. De to beregningene har da tre år med muggindeks rundt 1, midt på sommeren. Dette er regnet som grønt lys i VTT-muggmodellen, som er regnet som akseptabel muggvekst .

Den store forskjellen på risiko for muggsopp som beregningene har viser at fukten som er i taket fra beregningsstart 1. oktober og frem til sommeren er kritisk for konstruksjonen. Konstruksjonen bør dermed tørke så mye som mulig før temperaturen stiger. Man kan se at beregningsstart 1. april også får en liten periode med muggvekst ved beregningsstart, noe som tyder på at 1. april også er noe tidlig for lukking av taket. Ved beregningsstart 1. juli tørker taket også noe mindre enn ved beregningsstart 1. april. Optimalt tidspunkt for etterisolering og lukking av taket er dermed rundt 1. juni.

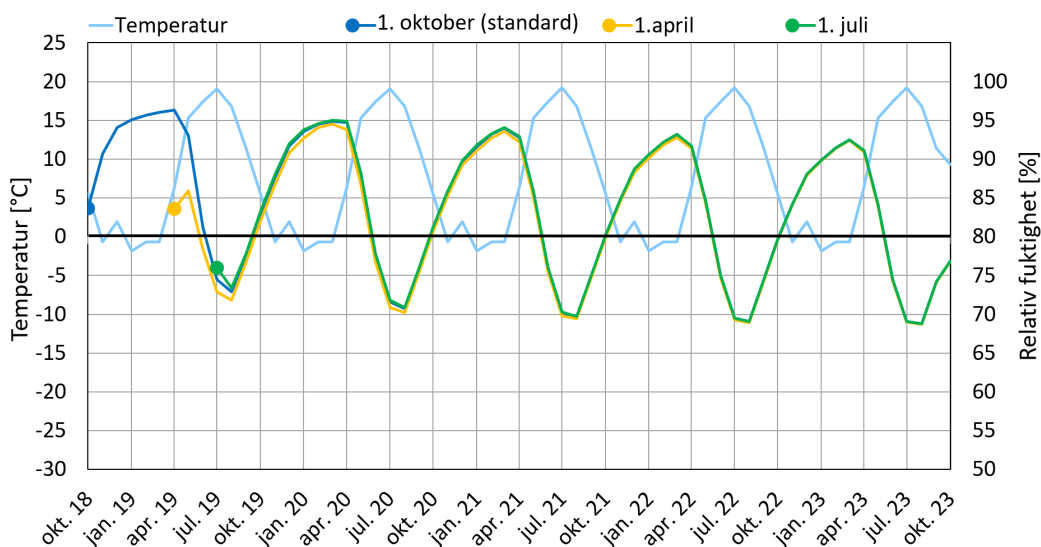
Resultatene viser at 1. oktober er et konservativt valg av beregningsstart i standardmodellen. Merk at formen til RF-kurven i Figur 4.2a og til muggindeksen i Figur 4.2c med beregningsstart 1. oktober går igjen i øvrige parametervariasjoner i oppgaven. Det må derfor tas i betraktning at den høye fukten og muggveksten det første året kan bli unngått til en viss grad ved å etterisolere på mer gunstige tidspunkt.

Effekten av forskjellig beregningsstart vil ha større betydning med høyere overskuddsfukt enn ved lav eller ingen overskuddsfukt. Det er derfor spesielt viktig å etterisolere mellom 1. april og 1. juli dersom det er høy overskuddsfukt i eksisterende eller nye materialer i taket.

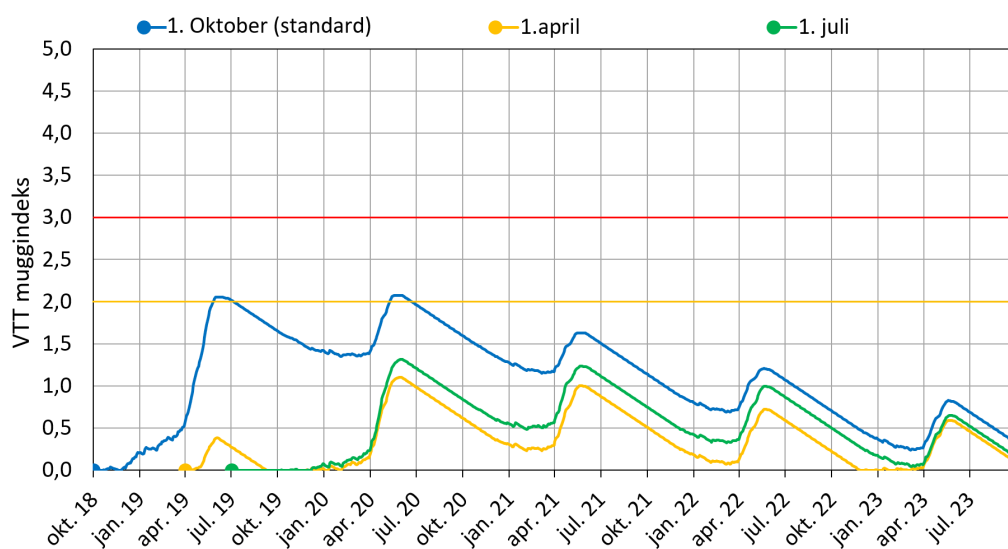
Det er vanskelig å bestemme når på året rehabiliteringsprosjekter skal utføres. Det må derfor vurderes om det bør være en anbefalt periode for lukking av konstruksjonen, eller om den må regnes som for lite robust dersom den ikke er fuktsikker nok ved lukking på bestemte deler av året.



(a) Utvikling av vanninnhold i taket.



(b) Månedsverdier for temperatur og relativ fuktighet i det kritiske punktet.



(c) Muggindeks i det kritiske punktet.

Figur 4.2: Resultater ved variasjon av beregningsstart.

4.3 Startfuktnivå

Innledende beregninger av en typisk takkonstruksjon fra 1960-tallet førte til tre kategorier av startfuktnivå som videre skulle bli undersøkt i etterisoleringsløsningen. Fuktnivået i trematerialene er vist i Tabell 3.6, og er kategorisert til lav, middels (standard) og høy startfukt.

Som man kan se i Figur 4.3a er ingen av de beregnede konstruksjonene i fuktlikevekt ved beregningsstart. Beregningene med middels og høyt startfuktnivå har byggfukt som må tørke ut, mens beregningen med lavt startfuktnivå ligger under likevektfukt fra start. Etter fire år er alle beregningene i likevekt.

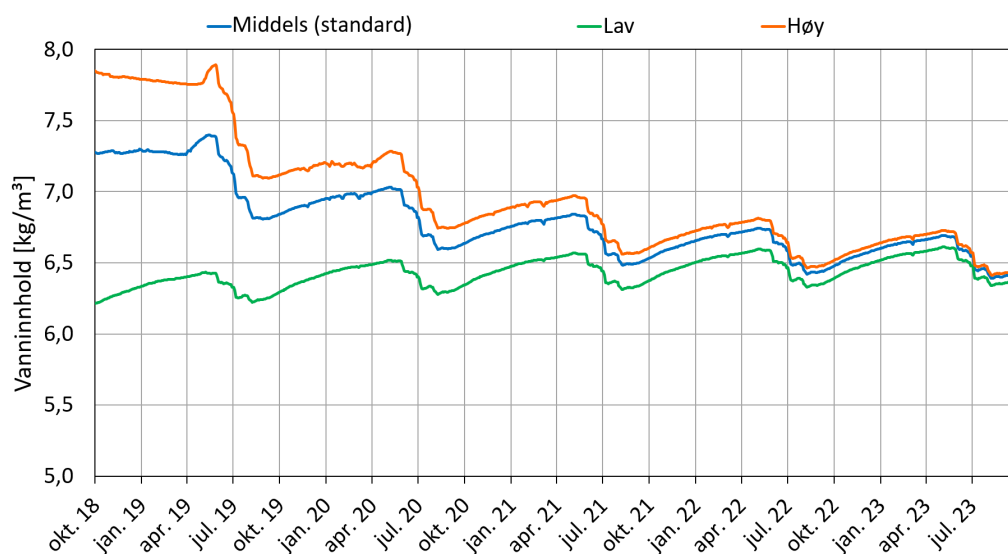
Beregningene med middels og høy startfukt har også overskuddsfukt, som vist med høy RF i kombinasjon med temperaturer over 0 °C i det kritiske punktet over lengre tid de første årene, i Figur 4.3b. Dette resulterer i en lengre periode med kraftigere muggvekst. Beregningen med lavt startfuktnivå har derimot lavere RF enn likevekten og får høyere RF ettersom konstruksjonen trekker til seg mer fukt.

Standardmodellen har som kjent gult lys i VTT-muggmodellen, og dette med middels startfuktnivå. I Figur 4.3c ser man at beregningen med høyt startfuktnivå får uakseptabel muggvekst med muggindeks lik 3 på sommeren etter to år.

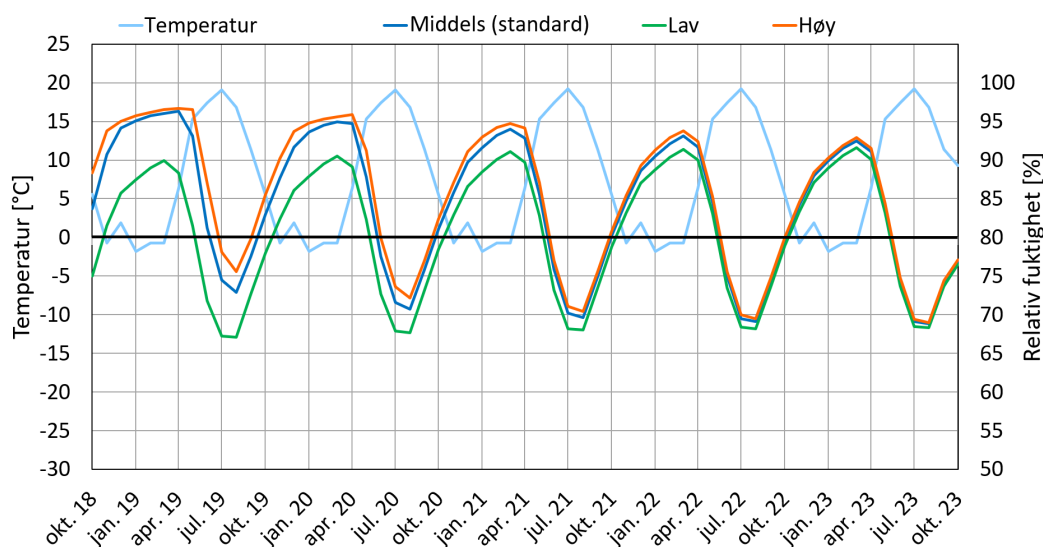
Muggindeksen til beregningen med lav startfukt har en vekslende vekst og utslettelse av muggkolonier, med gradvis større vekst hver sommer. Beregningene med lav og middels startfukt går mot like verdier det siste året, og det kan antas at beregningene har en stabil vekslende muggindeks mellom 0 og 0,6 i likevekt. Muggindeks på 0,6 er godt innenfor grønt lys, og er derfor regnet som akseptabelt.

Undersøkelsen av de tre nivåene av startfukt viser at løsningen har risiko for høy muggvekst de første årene dersom konstruksjonen har middels til høyt startfuktnivå. Dersom konstruksjonen ikke har overskuddsfukt, er derimot risikoen for muggvekst lav. Det vil si at likevektsnivået av fukt er akseptabelt, men at uttørkingstiden er for lang for uttørking av byggfukt.

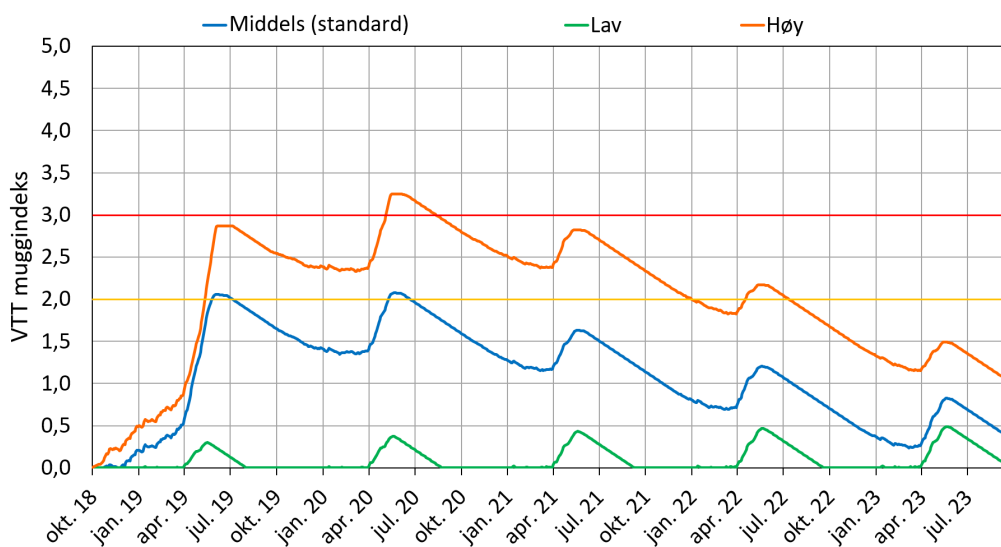
Ettersom store deler av trematerialene i taket er fra det eksisterende taket, må det vurderes om fuktnivået er tilstrekkelig lavt før man etterisolerer. Fuktnivået i den eksisterende konstruksjonen kan blant annet variere med oppbygging, materialer, uteklima, inneklime og tid på året, og er derfor vanskelig å generalisere. Fuktmåling i eksisterende tak kan derfor være nødvendig dersom løsningen med smart dampspærre skal bli brukt.



(a) Utvikling av vanninnhold i taket.



(b) Temperatur og relativ fuktighet i det kritiske punktet.



(c) Muggindeks i det kritiske punktet.

Figur 4.3: Resultater ved variasjon av startfuktnivå.

4.4 Orientering

Taket er simulert mot forskjellige himmelretninger for å undersøke i hvilken grad varmebidraget fra kortbølget stråling ved forskjellig orientering påvirker uttørkingsevnen til taket. Orientering mot de fire himmelretningene nord, sør, øst og vest er beregnet, i tillegg til nord-vest og nord-øst. Beregningene er med standard helling på 45 grader.

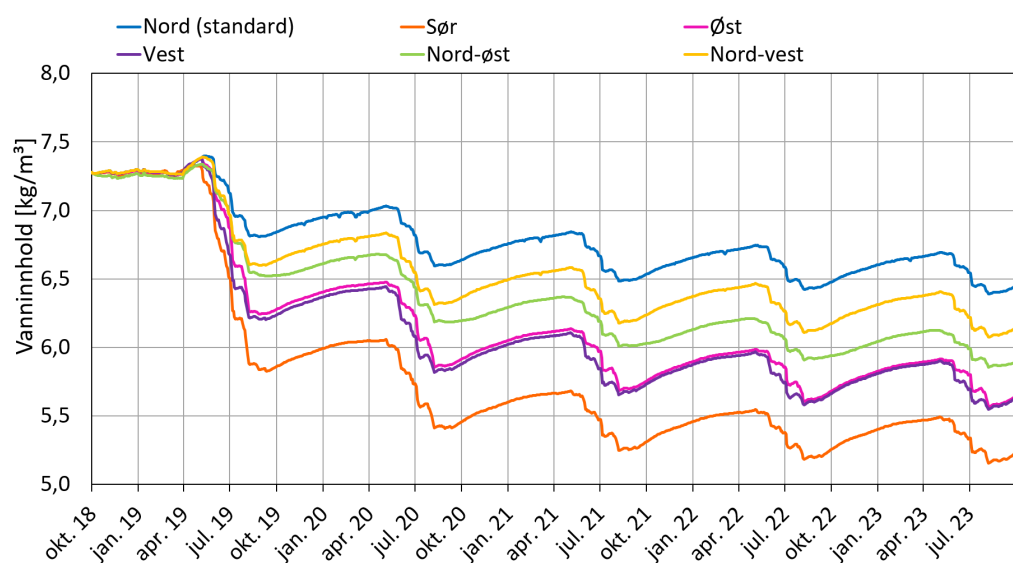
Figur 4.4a viser hvordan tak med forskjellige orienteringer tørker og stabiliserer seg ved forskjellige likevektsnivåer av vanninnhold. Uttørkingsevnen til taket er bedre jo sørligere takflaten er rettet, ettersom kortbølget strålingsintensitet er høyest i sør, og avtar med avvikende vinkel. Man kan se at det øst- og vestvendte taket tørker ut dobbelt så mye som det nordvendte taket gjør i løpet av fem år, og det sørvendte taket tørker ut 2,5 ganger mer fukt enn det nordvendte taket gjør på fem år. Også nord-øst- og nord-vestvendt tak har en betydelig bedre uttørkingsevne enn nordvendte tak.

Figur 4.4b viser at takflater mot sør oppnår tre til fire grader høyere temperatur i snitt om sommeren ved det kritiske punktet enn mot nord. Den høyeste temperaturen i det kritiske punktet i tak vendt mot nord er 39 °C, mens sørvendte oppnår 53 °C. Damptrykkgradienten peker da innover for begge takene, med størst effekt for sørvendte tak.

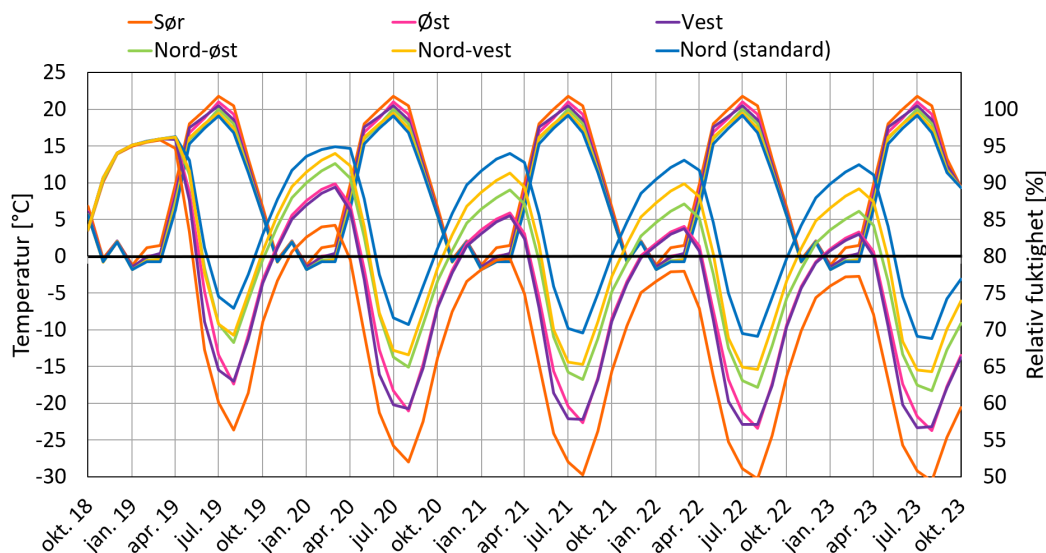
Muggrisikoen ved de forskjellige orienteringene går fra å være høy det første året, til ikke-eksisterende for sørvendte tak, med gradvis høyere risiko mot nord. Den høyeste verdien av RF på det femte året av beregningene er 92% for nordvendte tak, 83% for øst- og vestvendte tak og 77% for sørvendte tak. Det er dermed kun nordvendte tak som har gult lys i VTT-muggmodellen i Figur 4.4c. Resten har grønt lys. Den høye muggveksten det første halvåret som alle orienteringene har, er som kjent fra Underkapittel 4.2 mulig å unngå ved å lukke taket rett rundt 1. juni. Etter byggfukten er tørket ut etter cirka tre år, er det kun det nordvendte taket som har muggindeks over null.

Fra resultatene kan man trekke ut at orientering mot solen har stor påvirkning på uttørkingsevnen til taket. Selv nord-østvendt og nord-vestvendt tak har en betydelig effekt av varmebidraget fra solstråling i forhold til nordvendt tak. Det viser at det skal et relativt lite avvik fra nord til, for å redusere risikoen for muggvekst i taket betydelig.

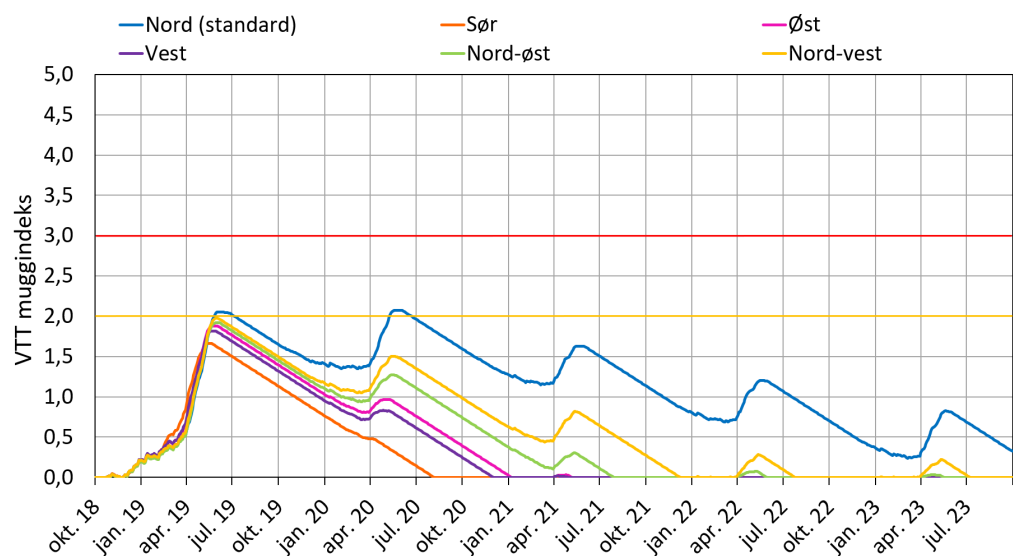
Saltak har to sider i motstående himmelretning, så dersom man har et sørvendt tak, har man også et nordvendt tak. Det er derfor viktig at løsningen er dimensjonert mot den nordligste takflaten. Det beste tilfellet er derfor et saltak som heller mot øst og vest.



(a) Utvikling av vanninnhold i taket.



(b) Temperatur og relativ fuktighet i det kritiske punktet.



(c) Muggindeks i det kritiske punktet.

Figur 4.4: Resultater ved variasjon av orientering.

4.5 Takhelling

Takhelling er også en parameter som påvirker hvor høy kortbølget strålingsintensitet taket får fra solen. Det er undersøkt tre forskjellige takvinkler: 15, 30 og 45 (standard) grader. Variasjonen av takhelling er kun beregnet for takflater mot nord.

Som vist i Figur 4.5a er uttørkingsevnen bedre med lavere helling på taket. Tak med helling på 15 grader tørker ut omtrent dobbelt så mye fukt som taket med 45 grader helling gjør i løpet av fem år. Det tilsvarer uttørkingsevnen til øst- og vestvendte tak.

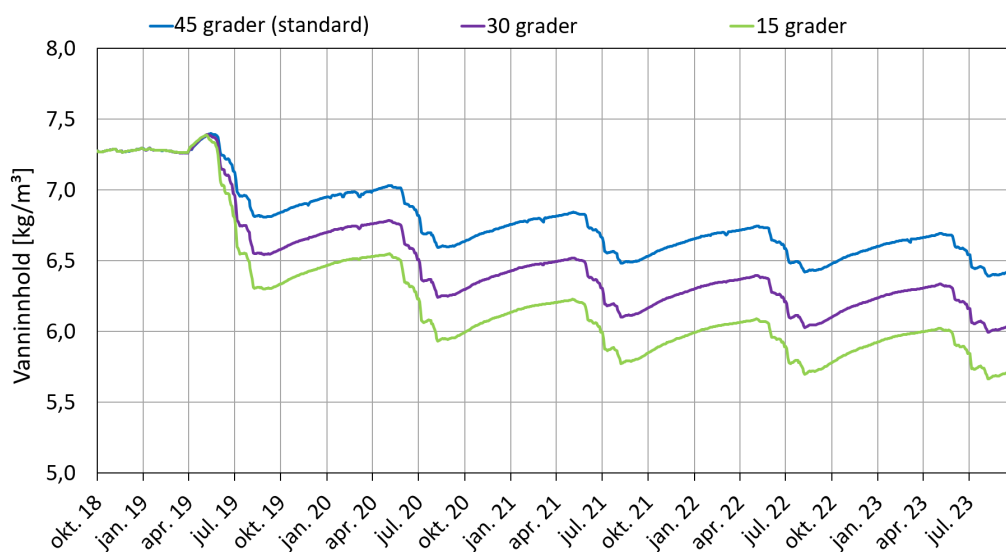
I beregningene er kortbølget strålingsintensitet mot taket den viktigste effekten av varierende takhelling, selv for nordvendte tak. Nordvendte tak får direkte solstråling når solvinkelen er større enn takhellingen, og når solen beveger seg nord for øst og vest. Effekten av lavere takhelling fører derfor til de samme effektene som orientering mot sørligere takflater. På sommeren stiger temperaturen ved undertaket ved lavere takhelling, slik at damptrykkgradienten mot inneluften blir større. Dermed blir uttørkingsevnen større, RF lavere og risikoen for muggsopp synker.

Ettersom takhelling på 15 grader har tilsvarende uttørkingsevne som øst- og vestvendte tak, blir muggindeksen også tilsvarende, som vist i Figur 4.5c.

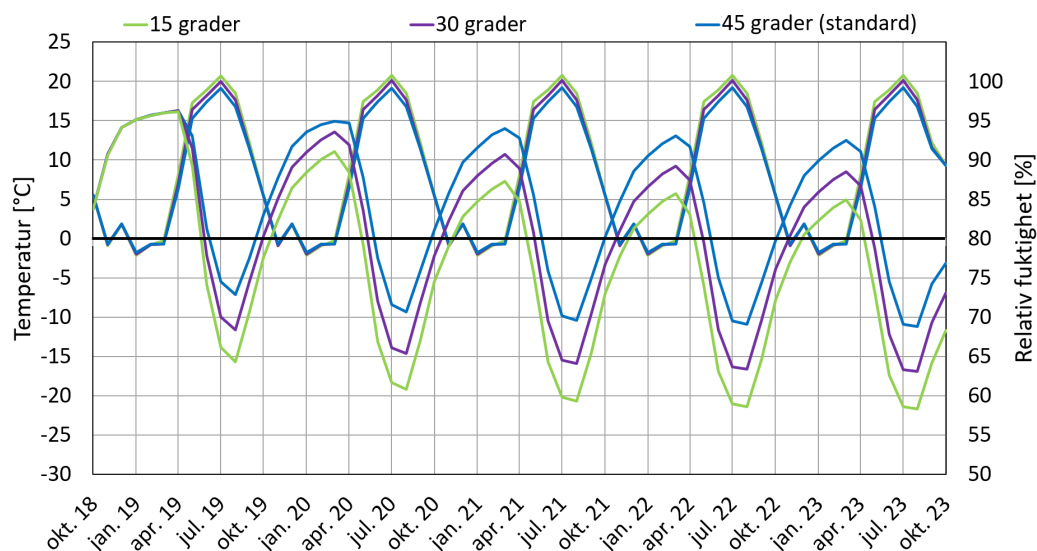
Kortbølget stråling varmer taket opp fra forskjellig vinkel og med forskjellig intensitet avhengig av hvilken breddegrad konstruksjonen er plassert på. Strålingsdata kan også variere fra år til år ettersom skyer og atmosfæren kan "stjele" sol. Beregningene er gjort i Trondheims-klima, hvor solbanen og klima er forskjellig fra andre steder i Norge. Blant annet er solhøyden i Trondheim høyere enn i Nord-Norge, og lavere enn i Sør-Norge. Effekten av varierende takhelling kan dermed variere fra sted til sted.

Takhelling på 45 grader er standard i modellen, men også brattere takvinkler er vanlig i skrå tak. Det finnes dermed mer konservative parametervariasjoner som ikke er undersøkt i oppgaven.

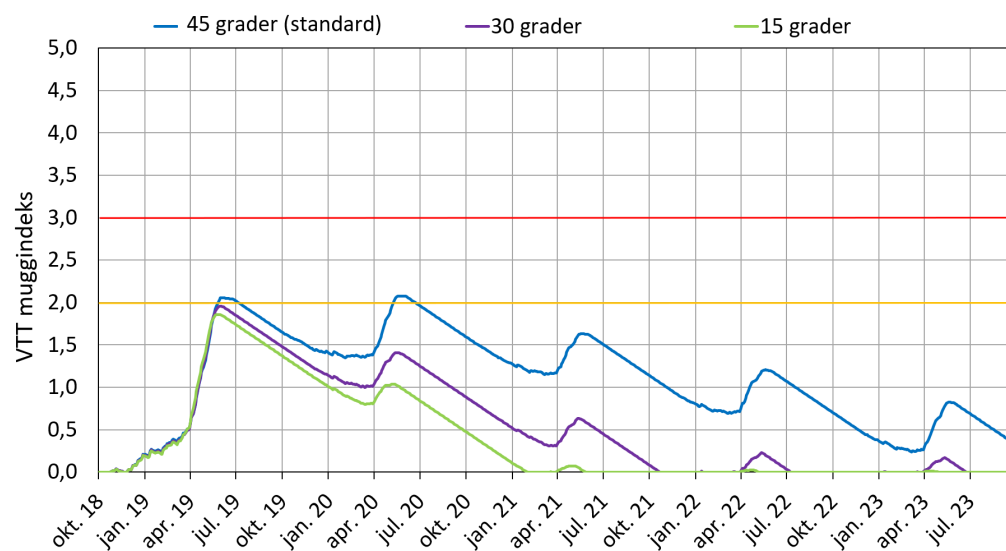
Variasjon av takhelling kan også ha betydning for andre transportmekanismer som ikke er inkludert i WUFI eller beregningsmodellen. Effekten av variert luftskifte i luftespalten, lekkasjevann og fuktkonveksjon vil trolig også ha en betydning på vanninnholdet, uttørkingsevnen og omfordeling av fukt i modellen.



(a) Utvikling av vanninnhold i taket.



(b) Temperatur og relativ fuktighet i det kritiske punktet.



(c) Muggindeks i det kritiske punktet.

Figur 4.5: Resultater ved variasjon av takhelling (mot nord).

4.6 Absorptans for solstråling

Effekten av takets evne til å absorbere kortbølget stråling fra solen er undersøkt med tre forskjellige verdier av absorptans for solstråling. Absorptansen er hovedsakelig en parameter av taksteinens farge, hvor beregningsmodellen med absorptans for solstråling på 0; 0,6; 0,7 og 0,8 (standard) er simulert. Absorptans på 0 er en teoretisk verdi, mens 0,6-0,8 representerer absorptanser i området rød og grå takstein. For sammenligning har gul takstein absorptans 0,5-0,7, rød teglstein har absorptans 0,65-0,8, og betong har absorptans cirka 0,7.

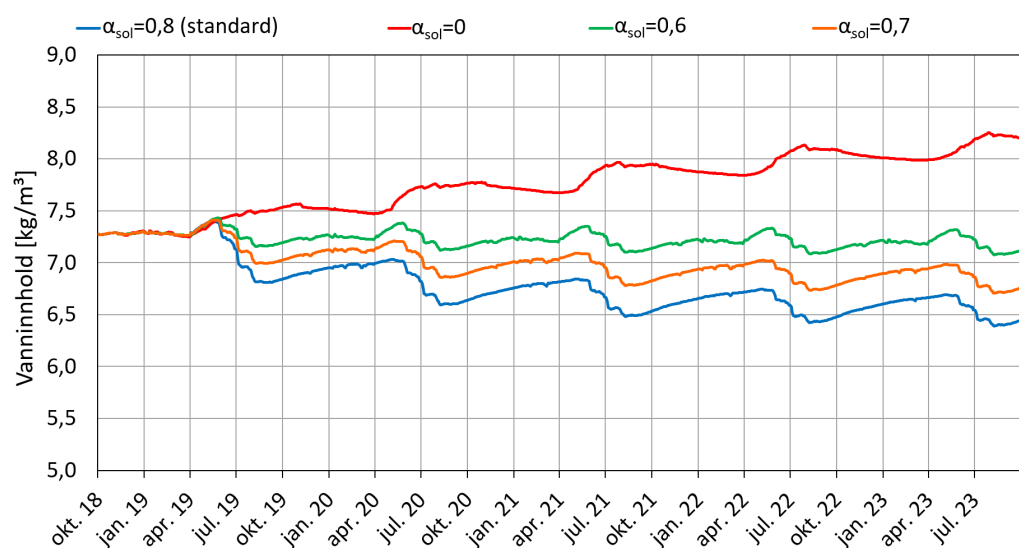
Figur 4.6a viser at de fire forskjellige absorptansene for solstråling fører til en betydelig forskjell i uttørkingsevne. Med høyere absorpsjonstall har taket bedre uttørkingsevne, og stabiliserer seg i likevekt med lavere vanninnhold. Uten absorpsjon av kortbølget stråling stiger vanninnholdet i modellen gjennom alle fem årene. Ved absorptans på 0,6, tørker taket omtrent ikke i det hele tatt. Og ved absorptans på 0,7, tørker taket ut litt mer enn halvparten så mye fukt som ved absorptans på 0,8 gjør.

Standardmodellen sin absorptans for solstråling på 0,8 er den minst konservative verdien som er beregnet. Temperaturen i de to andre parametervariasjonene er lavere ved undertaket om sommeren, og har følgelig høy RF gjennom de fem årene som er beregnet.

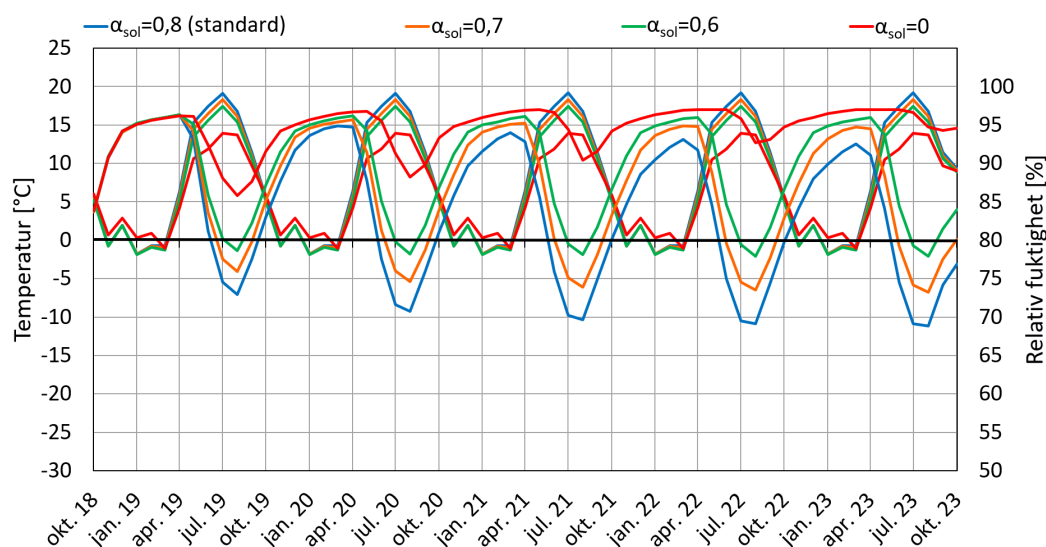
Muggindeksen for tak med absorptans på 0 og 0,6 stiger gjennom hele beregningsperioden. Stigningen avtar mot slutten, og muggindeksen er over 3, det vil si rødt lys og uakseptable mengder muggsopp. For tak med absorptans på 0,7 er muggindeksen jevnt over 2, og er synkende mot slutten av beregningen. Muggindeksen har derfor gult lys i VTT-muggmodellen, og konstruksjonen må vurderes ytterligere om den kan godkjennes.

Resultatene viser at skygge og taktekking med lyse farger har svært lav uttørkingsevne og høy muggrisiko. Ettersom skrå tak kan ha takstein i mange farger, også lyse, er dette en parameter som har stor påvirkning på uttørkingsevnen og gjør konstruksjonen sårbar.

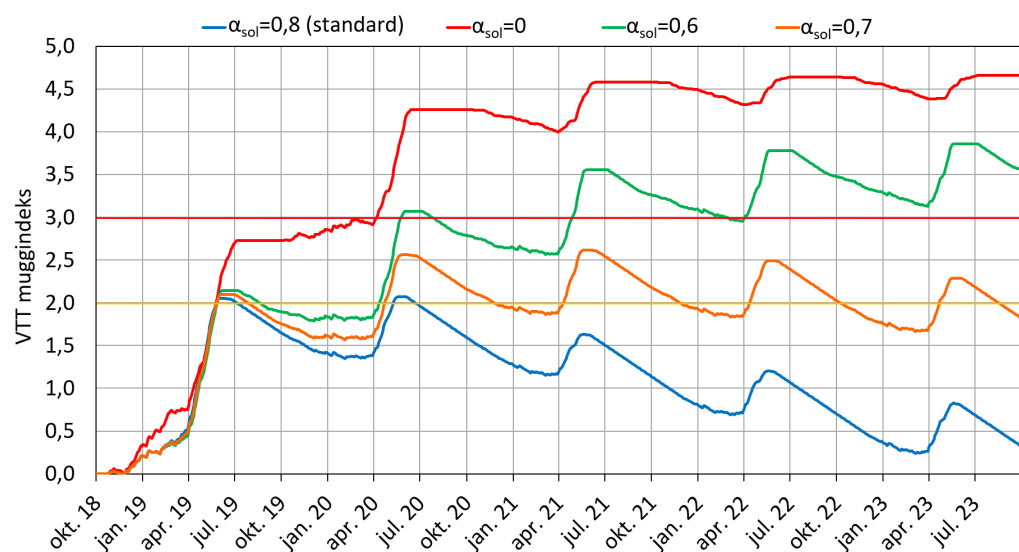
Resultatene viser også at det nordvendte taket i standardmodellen har et betydelig varmebidrag fra kortbølget stråling, og at taket har behov for varmebidraget for å tørke.



(a) Utvikling av vanninnhold i taket.



(b) Månedsverdier for temperatur og relativ fuktighet i det kritiske punktet.



(c) Muggindeks i det kritiske punktet.

Figur 4.6: Resultater ved variasjon av absorptans for solstråling

4.7 Uteklima (Sted)

Konstruksjonen er beregnet med ni forskjellige steder med tilhørende klima i Norge. Beregningene er gjort for å undersøke hvordan konstruksjonen er tilpasset det brede spekteret av klima som finnes i Norge. Stedene er også beregnet med andre dampspærre-produkter, se Underkapittel 4.10. Figur 4.7a viser at beregningene med klima i Bergen, Tromsø, Trondheim, Værnes, Karasjok, Kristiansand og Mo i Rana tørker mellom 9,0 og 17,2% i løpet av de fem årene. Osloklima gir en spesielt god uttørkingsevne med total uttørking på 25,8% i løpet av fem år, og Kristiansund tørker ikke i det hele tatt. Alle kurvene er relativt nær likevekt av vanninnhold etter fem år.

For Osloklima er temperaturene i det kritiske punktet høyest om sommeren, sammenlignet med beregningene av de andre stedene. Det tyder på at Oslo har høyere kortbølget strålingsintensitet og/eller utetemperaturer på sommeren enn de andre stedene. Figur 4.8 viser gjennomsnittlig globalstråling for alle MDRY-klimafilene som er brukt i beregningene. Figuren viser at Oslo har høyest strålingsintensitet i månedene mai og juli. Det kan tyde på klarvær om sommeren i MDRY-klimafilene. I forhold til andre steder er også vanninnholdet fra uteluften lavt om vinteren og høyt om sommeren i Oslo, som vist Figur 4.9. Det gjør at den smarte dampspærren blir mer damp tett på vinteren og mer dampåpen på sommeren. Den høye uttørkingen av taket i Osloklima gjør at RF synker til et gunstig nivå som vist i Figur 4.7c.

Kristiansund har uforandret fuktinnhold gjennom fem år, noe som gir høy RF i det kritiske punktet hvert år, som vist i Figur 4.7c. Tromsø har høyere RF, selv med lavere fuktinnhold, da RF stiger med det kalde Trømsøklimaet. For Kristiansund har derimot høyest risiko for muggsopp da temperaturene i det kritiske punktet er høyere, dette kan man også se i VTT-muggmodellen i Figur 4.7d. Kristiansund er eneste beregning av de ulike stedene som har muggindeks over 3. En forklaring på den dårlige uttørkingsevnen kan være strålingsintensiteten og luftfuktigheten i Kristiansund. I Figur 4.8 har Kristiansund lavest strålingsintensitet av alle stedene på sommeren. Uteluften har også høyt fuktinnhold gjennom året, som vist i Figur 4.9. Det gir høyere RF i inneluften og fører til en mer dampåpen dampspærre om vinteren.

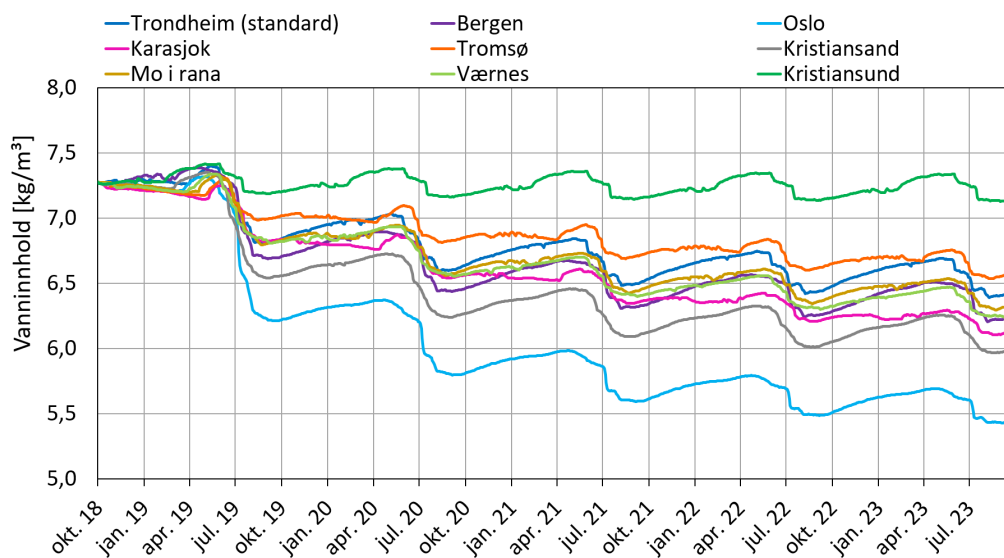
Beregninger av takkonstruksjoner med Kristiansundklima har også vist seg ugunstig i tidligere forskning. Det gjelder både tak med smart dampspærre og tradisjonell oppbygging med kaldt loft. I masteroppgaven til Ellinor B. Sletfjerding viser resultatene av fuktberegninger at tak med smart dampspærre i Kristiansund får dårlig uttørkingsevne i forhold til andre steder [33]. Og i prosjektrapporten *Høyisolerte konstruksjoner og fukt* av Stig Geving og Jonas Holme [9] viste resultatene av fuktberegninger av skrå tak med kaldt loft (og tradisjonell oppbygging) med Kristiansundklima, at det var risiko for muggvekst ved undertaket hele året.

Det er en forskjell i kurvenes uttørkingsmønster ved sammenligning av beregninger med steder nord for Trondheim og fra Trondheim og sørover. Stedene i nord tørker mindre ut på sommeren, men akkumulerer også mindre fukt utenfor uttørkingsperioden. Selv om kurvene har forskjellig uttørkingsmønster i sør og nord, tørker konstruksjonene med relativt lik hastighet. For eksempel tørker konstruksjonen i Karasjok i samme hastighet som konstruksjonen i Kristiansand dersom man ser på total uttørking på fem år.

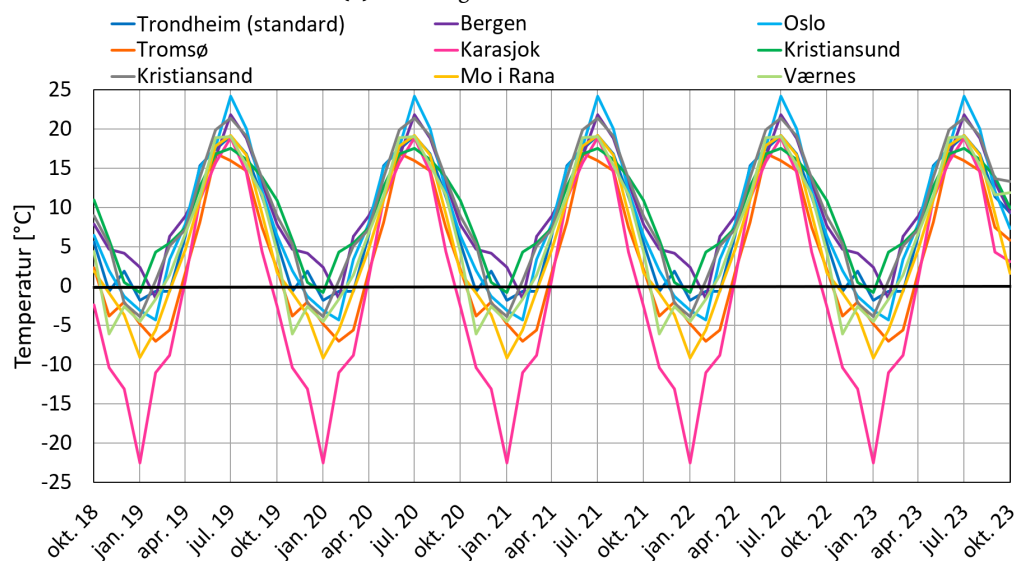
En mulig forklaring på den gode uttørkingsevnen over tid kan være at fuktkomponenten fra uteluften i inneluften, v_e , er lavere i Nord-Norge enn i Sør-Norge, og at den har en betydning

for RF ved den smarte dampspærren. Figur 4.9 viser det lave fuktinnholdet i uteluften fra MDRY-klimafilene.

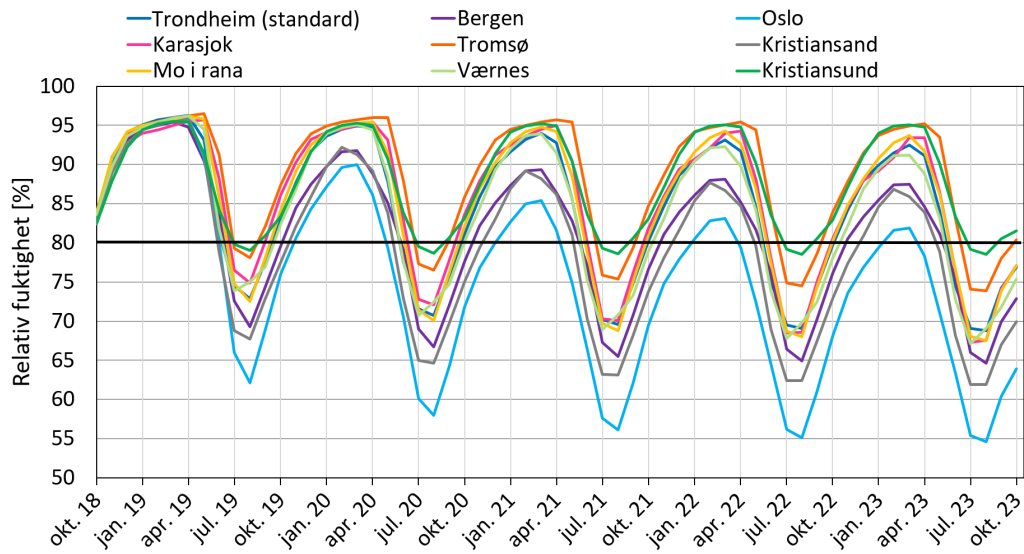
I Figur 4.7b kan man også se at Karasjok, Tromsø og Mo i Rana har de laveste temperaturene i det kritiske punktet gjennom året, og at Karasjok har spesielt kalde temperaturer på vinteren. Lave temperaturer i det kritiske punktet, spesielt under null grader, er gunstig for å begrense eller unngå muggvekst.



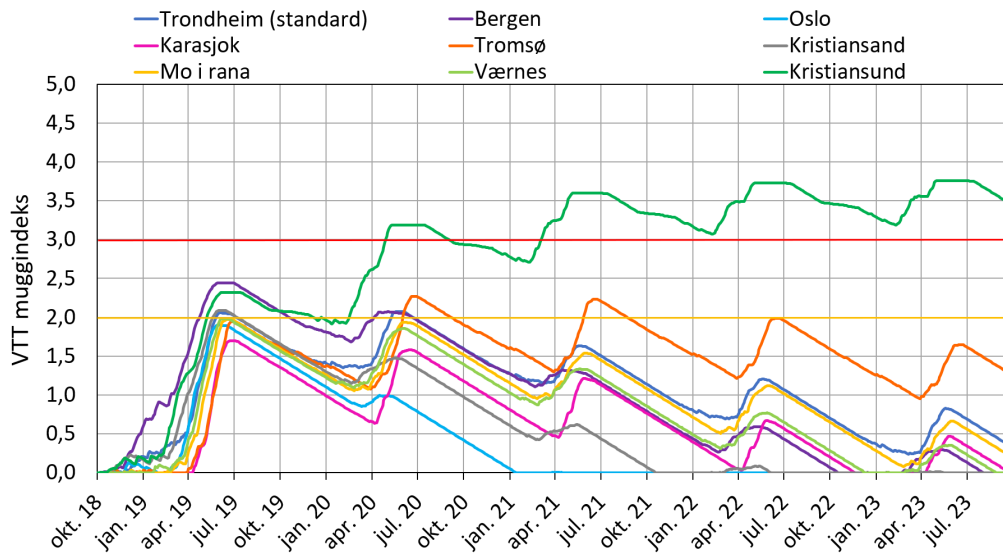
(a) Utvikling av vanninnhold i taket.



(b) Månedsverdier for temperatur i det kritiske punktet.

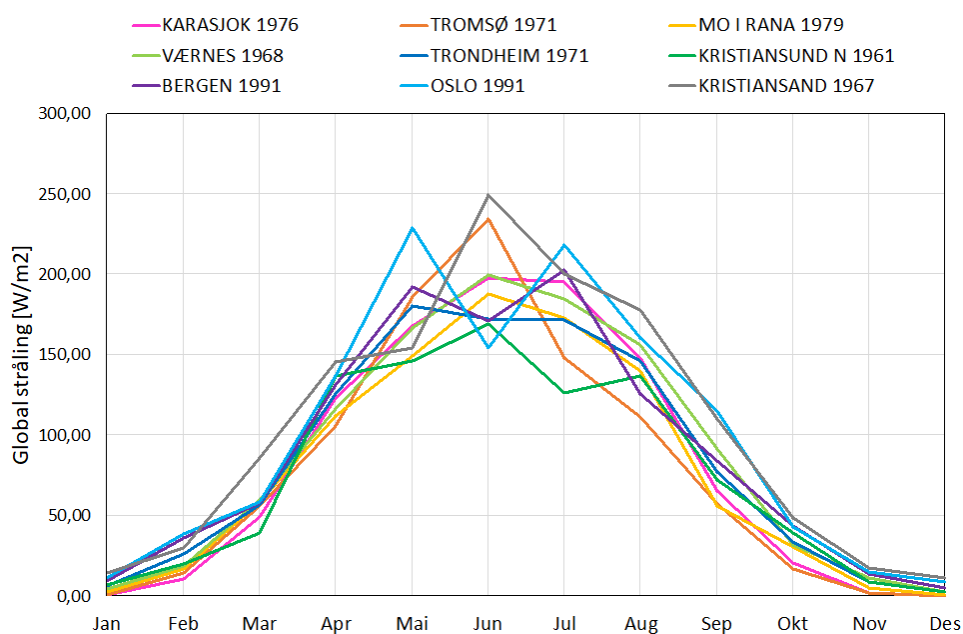


(c) Månedsverdier for relativ fuktighet i det kritiske punktet.

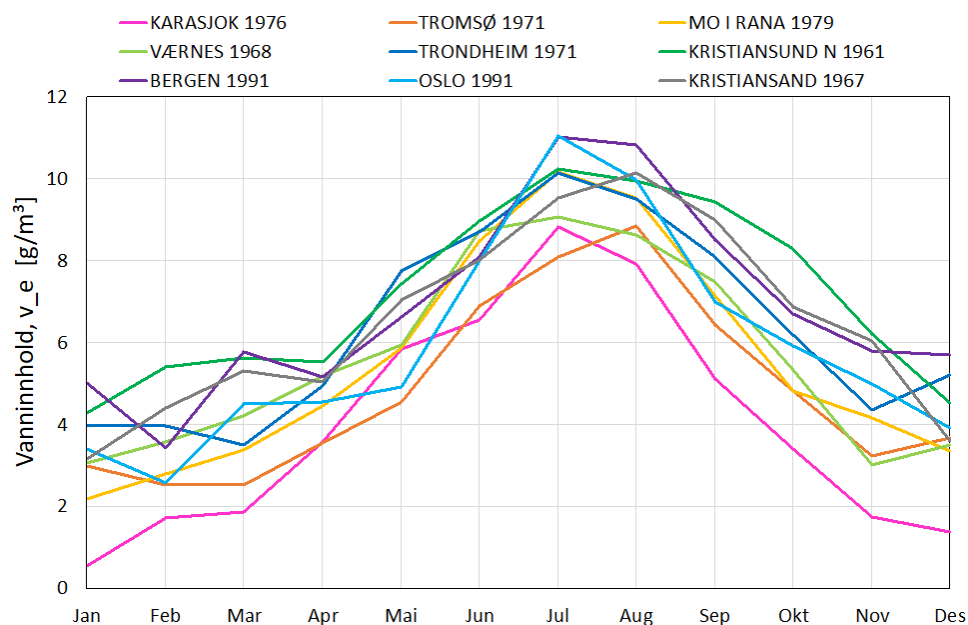


(d) Muggindeks i det kritiske punktet.

Figur 4.7: Resultater ved variasjon av uteklima/sted.



Figur 4.8: Globalstråling i referanseår for fuktbergingene, månedsgjennomsnitt av døgnverdier [34].



Figur 4.9: Vanninnhold i uteluften i referanseår for fuktbergingene. Omregnet fra månedsgjennomsnitt av relativ fuktighet og temperatur i MDRY-klimafilene [12].

4.8 Fukttilskudd

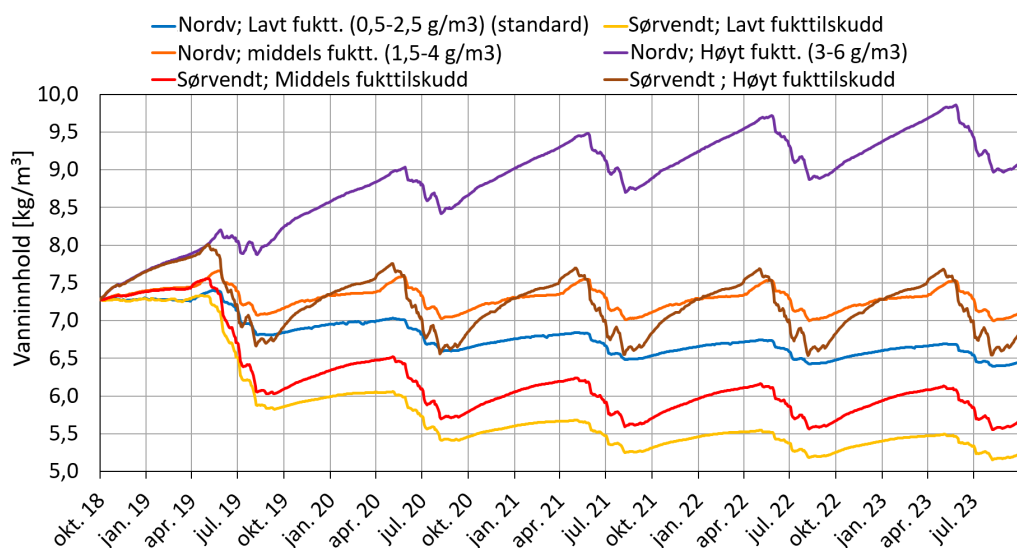
Resultatene av beregningene med de tre dimensjonerende fukttilskuddene lavt, middels og høyt fukttilskudd, blir presentert og diskutert for både nordvendte og sørvendte tak. Hensikten er å undersøke hvordan konstruksjonen blir påvirket ved forskjellig fukttilskudd, og om konstruksjonen kan brukes med dårligere ventilasjon og/eller rom med høyere fuktproduksjon, for eksempel bad eller vaskerom. Utgangspunktet i standardmodellen er lavt fukttilskudd, med et forbehold om at småhuset også har oppgradert til balansert ventilasjon. De to andre smart dampspærre-produktene, Majrex og Intello, er også beregnet med høyere fukttilskudd i Underkapittel 4.10.

Figur 4.10a viser at vanninnholdet i nordvendte tak med middels fukttilskudd, stabiliserer seg ved likevekt etter svært liten uttørking. Ved beregning av høyt fukttilskudd i nordvendte tak akkumulerer vanninnholdet i hele beregningsperioden, og vanninnholdet stabiliserer seg ikke ved likevekt. Beregningene med middels og høyt fukttilskudd får dermed høy RF og høy risiko for muggvekst. Begge beregningene gir også muggindeks på over 3, som vist i Figur 4.10c. Det vil si uakseptabel muggvekst.

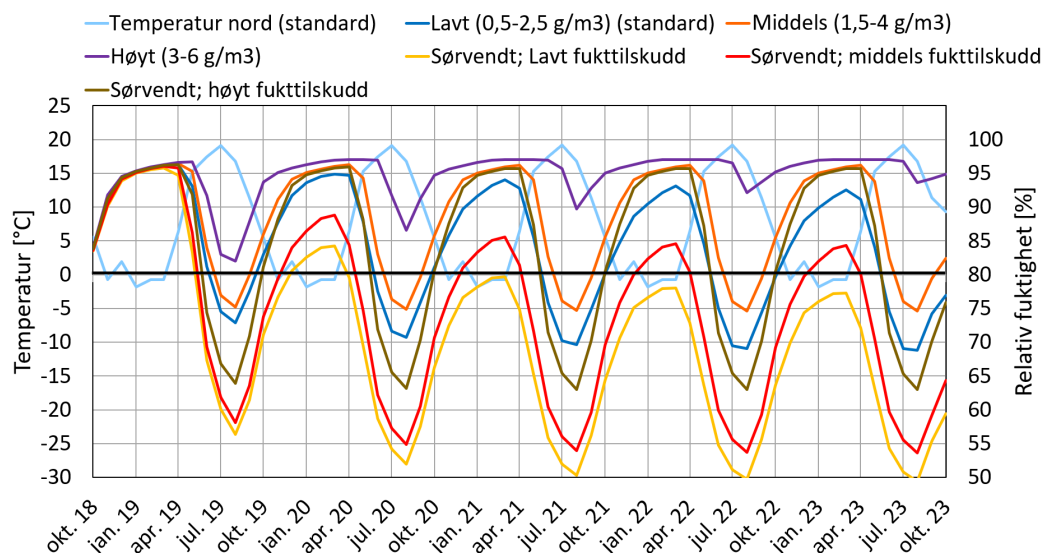
I sørvendte tak ser man derimot at uttørkingsevnen er større. Middels fukttilskudd stabiliserer seg med vanninnhold lavere enn nordvendte tak med lavt fukttilskudd. Med høyt fukttilskudd tørker sørvendte tak også mer enn nordvendte tak med middels fukttilskudd. Det viser at soloppvarmingen av sørvendte tak har en stor effekt for å tørke ut akkumulert fukt fra vinteren. Muggindeksen for lavt og middels fukttilskudd er lav for sørvendte tak, mens muggindeksen for høyt fukttilskudd i sørvendte tak er over 3, og er dermed uakseptabel.

Fukttilskuddet er lavt ved høy utetemperatur, og høyt ved lav utetemperatur for alle tre nivåene av fukttilskudd, som vist i Figur 3.5. Det vil si at fuktinnholdet i inneluften fra fukttilskudd øker mest på vinteren, og øker i mindre grad på sommeren. Det fører til at årsvariasjonen av RF blir jevnet ut, i tillegg til at den blir generelt høyere. Fukttilskuddet gir dermed størst ugunstige effekter, ved at dampmotstanden i den smarte dampspærren blir lavere på vinteren, og gir en liten gunstig effekt for uttørkingsevnen på sommeren ved at dampmotstanden blir lavere. Dette ser man også på den sesongbaserte uttørkingen og oppfuktingen av konstruksjonen, uavhengig av orientering. Ved høyere fukttilskudd øker både oppfuktingen og uttørkingen, med størst effekt for oppfukting.

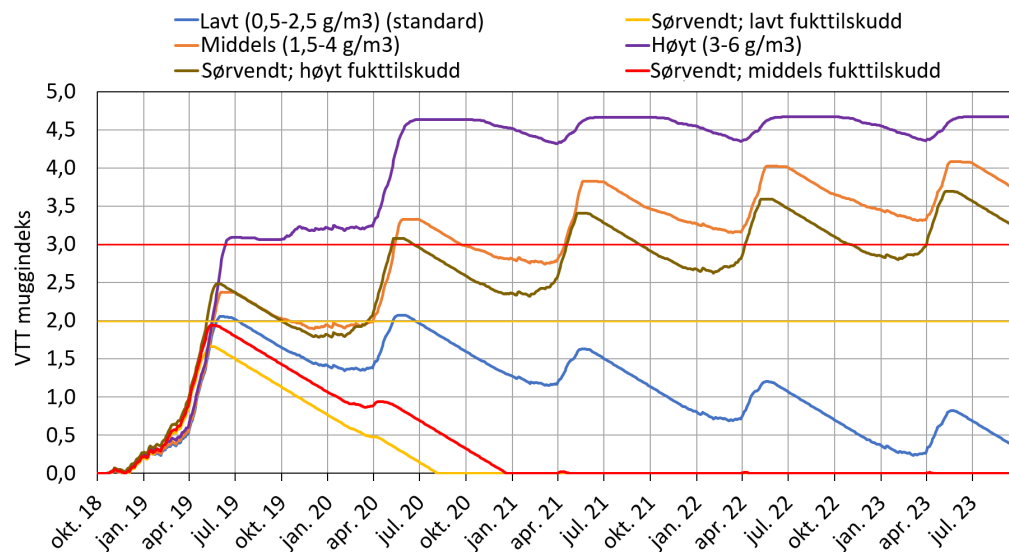
Beregningene av forskjellig fukttilskudd viser hvor sårbar konstruksjonen er for fukt i inneluften. Dersom man skal plassere rom med høyere fukttilskudd under det etterisolerte taket, bør derfor bli plassert under den sørvendte takflaten.



(a) Utvikling av vanninnhold i taket.



(b) Månedsverdier for temperatur og relativ fuktighet i det kritiske punktet.



(c) Muggindeks i det kritiske punktet.

Figur 4.10: Resultater ved variasjon av fukttilskudd i nord- og sørvendte tak.

4.9 Gjennomsnittlig innetemperatur

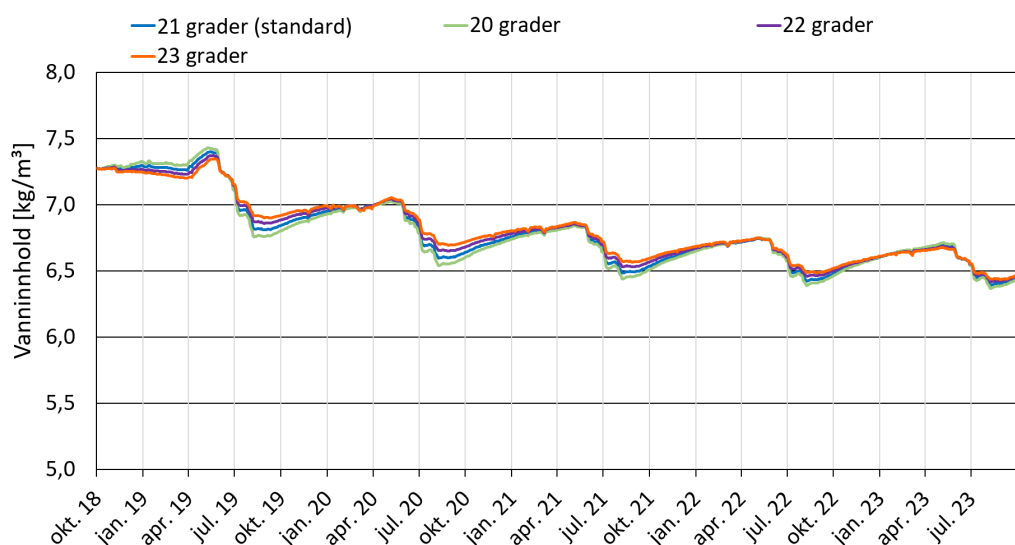
Variasjoner av gjennomsnittlig innetemperatur er beregnet for å undersøke hvordan inneklimateknologi påvirker uttørkingsevnen til taket. Den gjennomsnittlige innetemperaturen i standardmodellen er 21 °C, og er sammenlignet med tre andre innetemperaturer: 20 °C, 22 °C og 23 °C.

Figur 4.11a viser at vanninnholdet i taket utvikler seg forskjellig med de fire temperaturene. Ved lavere innetemperatur stiger vanninnholdet i noe det første halvåret før uttørkingen begynner. Tendensen med høyere fuktakkumulasjon ved lav innetemperatur opptrer i hvert år utenfor tørkeperioden. Når taket tørker på sommeren, synker derimot vanninnholdet raskere i beregningstilfellene med lav innetemperatur. Beregningene med lav innetemperatur har derfor lavere vanninnhold store deler av året.

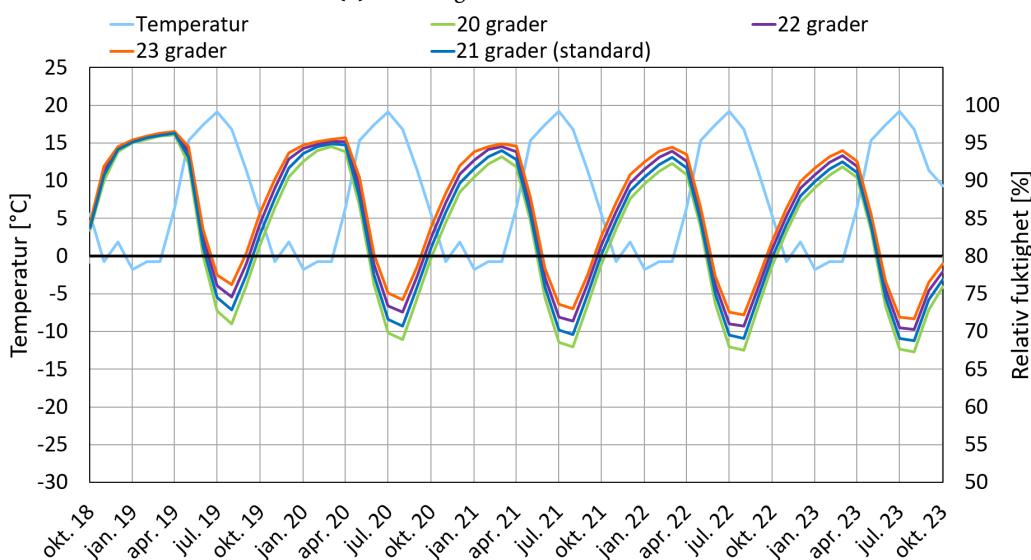
I Figur 4.11b ser man at RF i det kritiske punktet er jevnt høyere for høye innetemperaturer. RF i det kritiske punktet er direkte overførbart til vanninnhold i det kritiske punktet ettersom temperaturen er den samme i det kritiske punktet for alle fire beregningene. Risikoen for mugg vil også dermed være størst for beregningene med høyest RF. Dette ser man i VTT-muggmodellen i Figur 4.11c, hvor muggindeksen er betydelig større for beregninger med høy innetemperatur.

Årsaken til den forskjellige utviklingen av vanninnhold for de fire innetemperaturene, kan knyttes at inneluften får lavere RF ved høyere innetemperaturer. Dette er vist fra beregningene ved at den smarte dampspærren er monitorert for RF i Figur 4.12. s_d -profilen for den smarte dampspærren varierer som kjent med RF, og uttørkingsevnen endrer seg deretter. Den smarte dampspærren har lav dampmotstand om sommeren, men vil få høyere dampmotstand ved lavere RF. Derfor blir lave innetemperaturer gjennom året mer gunstig på sommeren, men mindre gunstig på vinteren.

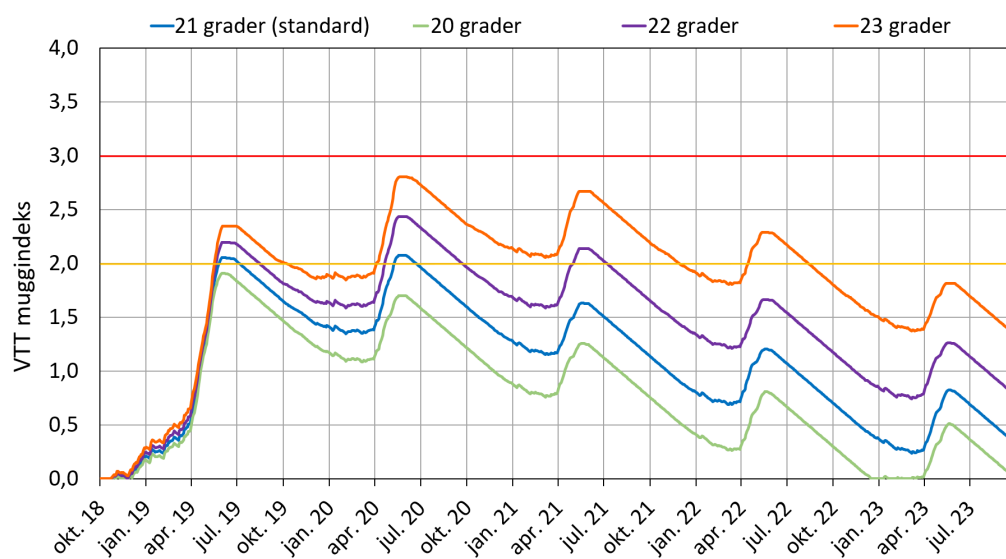
Om WUFI fordeler den gjennomsnittlige innetemperaturen likt som en representativ bolig, er derimot ikke undersøkt.



(a) Utvikling av vanninnhold i taket.

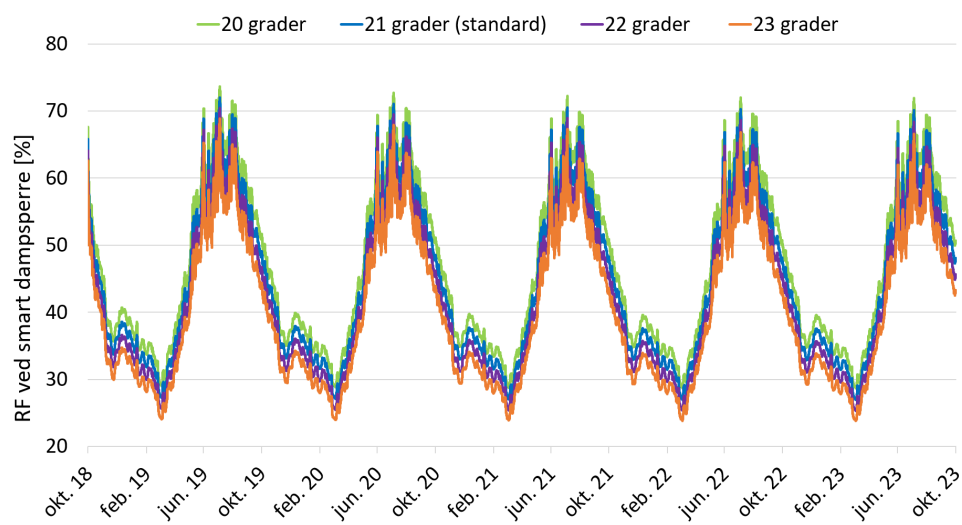


(b) Månedsverdi av temperatur og relativ fuktighet i det kritiske punktet.



(c) Muggindeks i det kritiske punktet.

Figur 4.11: Resultater ved variasjon av innetemperatur.



Figur 4.12: RF ved den smarte dampsperrer ved forskjellige innnetemperaturer.

4.10 Smart dampsperre-produkter

Det er gjort beregninger med tre forskjellige smart dampsperre-produkter: DuPont AirGuard Smart, Siga Majrex og Pro Clima Intello. Hensikten med beregningene er å sammenligne og undersøke produktene sine styrker og svakheter ved forskjellig forhold. Produktene blir sammenlignet med standard inngangsverdier, med middels fukttilskudd og med forskjellig uteklima.

4.10.1 Lavt og middels fukttilskudd

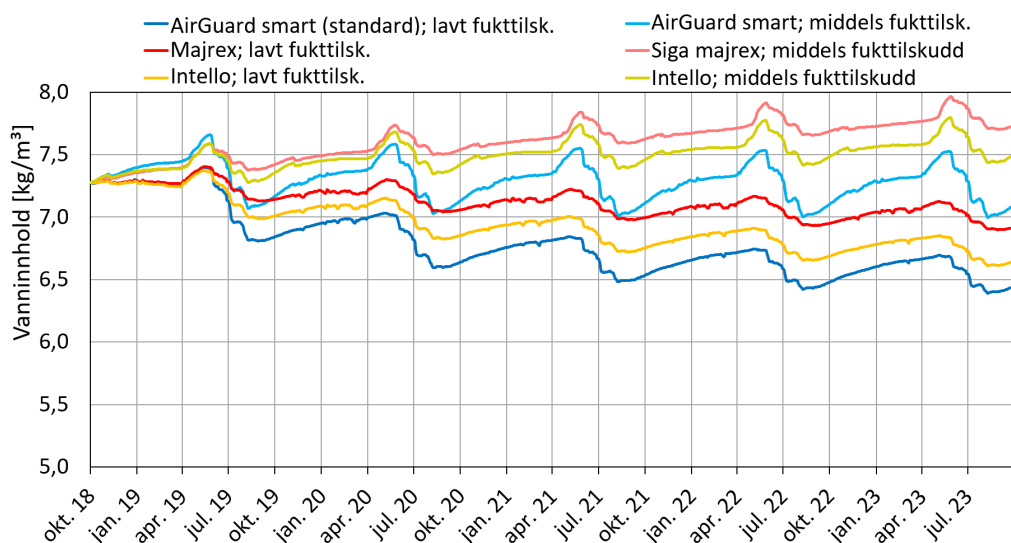
De tre smarte dampsperrene er beregnet med lavt (standard) og middels fukttilskudd.

Som man kan se i Figur 4.13a akkumulerer det noe mer fukt i AirGuard Smart enn de to andre produktene utenfor uttørkingsperiodene, ved både lavt og middels fukttilskudd. AirGuard Smart tørker også mer ut i uttørkingsperioden. Totalt er summen av akkumulasjon og uttørking at AirGuard Smart tørker mest ut, både med lavt og middels fukttilskudd.

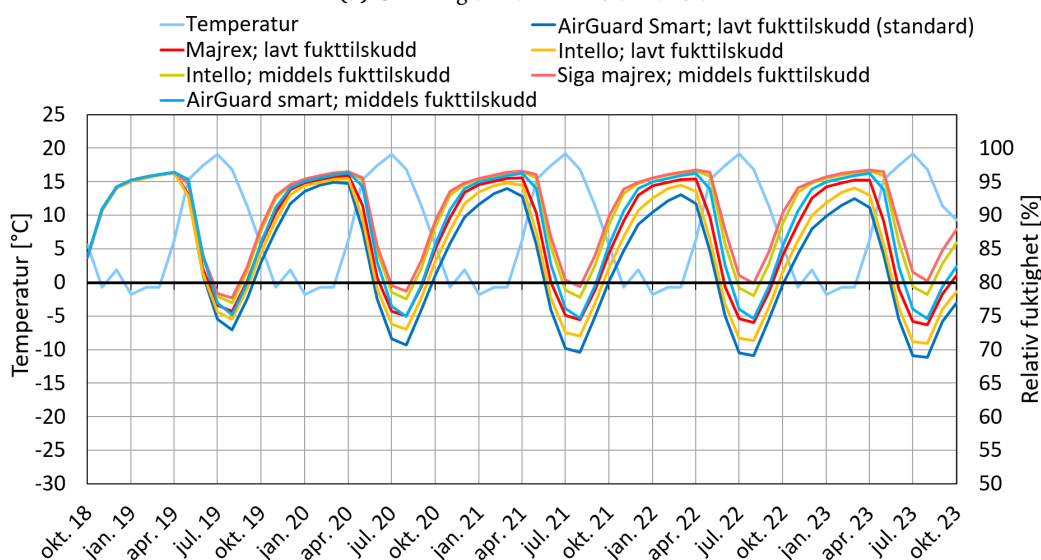
Rangeringen av uttørkingsevne for de tre smart dampsperre-produktene er AirGuard Smart, Intello og Majrex. I det kritiske punktet RF synker med den samme rekkefølgen, som vist i Figur 4.13b, og for følgelig lav risiko for muggvekst. Temperaturene i det kritiske punktet er lik for alle konstruksjonene da kun dampsperran skiller dem.

I VTT-muggmodellen har AirGuard Smart og Intello muggindeks over 2 i to perioder før de tørker og synker mot lavere muggindeks. Majrex med lavt fukttilskudd tørker dårligere og har høyere muggindeks over lengre tid. Ved middels fukttilskudd er ingen smart dampsperre-produkter gunstig, da alle har muggindeks over 3.

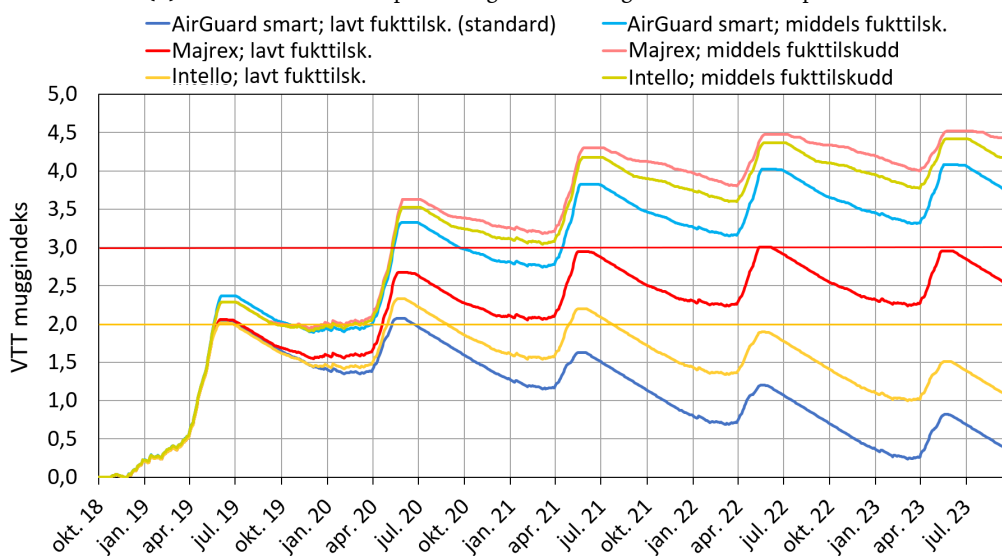
Den eneste forskjellen på de tre beregningene med forskjellige smart dampsperre-produktene er s_d -profilene til dampsperrene. Fra Figur 3.2 ser man at AirGuard Smart skiller seg spesielt fra Intello og Majrex med høyere s_d -verdi ved lav RF, og lavere s_d -verdi ved høy RF. Rundt 50% RF er det mindre forskjeller mellom de tre smarte dampsperrene. At konstruksjonen med Airguard smart tørker mest, passer med s_d -profilen ettersom den er mest dampåpen om sommeren, når RF i inneluften typisk er mellom 50 og 70%.



(a) Utvikling av vanninnhold i taket.



(b) Månedsverdi for temperatur og relativ fuktighet i det kritiske punktet.



(c) Muggindeks i det kritiske punktet.

Figur 4.13: Resultater ved variasjon av smart dampsperre-produkt, med lavt og middels fukttilskudd.

4.10.2 Uteklima

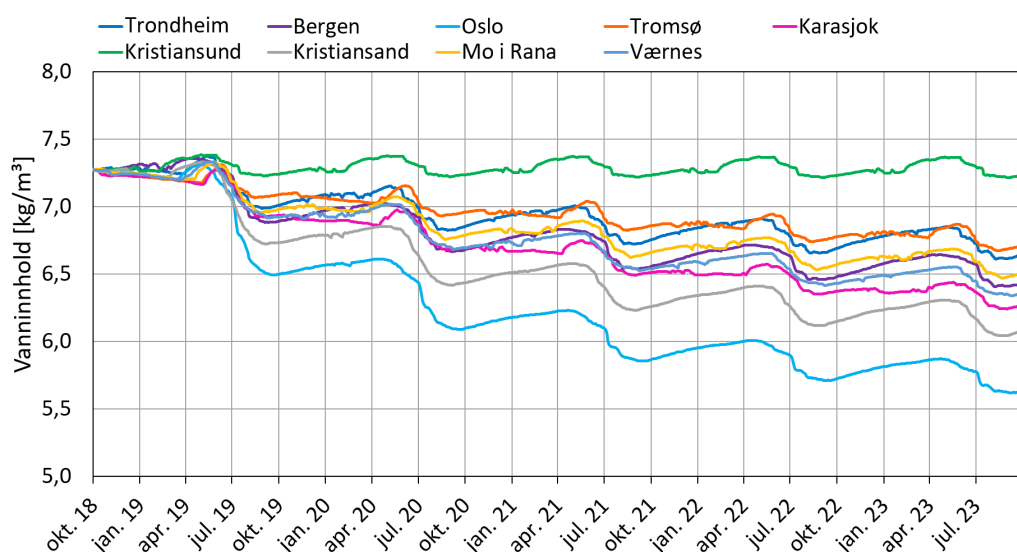
Pro Clima Intello og Siga Majrex er beregnet med de samme ni stedene som AirGuard Smart er beregnet med i Underkapittel 4.7. Resultatene for Intello og Majrex blir her presentert og diskutert ut fra Figur 4.14a til 4.15c, og de blir sammenlignet med resultatene fra AirGuard Smart.

Vanninnholdet i Figur 4.7a, 4.14a og 4.15a utvikler seg forskjellig for de tre smart dampspærre-produktene. Man kan se at den samme rekkefølgen for uttørking i løpet av fem år er den samme som ved beregning av fukttilskudd: AirGuard smart med størst, og Majrex med minst. Den største forskjellen i utviklingen av vanninnhold er hvor mye fukt de smarte dampspærrene slipper gjennom i tørkeperioden. Akkumuleringen av fukt utenfor tørkeperioden er tilnærmet lik for de tre produktene.

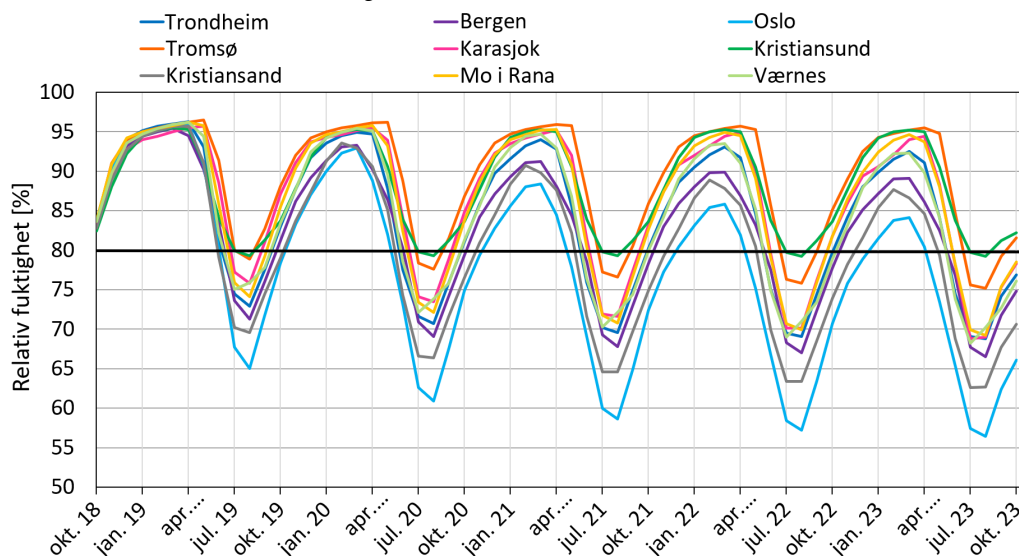
Det er ingen tegn til at noen av de smarte dampspærrene er mer spesialiserte eller tørker bedre i bestemte klima i Norge. AirGuard Smart tørker mest for alle beregningene med likt sted og fukttilskudd. RF i det kritiske punktet synker derfor samtidig som konstruksjonen tørker, hvor beregningen med AirGuard Smart har de mest gunstige fuktforholdene av de tre smarte dampspærrene.

Som man kan se i Figur 4.14c, er muggindeksen til beregningene med Intello høyere for alle klima, sammenlignet med bruk av AirGuard Smart, og flere kurver beveger seg inn i området med gult lys. De fleste muggindeksene synker etter andre året i beregningene, og muggindeksen etter fem år er akseptabel isolert sett. Den største forskjellen på AirGuard Smart og Intello, er at Intello ikke har rask nok uttørking. Det fører til at de første årene er mer kritisk for muggvekst. Dersom man bruker Intello er det dermed mer viktig å unngå byggfukt og ha parametere med verdier som gir taket god uttørkingsevne.

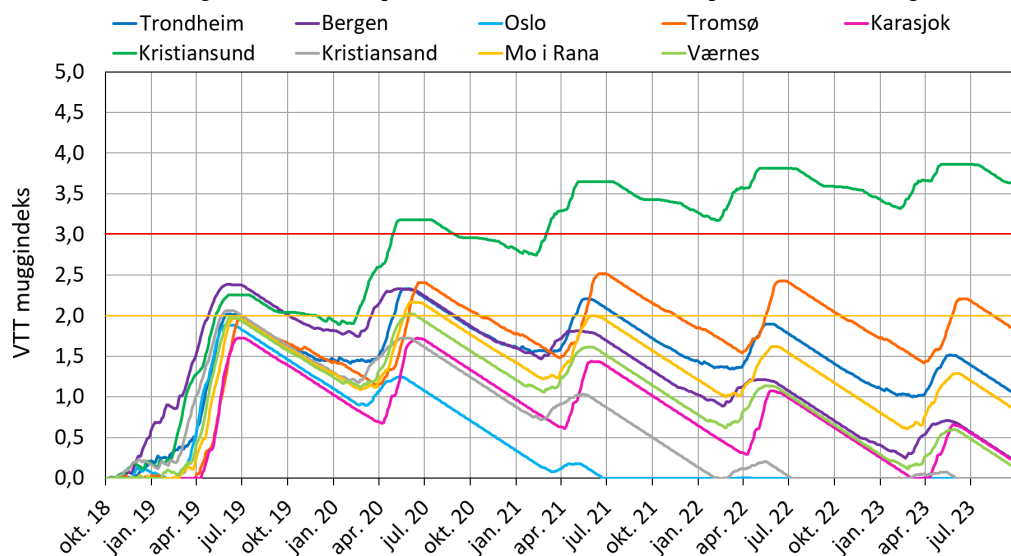
Ved bruk av Majrex får kun et fåtall av beregningene grønt lys i muggmodellen. Oslo og Karasjok er de eneste beregningene med grønt lys, og flere kurver har stigende muggindeks etter det femte året med beregninger. Majrex er derfor den minst gunstige smarte dampspærren.



(a) Utvikling av vanninnhold i taket ved bruk av Intello.

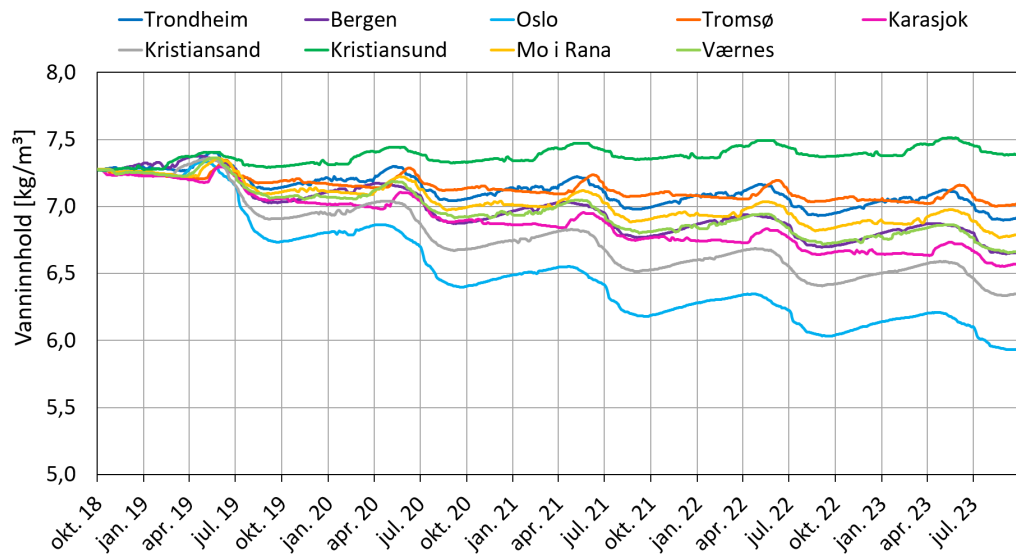


(b) Relativ fuktighet i det kritiske punktet ved bruk av Intello. Temperaturer er vist i Figur 4.7b.

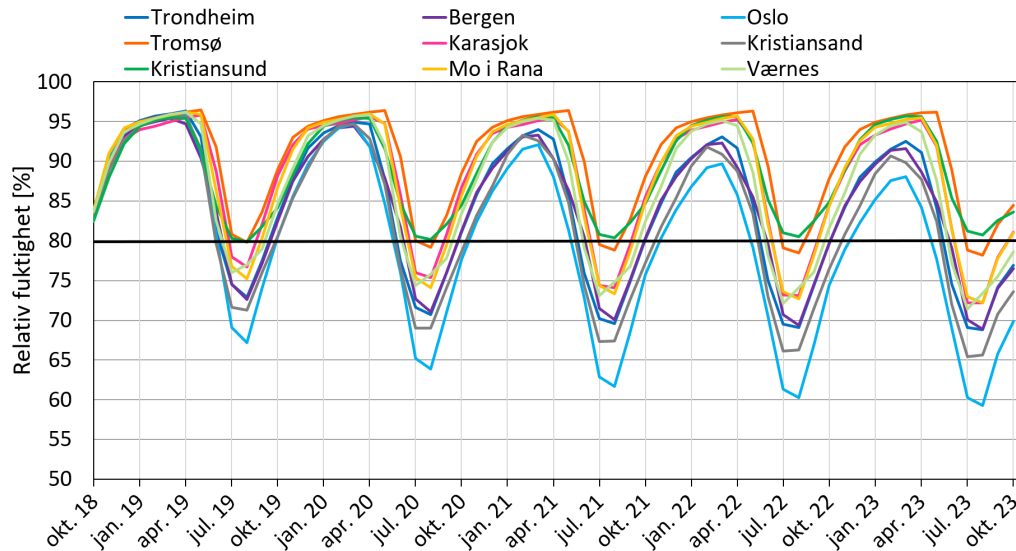


(c) Muggindeks i det kritiske punktet ved bruk av Intello.

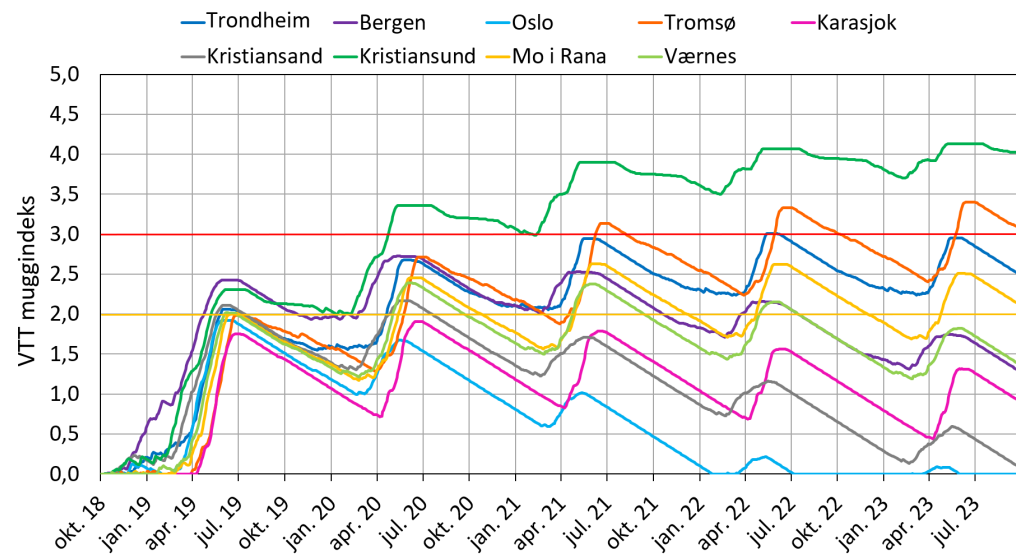
Figur 4.14: Resultater for beregninger med Intello og ulike steder.



(a) Utvikling av vanninnhold i taket ved bruk av Majrex.



(b) Månedsverdi for relativ fuktighet ved bruk av Majrex. Temperaturer er vist i Figur 4.7b.



(c) Muggindeks i det kritiske punktet for ved bruk av Majrex.

Figur 4.15: Resultaterfor beregninger med Majrex og ulike steder.

4.11 Referansekonstruksjon: Dampåpent undertak

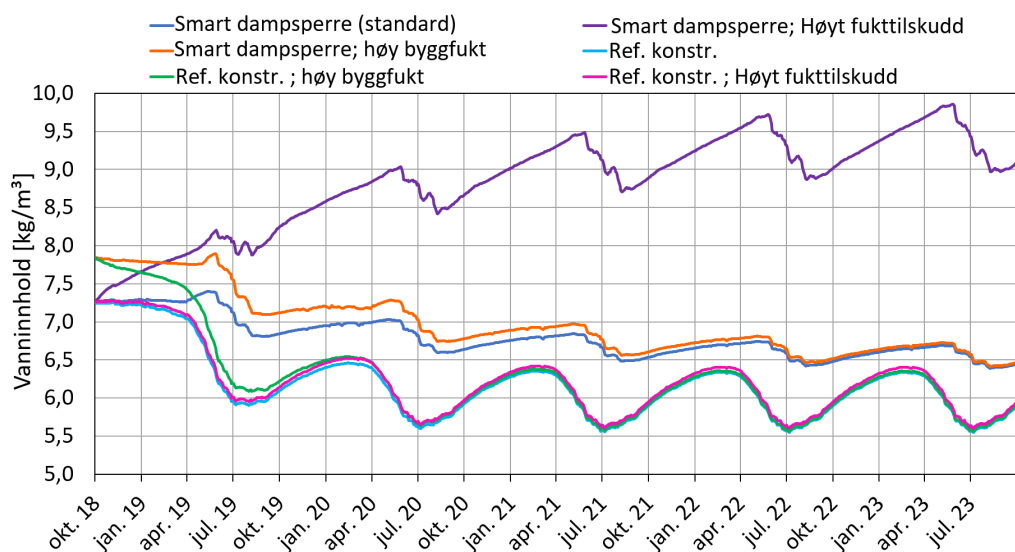
For sammenligning er en godkjent og velutprøvd løsning beregnet som referansekonstruksjon. Løsningen har tradisjonell dampspærre, og kombinert undertak og vindspærre. Resultatene i Figur 4.16a-4.16c viser beregninger for middels (standard) og høyt startfuktnivå, og lavt (standard) og høyt fukttilskudd. Resultater fra både for standardkonstruksjon og referansekonstruksjonen er vist for sammenligning.

I Figur 4.16a kan man se at referansekonstruksjonen tørker ut byggfukt fortere, og har lavere vanninnhold ved likevekt enn standardmodellen. Uttørkingen starter også tidligere for referansekonstruksjonen i forhold til konstruksjonen med smart dampspærre og dampnett undertak, hvor uttørkingen kun foregår på sommeren.

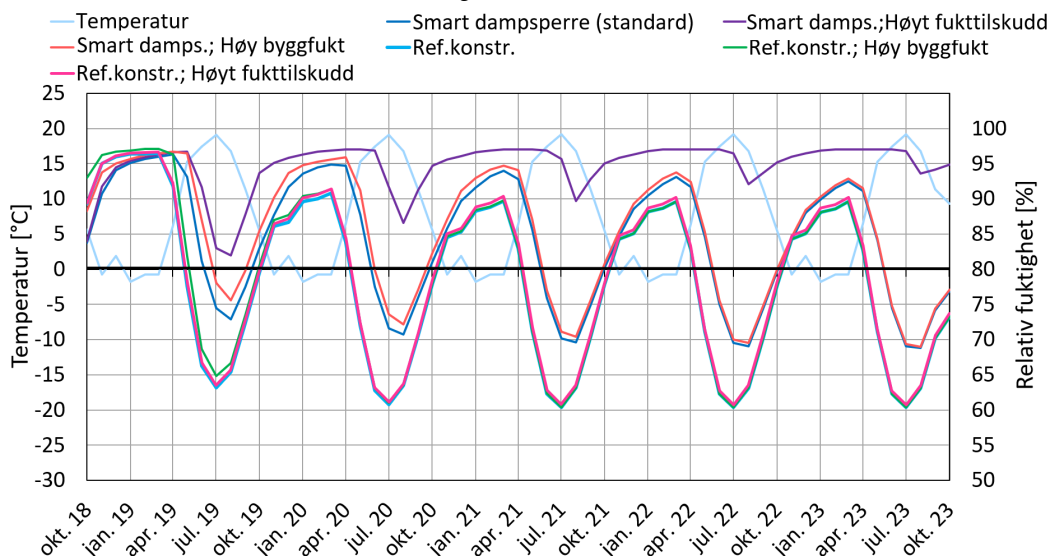
Vanninnholdet i referansekonstruksjonen stabiliserer seg ved likevekt etter 1,5 år, uavhengig av fukttilskudd- og startfuktnivå. Da har vanninnholdet i taket sunket med 22%. Til sammenligning stabiliserer standardmodellen seg ved likevekt etter cirka fire år, ved 12,8 % lavere vanninnhold. Dette viser hvor robust referansekonstruksjonen er mot høyt fukttilskudd og overskuddsfukt i forhold til takkonstruksjonen med smart dampspærre.

Når man ser på årsvariasjonen av RF i det kritiske punktet til referansekonstruksjonen i Figur 4.16b, ser man at RF synker raskere før sommeren enn konstruksjonen med smart dampspærre. Det fører til at RF blir lav før temperaturen blir høy, og risiko for muggvekst blir lavere.

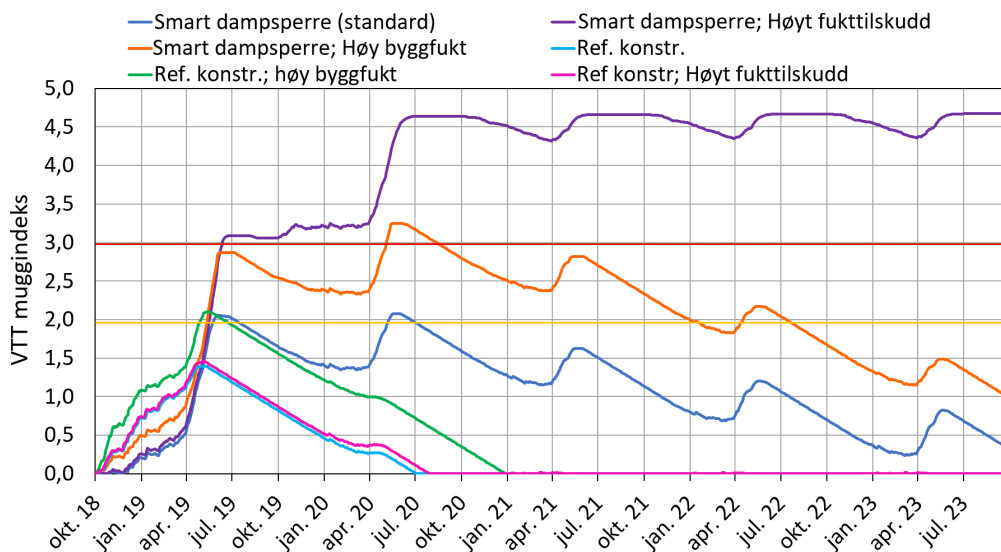
Resultatene viser at referansekonstruksjonen takler høyere overskuddsfukt og fukttilskudd enn standardmodellen. Referansekonstruksjonen er heller ikke avhengig av soltilskudd da den ikke tørker mot innsiden. Beregningene mot sør tørker derimot mer ut enn referansekonstruksjonen, men dette ved nivåer hvor det ikke er risiko for muggvekst.



(a) Utvikling av vanninnhold i taket.



(b) Månedsverdier for temperatur og relativ fuktighet i kritiske punkt.

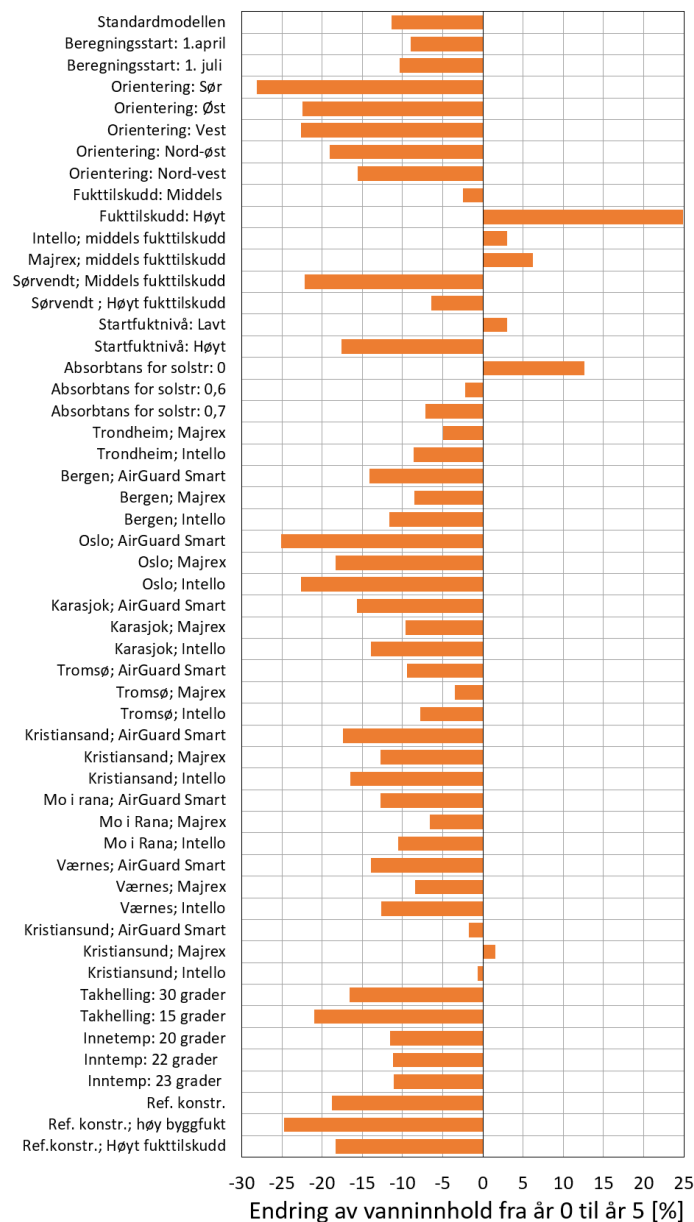


(c) Muggindeks i kritiske punkt.

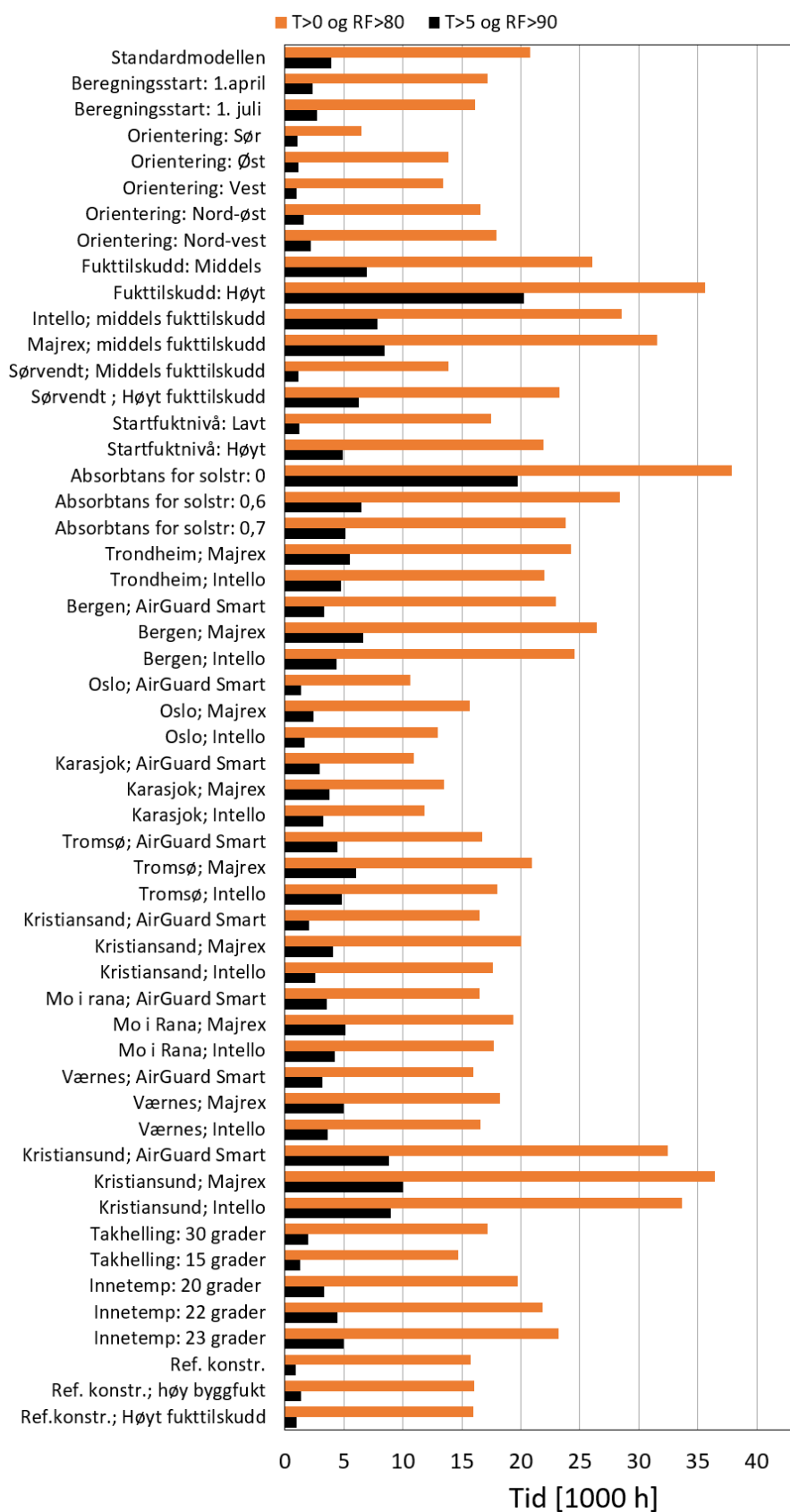
Figur 4.16: Resultater ved beregning av referansekonstruksjon og standardmodell, med høyt fukttilskudd og byggfukt.

4.12 Sammendrag av resultater

For å gi et overblikk og sammenligne effektene som de forskjellige parameterne og parametervariasjonene har på konstruksjonen, er noen enkle mål for uttørkingsevne og risiko for muggvekst satt opp i Figur 4.17 og 4.18 for alle parametervariasjoner. Figur 4.17 viser hvordan vanninnholdet endrer seg fra beregningsstart til beregningslutt med de gitte inngangsverdiene. I Figur 4.18 er to kriterier for muggvekst satt opp, hvor antall timer med to forskjellige kombinasjoner av RF og temperatur er talt. Det ene kriteriet er temperatur over 0 °C og RF over 80% samtidig, og det andre er temperatur over 5 °C og RF over 90% samtidig.



Figur 4.17: Endring av vanninnhold i taket fra beregningsstart (01.10.18) til beregningslutt (01.10.23).



Figur 4.18: Timer av beregningene (totalt 5 år = 43 800 timer) med fuktkriterier for muggsopp i det kritiske punktet.

4.13 VTT variasjoner

Variasjoner av inngangsparametere i VTT-muggmodellen er gjort for å undersøke usikkerheten og spennet av mulige muggindeks-kurver. Det er gjort fire ekstra variasjoner av standardmodellen, med inngangsparametere som vist i Tabell 3.5. Resultatene er vist i Figur 4.19.

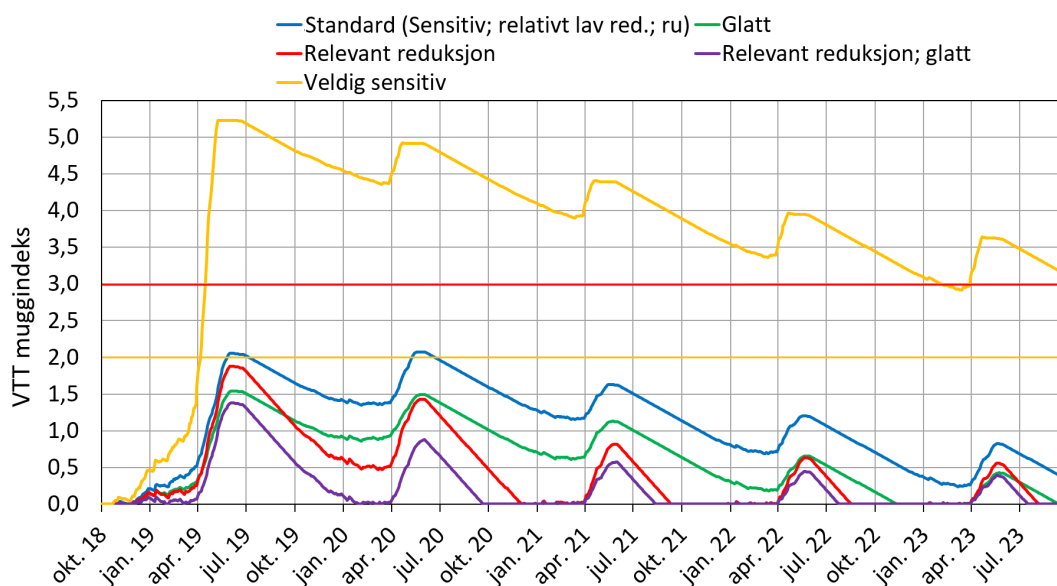
Figur 4.19 viser at muggindeksen blir svært høy ved høy sensitivitet. Ved denne parametervariasjonen er det ekstra mye næring fra for eksempel jord og skit på materialoverflaten, i forhold til rent behandlet tre. Denne inngangsverdien er dermed urealistisk for skrå tak, men spennet mellom sensitivt og veldig sensitivt materialet illustrerer at det er en usikkerhet i modellen og at ekstra næring har stor betydning for muggvekst.

Dersom man ser bort fra veldig sensitivt materiale, ser man at standardmodellen er konservativ ved at den har høyest muggindeks gjennom hele beregningsperioden, og er den eneste som har gult lys i muggmodellen. Med glatt taktro vokser muggen relativt likt som standardmodellen, men har 0,5 lavere muggindeks gjennom omtrent hele beregningsperioden. Med relevant reduksjon har modellen omtrent like stor muggvekst som standardmodellen i perioder med muggvekst, mens muggsoppen blir redusert raskere utenfor vekstperiodene, og ender opp mindre mengder mugg over tid.

Den mest gunstige sammensetningen av inngangsverdier er ved relevant reduksjon og glatt overflate. Denne modellen gir noe muggvekst første året, etterfulgt av svært dårlige vekstforhold for muggsoppen.

Det er relativt stor forskjell på variasjonene av muggmodellen, hvor alle bortsett fra standardmodellen og muggmodellen med veldig sensitive materialer har akseptabel muggindeks. Avhengig av valg av parametere kan det i det verste tilfellet være over 50% visuell dekning av mugg på taktroen (modell: veldig sensitiv), og i beste tilfellet være små mengder mikroskopisk muggvekst (modell: relevant reduksjon; glatt). Konstruksjoner som blir tolket som ugunstige i oppgaven kunne vært mer gunstig eller ugunstig, avhengig av treverkets behandling og hvilke inngangsverdier som passer dem best i VTT-muggmodellen. Ettersom materialene i konstruksjonen er gamle og kan ha vært utsatt for ulik grad av fukt, næring og mugg før, kan forskjellen på materialene i takkonstruksjonen være store. Det er derfor vanskelig å velge inngangsverdier i muggmodellen.

Selv med en viss usikkerhet knyttet til materialene og forholdene, er alle beregninger i oppgaven gjort med de samme inngangsverdiene og den samme matematiske modellen. Modellen er derfor likevel god for sammenligning av resultater.

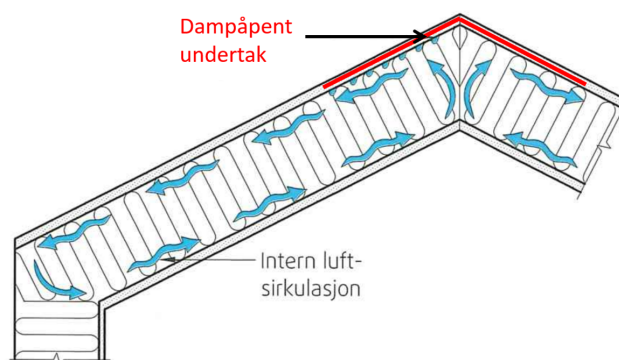


Figur 4.19: Muggindeks i det kritiske punktet ved variasjon av parametere i VTT-muggmodellen.

4.14 Praktiske utfordringer og løsninger

Fuktkonveksjon

I beregningene er det ikke tatt hensyn til fuktkonveksjon. Resultatene sier dermed ikke noe om hvor mye fukt som eventuelt stiger og akkumulerer i øvre deler av taket. Øvre deler av taket kan derfor være mer utsatt for fukt enn beregningene tilsier, og motsatt for nedre del av taket. Dersom for mye fukt akkumulerer i øvre del av taket, kan en mulig løsning være å legge en stripe med dampåpent undertak øverst i taket slik at det tørker raskere ut, se Figur 4.20. Basert på funn i Avsnitt 4.11 tørker dampåpent undertak raskere, og til et lavere likevektsnivå enn løsningen med smart dampsperre. Dersom det er stor omfordeling av fukt til øvre deler av taket, og uttørking med delvis dampåpent undertak fungerer, kan dette bidra til en bedre uttørkingsevne for hele taket. Løsningen kan praktisk gjennomføres ved å fjerne noen rader takstein på toppen, og erstatte undertaket med dampåpent undertak.



Figur 4.20: Mulig løsning for uttørking av omfordelt fukt. Prinsipp.

Dersom løsningen blir implementert for åstak, vil konveksjonsstrømmer naturlig bli stoppet av åsene. Åstak har ingen god etterisoleringsmetode fra innsiden, da åsene blokkerer luftespalter. Løsningen med smart dampsperre kan dermed være spesielt god for åstak.

Vannlekkasjer

Dersom taket har god uttørkingsevne før etterisolering, kan små vannlekkasjer være uoppdaget. Eldre trehus er ofte både dårligere isolerte og mer trekkfulle enn dagens standard. Høyere temperaturer gjennom hele konstruksjonen i kombinasjon med trekk, gjør at materialene har mulighet til å tørke raskt. Dagens energieffektive hus er tettere og bedre isolerte, som gjør at konstruksjonene tørker tregere og er kaldere i ytterkonstruksjonen. Det gjør konstruksjonen sårbar for feil. Den nye løsningen kan dermed ta større skade for eksempel av små vannlekkasjer. For å kontrollere at undertaket er i god stand må man derfor åpne taket og inspisere det for lekkasjer. Beslutningen om valg av etterisoleringsmetode kan bli vanskelig uten å starte demonteringen av det gamle taket.

Som nevnt i Kapittel 2 er undertak rundt pipe og beslag særlig utsatt for lekkasjer. På slike steder kan man forsterke undertaket lokalt for å forlenge levetiden til taket. Delen av undertaket som blir reparert kan også med fordel være dampåpent, ettersom dette gir best uttørking av taket.

Luftlekkasjer

Samtidig som dampsperreren skal hindre dampdiffusjon om vinteren, må den stoppe luftlekkasjer. Fuktig inneluft vil ellers sige inn i takkonstruksjonen, og kan akkumulere og kondensere i taket. Den smarte dampsperreren må derfor bli montert så lufttett som mulig. Kontinuerlig dampsperre gir best lufttetthet, men dersom boligene for eksempel har mange innervegger kan det være vanskeligere å montere dampsperreren lufttett. Luftlekkasjer er ikke undersøkt spesifikt i denne oppgaven, men resultatene i Underkapittel 4.11 viser at konstruksjonen med smart dampsperre gir dårligere uttørking av fukt i konstruksjonen enn tradisjonell oppbygging.

Inntrukket dampsperre er ikke undersøkt i denne oppgaven. Uten inntrukket dampsperre er konstruksjonen utsatt for luftlekkasjer ved perforering. Det er også vanskeligere å montere skjult elektrisk anlegg uten å ha inntrukket dampsperre. En mulighet for hindre disse problemene er å lekte ned kledningen. En ulempe med nedlektet himling er derimot at himlingen blir bygget lengre ned i rommet.

Skygge og varmebidrag fra solen

En problemstilling som kan dukke opp etter taket er ferdig oppgradert, er hvis det blir bygget nye bygninger eller andre objekter som skygger for taket store deler av døgnet. Varme fra solstråling har vist seg å være en svært viktig parameter for uttørkingen av taket. Dersom noe skygger for taket kan løsningen dermed få dårlig uttørkingsevne, og taket får en høyere likevektsfukt og muggproblemer.

4.15 Beregningsmessige usikkerheter

Beregningene er forenklinger av virkeligheten, og det er flere usikkerheter knyttet til dem. Mulige avvik kan være programfeil, feil inngangsverdi, utilstrekkelig kunnskap om materialene, numeriske feil eller begrensninger i den matematiske modellen til programmet.

Transportmekanismer

WUFI 2D utelater noen transportmekanismer for fukt og varme som opptrer i virkelige tak. Flere av disse er ansett som neglisjerbare, men noen kan også være betydelig. Konveksjon, og dermed også fuktkonveksjon, er ikke beregnet i WUFI.

Klimadata

MDRY-klimafilene kan være problematisk for undersøkelsen, fordi det valgte året med "kritisk klima" er definert etter kritisk klima for andre type konstruksjoner uten smart dampsperre. Det er dermed mulig at MDRY-klimafilene er kritiske for andre konstruksjoner, og ikke løsningen i denne oppgaven. For noen konstruksjoner fører for eksempel høy luftfuktighet til høyt fuktinnhold i konstruksjonen, mens for smarte dampsperrer kan høy luftfuktighet føre til en mer dampåpen dampsperre, som gjør at konstruksjonen får lavere fuktinnhold. Det er uvisst om uttørking fra smarte dampsperrer har det samme kritiske referanseåret som bygningskomponentene som ble testet i MDRY.

Klima i fremtiden kan også endre seg på grunn av global oppvarming, slik at MDRY-klimafilene ikke blir representativ for kritisk klima med returperiode enn 10 år. Ved klimaendringer kan vanninnholdet i uteluften endre seg og potensielt få en annerledes variasjon av dampmotstand i smarte dampsperrer.

Materialer

Materialene er i hovedsakelig hentet fra WUFI sin materialbank, hvor materialeegenskapene er basert på laboratorieundersøkelser fra forskjellige institusjoner i verden. Flere av materialeegenskapene er kontrollert, og noen er endret til ønskede verdier, men flere er også ukontrollert og kan inneholde feil eller egenskaper som er forskjellig fra reelle materialer som blir brukt i Norge.

Konvergensfeil

I numeriske beregninger kan konvergensfeil oppstå. Dette er tilfeller hvor konvergenskriteriene ikke er nådd. Det kan være flere grunner til at konvergensfeil oppstår, blant annet gridstørrelsen, klima og kombinasjon av materialer. Ved beregning av modeller i 2D over fem år kan man må regne med at det oppstår moderate mengder konvergensfeil i beregningene, uten at dette går ut over påliteligheten til resultatene.

Kapittel 5

Konklusjon

I denne oppgaven er en etterisoleringsløsning for skrå tak i småhus fra 1950 til 1980 undersøkt. Løsningen har smart dampsperre, og har dermed en utradisjonell mekanisme for tørking. Ved en parameterundersøkelse med beregninger i WUFI 2D, er et utvalg parametere som kan påvirke uttørkingsevnen og muggvekst i taket er variert.

Resultatene viser at takkonstruksjonen ikke blir robust nok til at løsningen kan bli brukt i alle normale forhold. Løsningen må ha visse forhold til stede som fører til tilstrekkelig uttørkingsevne og lav risiko for muggvekst. Av de parametere som er variert ved beregninger, er de mest optimale parametervariasjonene vist i listen under. Dersom flere av disse er til stede kan det indikere at løsningen kan fungere, og dersom man ønsker å bruke løsningen bør man tilstrebe å velge disse forholdene.

- Lavt startfuktnivå.
- Lukking av taket rundt 1. juni.
- Sørlig orientering av taket.
- Lav takhelling.
- Taktekking med høy absorptans for solstråling (mørk farge).
- Geografisk plassering i sør med mye sol, eller i kaldt og tørt klima.
- Lav gjennomsnittlig innetemperatur.
- AirGuard Smart (ved valg av AirGuard Smart, Intello eller Majrex)

Småhus som blir etterisolert er allerede bygget og man har gitte forhold som man ikke kan påvirke. Man må derfor vurdere om løsningen er mulig i den gitte situasjonen. Det er mange faktorer som må være på plass, og det er mulig at løsningen ikke kan anbefales da den er sårbar for endring av parametervariasjoner som er regnet som normale.

I resultatene kan man se at uttørkingsevnen til konstruksjonen i stor grad er påvirket av varmebidrag fra kortbølget stråling. Orientering, takhelling, geografisk posisjon og skygge har påvirkning på kortbølget strålingsintensitet på takflaten, og absorptans for solstråling påvirker hvor stort varmebidraget fra strålingen blir. For å ha tilstrekkelig uttørkingsevne og redusere risikoen for muggsopp, er man avhengig av at varmebidraget er stort nok. Uten varmebidrag akkumulerer fukt i taket uten mulighet for å tørke ut. Ved høyere varmebidrag kan uttørkingseffekten også kompensere for andre ugunstige effekter.

De fleste gule lys i muggindeksen skyldes overskuddsfukt i konstruksjonen. Dersom man lukker taket tidig på sommeren kan taket også tåle mer fukt fra start, da uttørkingstiden blir kortere. Dersom man forutsetter et lavere startfuktnivå og lavt fukttilskudd kan konstruksjonen være gunstig i mange forhold. Nordvendte tak har da tilstrekkelig uttørkingsevne og lav risiko for muggvekst over hele Norge, bortsett fra i Kristiansund.

Den største forskjellen på de tre smart dampsperre-produktene er uttørkingsevnen om sommeren. AirGuard Smart er mest dampåpen ved høy RF, og har best uttørkingsevne totalt.

Man må vurdere om sårbarheten og kompleksiteten ved å undersøke om taket kan benytte den gitte løsningen kan være for stor i forhold til fordelene med etterisoleringsløsningen. Tradisjonell takoppbygging og etterisoleringsløsning med tradisjonell dampsperre og dampåpent undertak er mer robust for byggfukt og høyt fukttilskudd enn løsningen med smart dampsperre. Dette ser man ved at den tradisjonelle takoppbyggingen har raskere uttørkingstid og tørker til et lavere fuktnivå. Den tradisjonelle takoppbyggingen fremstår også som mer robust ved at den ikke avhengig av varmebidrag fra kortbølget stråling.

Forslag til videre arbeid

Det er ikke tatt hensyn til fuktkonveksjon i parametereundersøkelsen. Dette kan potensielt ha betydning for fuktsikkerheten i taket ved omfordeling av fukt. Man kan undersøke hvilken grad fukt vil akkumulere i toppen av taket, og i hvilken grad en stripe med dampåpent undertak langs mønet bedrer uttørkingsevnen til taket.

Som det er diskutert er det en viss usikkerhet om MDRY-klimafilene har de mest kritiske årene for konstruksjoner med smart dampsperre. Det kan derfor være interessant å undersøke disse klimafilene og andre klimadata sammen med konstruksjoner med smart dampsperre. Hvordan klimaendringene virker på konstruksjonen kan også være interessant å undersøke.

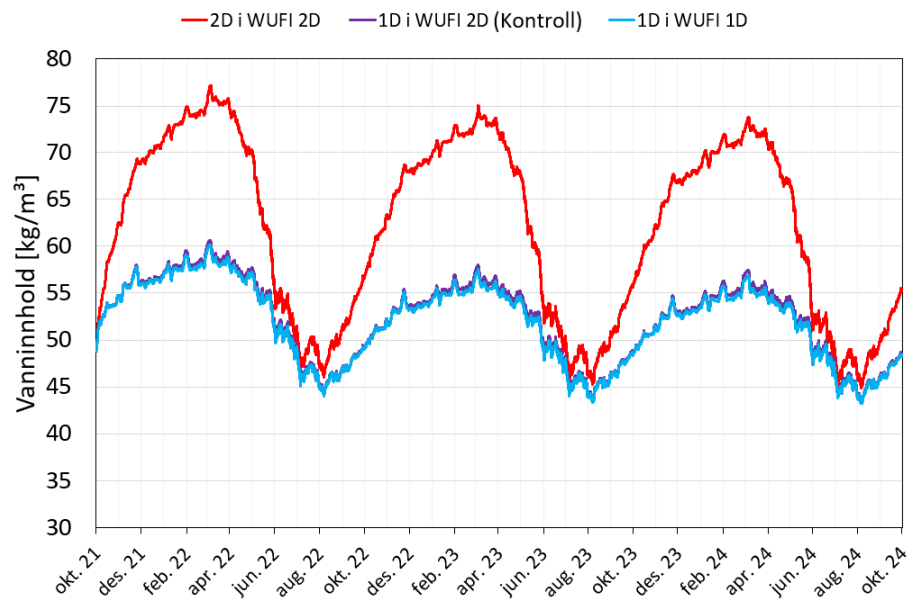
Bibliografi

- [1] O. C. Stenby, *Hva skjedde 1950 - Bygg og Bevar*, <https://www.byggogbevar.no/pusse-opp/byggeskikk/hva-skjedde-1950>, 2019, Hentet: 13.05.21.
- [2] T. Bøhlerengen, *Etterisolering Av Små hus*. Oslo: SINTEF akademisk forl., 2017.
- [3] B. Risholt, *Zero Energy Renovation of Single Family Houses*, Avhandling (ph.d.) - Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Trondheim, 2013, Trondheim, 2013.
- [4] M. Fuglseth, B. Sandberg-Kristoffersen, V. L. Yttersian, A. Storøy, J. Saunders og G. Lesaca, *Klimagassutslipp fra oppgradering av eldre bygg - 24 case-studier fra innlandet*, 2021.
- [5] SINTEF Byggforsk, *OPPTRE*, <https://opptre.no/>, 2018, Hentet: 13.02.21.
- [6] J. Seehusen, *Unikt tak suger fukt inn i bygget*, <https://www.tu.no/artikler/unikt-tak-suger-fukt-inn-i-bygget/485473>, 2020, Hentet: 04.05.21.
- [7] SINTEF Byggforsk, *573.430 Materialdata for Vanndamptransport - Byggforskserien*, 2003.
- [8] S. Geving, *Fuktskader: Årsaker, Utredning Og Tiltak*. Oslo: SINTEF akademisk forlag, 2011.
- [9] S. Geving og J. Holme, *Høyisolerte Konstruksjoner Og Fukt*, Prosjektrapport, Oslo, 2010.
- [10] L. Gullbrekken, S. Uvsløkk, T. Kvande og B. Time, *Hot-Box Measurements of Highly Insulated Wall, Roof and Floor Structures*, 2017.
- [11] J. V. Thue, *Bygningsfysikk - Grunnlag*. Bergen: Fagbokforlaget, 2016.
- [12] S. Geving, *Fukt i Bygninger*, J. V. Thue, red. Oslo: Norges byggforskningsinstitutt, 2002.
- [13] SINTEF Byggforsk, *421.132 Fukt i Bygninger. Teorigrunnlag - Byggforskserien*, 2018.
- [14] S. Geving og J. Holme, *Mean and Diurnal Indoor Air Humidity Loads in Residential Buildings*, 2011.
- [15] A. G. Lien, S. Kristian, E. Bjaanes, K. Hagen og Y. Kvalø, *Oppgradering Av et 60-Tallshus Og et 70-Tallshus*, Oslo, 2017.
- [16] K. I. Edvardsen og T. Ramstad, *Trehus*. Oslo: SINTEF akademisk forl., 2014.
- [17] Direktoratet for byggkvalitet, *Byggetknisk forskrift TEK17 - §13 Inneklima og helse*, 2017.
- [18] SINTEF Byggforsk, *525.002 Takformer, Taktyper Og Oppbygning - Byggforskserien*, 2018.
- [19] SINTEF Byggforsk, *573.121 Materialer til luft- og damptetting - Byggforskserien*, 2003.
- [20] S. Geving, *Alternative Dampsperrer Med Uttøringsmulighet Mot Innelufta*, Prosjektrapport, Oslo, 2010.

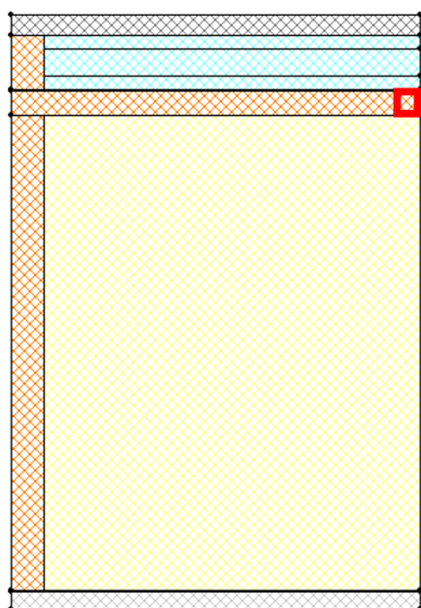
- [21] Greenspec, *Airtightness, Energy Loss and the Intelligent Membrane*, <http://www.greenspec.co.uk/building-design/airtightness-membranes/>, 2021, Hentet: 01.03.21.
- [22] Lars Gullbrekken, *Fuktadaptiv Dampsperre - Funksjon, Erfaringer Og Mulige Bruksområder*, <https://sintefcertification.no/file/index/5120>, 2021, Hentet: 20.05.21.
- [23] SINTEF, *Pro Clima INTELLO PLUS SINTEF Certification*, <https://www.sintefcertification.no/Product/Index/9154>, 2020, Hentet: 03.02.21.
- [24] SINTEF, *Isola AirGuard® Smart2 Fuktadaptiv Dampsperre SINTEF Certification*, <https://www.sintefcertification.no/Product/Index/2754>, 2019, Hentet: 03.02.21.
- [25] SINTEF Byggforsk, *700.110 Byggskader. Oversikt - Byggforskserien*, 2010.
- [26] SINTEF Byggforsk, *701.401 Muggsopp i Bygninger. Forekomst Og Konsekvenser for Inneklimaet - Byggforskserien*, 2005.
- [27] Fraunhofer Institute of Building Physics, *WUFI Mould Index VTT (v2.1.4)*.
- [28] Fraunhofer Institute of Building Physics, *WUFI 2D (v.4.3)*.
- [29] S. Geving, *WUFI.NO*, <http://www.wufi.no/>, 2016, Hentet: 12.04.21.
- [30] T. Hansen, E. B. Møller og R. H. Peuhkuri, *Hygrothermal Performance of Cold Ventilated Attics – Simulations with Current and Future Conditions*, 2019.
- [31] L. Gullbrekken, T. Kvande og B. Time, *Ventilated Wooden Roofs: Influence of Local Weather Conditions - Measurements*, 2017.
- [32] DuPont, *Tyvek® AirGuard®Smart*, https://www.dupont.co.uk/content/dam/dupont/amer/us/en/performance-building-solutions/public/documents/en/Tyvek_AirGuard_Smart_Brochure_EN.pdf, 2020, Hentet: 20.01.21.
- [33] E. B. Sletfjerding, *Smart Vapour Barriers in Compact Timber-Framed Roofs - Parameter Analysis and Field Measurements*, Masteroppgave, 2019.
- [34] S. Geving og S. E. Torgersen, *Klimadata for Fuktberegninger*, 1997.
- [35] Google, *Google Maps*.

Vedlegg A

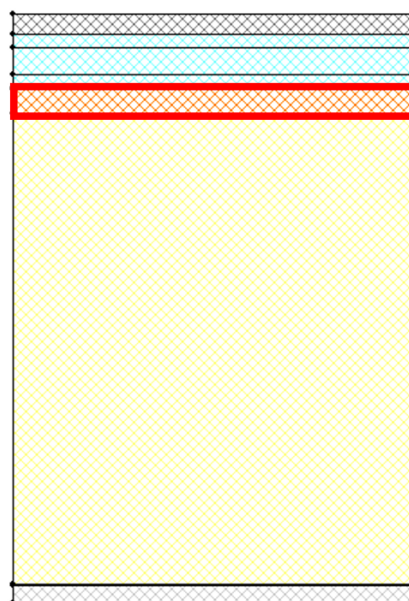
Valg av beregningsprogram



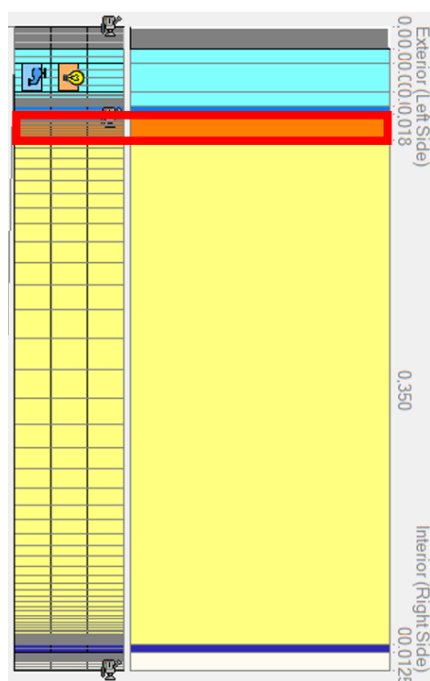
Figur A.1: 1D- og 2D-beregninger av vanninnhold i midten av taktroen med WUFI 1D og WUFI 2D. Oppbygging og monitorering er vist i Figur A.2.



(a) 2D-beregning i WUFI 2D.



(b) 1D-beregning i WUFI 2D (kontrollberegning).



(c) 1D-beregning i WUFI 1D.

Figur A.2: Oppbygging og monitorpunkter markert med rød firkant.

Vedlegg B

Tallverdier for s_d -profiler

Tallverdier for s_d -profiler for smarte dampsperrer som er brukt i oppgaven er vist i Tabell B.

Tabell B.1: s_d -profiler for smarte dampsperrer brukt i oppgaven.

DuPont AirGuard smart ^a			Isola AirGuard smart gen 2 ^b			Siga majrex ^c			Pro Clima Intello ^d		
RF [%]	Sd [m]	μ [-]	RF [%]	Sd [m]	μ [-]	RF [%]	Sd [m]	μ [-]	RF [%]	Sd [m]	μ [-]
0	90	90000	0	100	90000	0	35	35000	0	34	34000
12,5	90	90000	12,5	90	90000	15	35	35000	25	34	34000
25	35	35000	25	35	35000	40	11	11000	71,5	1,7	1700
37,5	13	13000	37,5	13	13000	50	11	11000	90	0,3	300
62,5	3,3	3300	62,5	3,3	3300	70	3	3000	100	0,3	300
75	0,21	210	75	0,21	210	90	1	1000			
90	0,2	200	90	0,2	200	100	1	1000			
100	0,2	200	100	0,2	200						

^a[32]

^b[33]

^c[33]

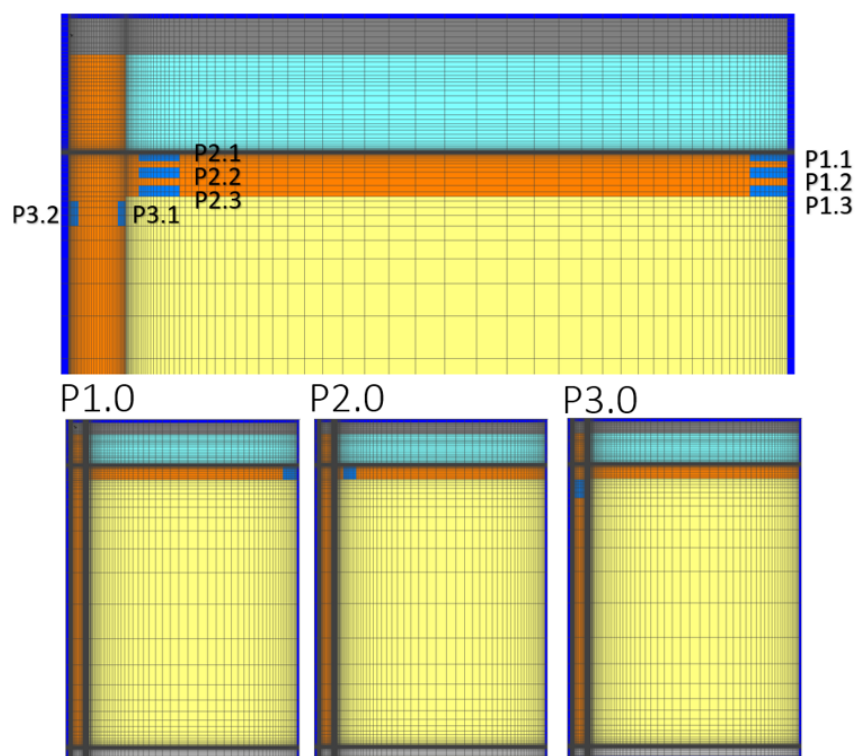
^d[28]

Vedlegg C

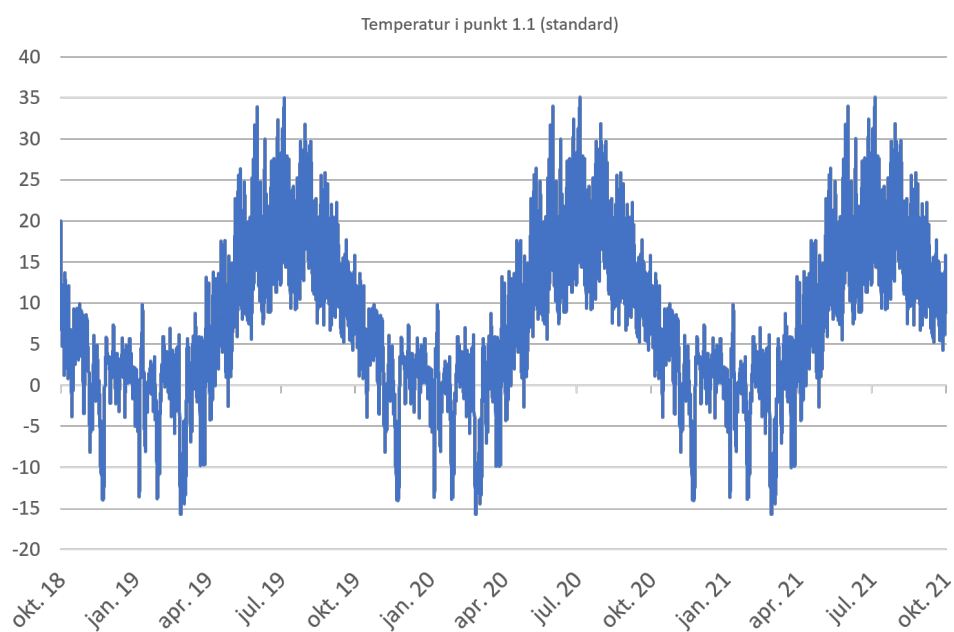
Monitorundersøkelse

Merk at beregningene er gjort på et tidligere stadium i oppgaven, med inngangsverdier som avviker noe fra de endelige beregningene.

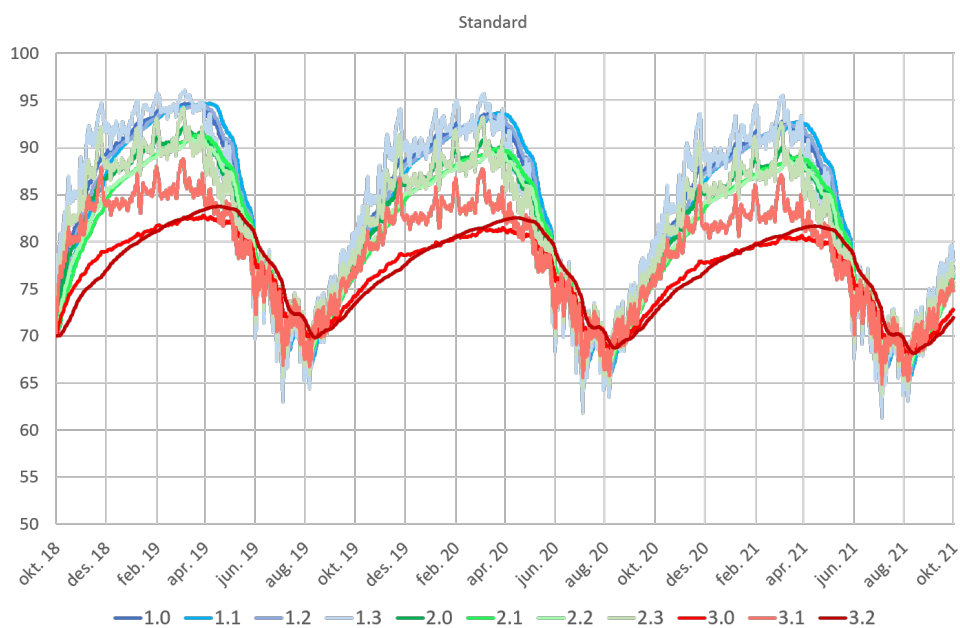
Temperaturer i de forskjellige punktene varierer noe, og Figur C.2 er lagt ved for som referansetemperatur.



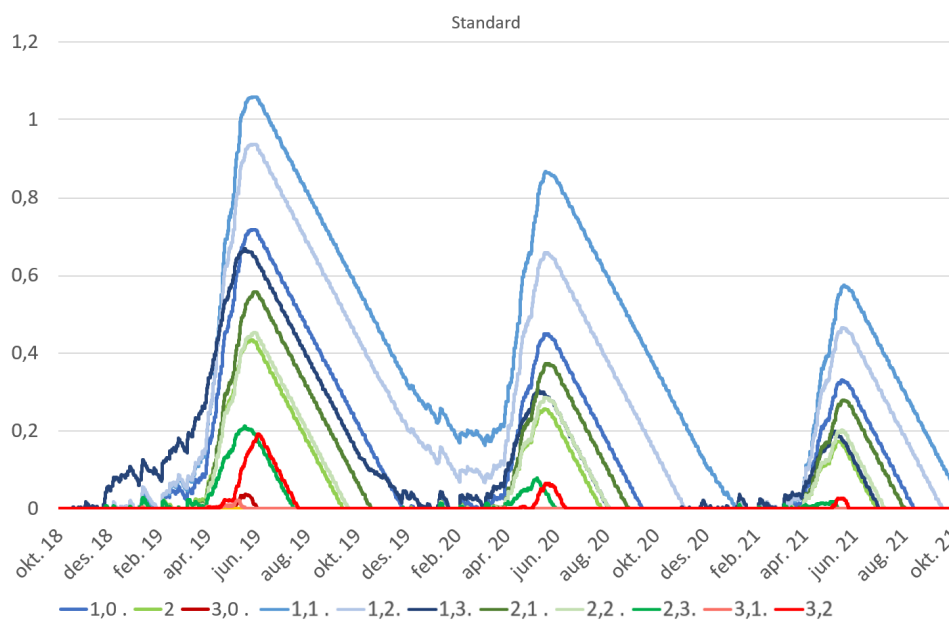
Figur C.1: Kandidater til kritisk punkt.



Figur C.2: Temperatur i punkt 1.1 ved standard inngangsparametere (for referanse).

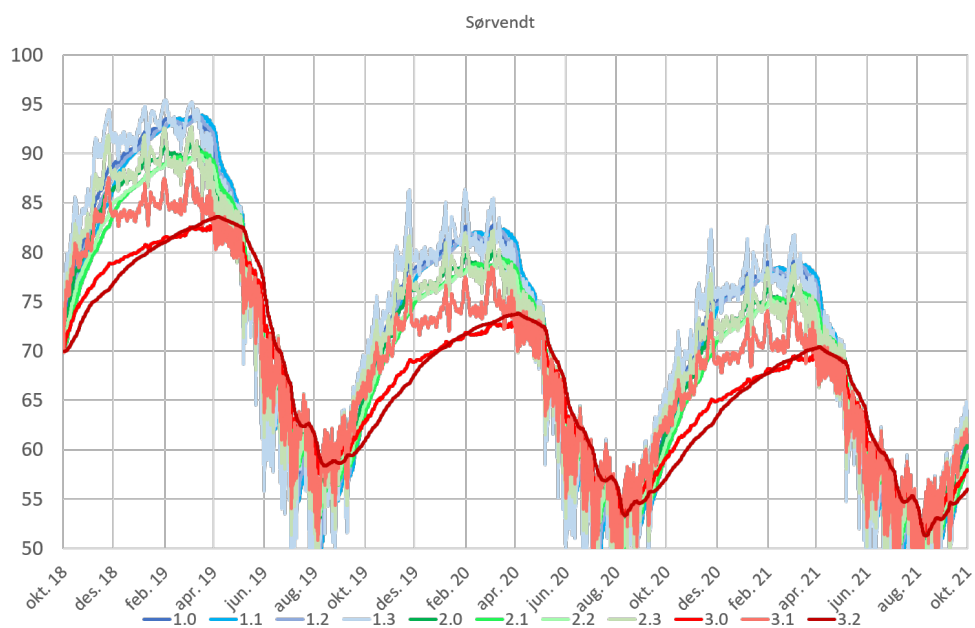


(a) RF

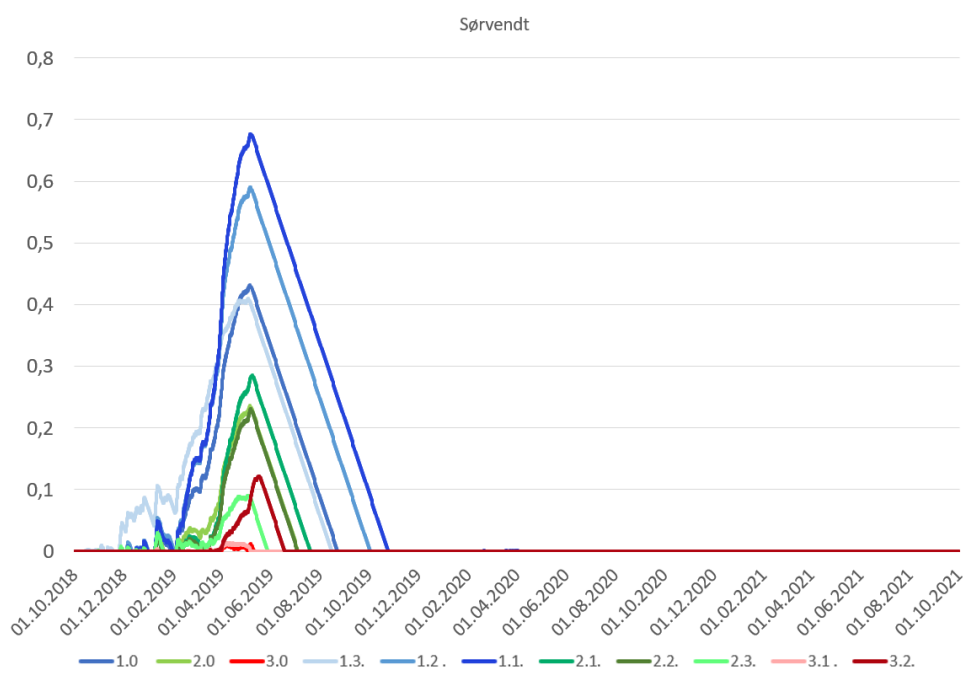


(b) VTT-modell .

Figur C.3: Standard inngangsparametere.

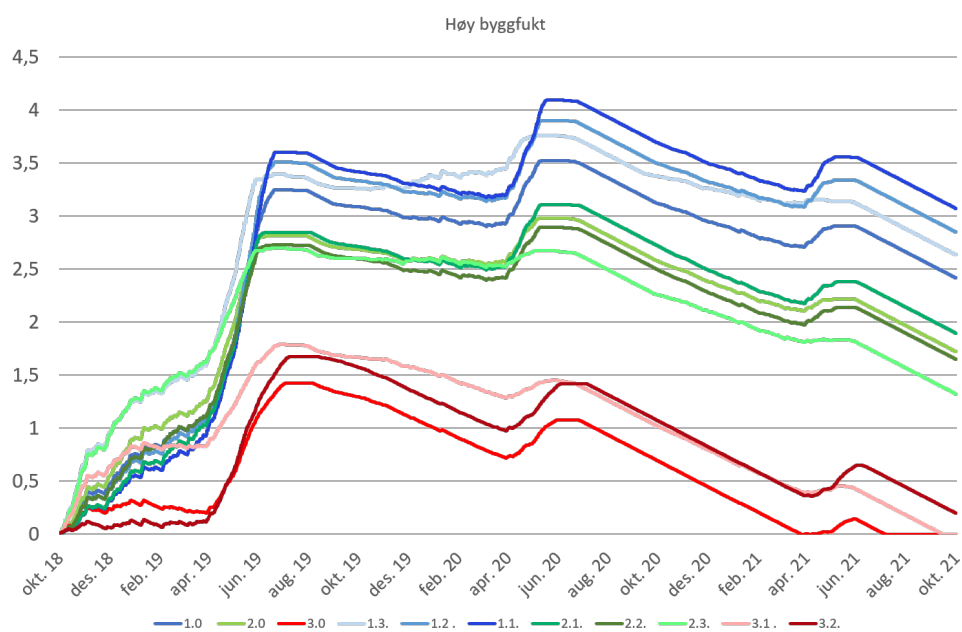
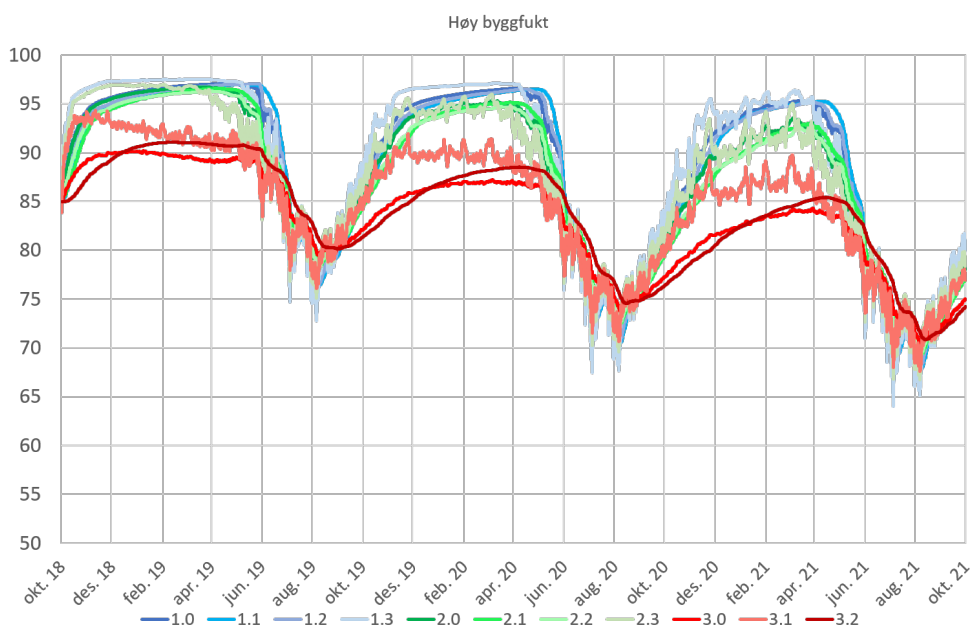


(a) RF

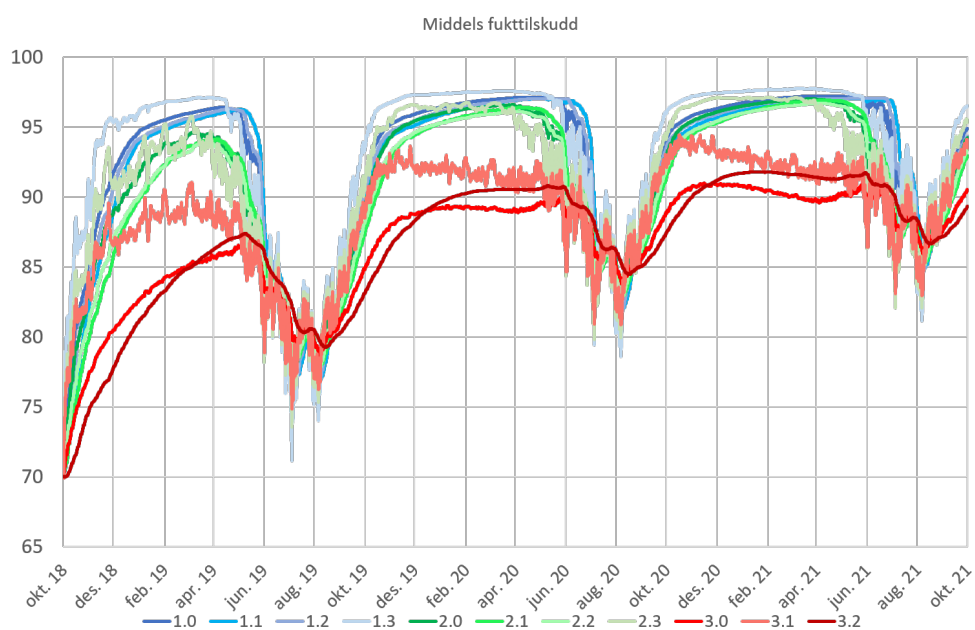


(b) VTT-modell.

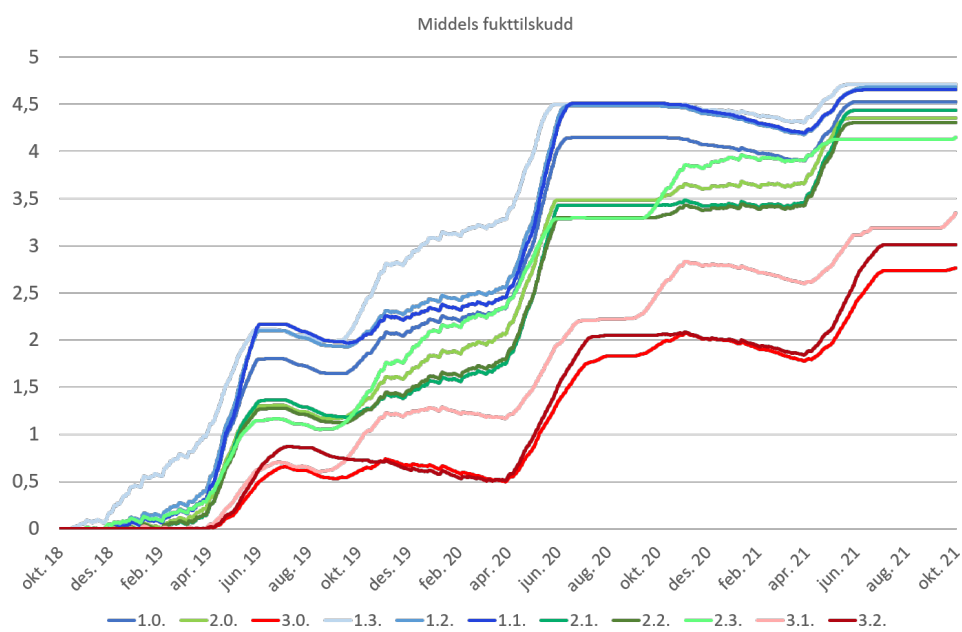
Figur C.4: Beregning av takflate mot sør.



Figur C.5: Beregning med høy byggfukt.

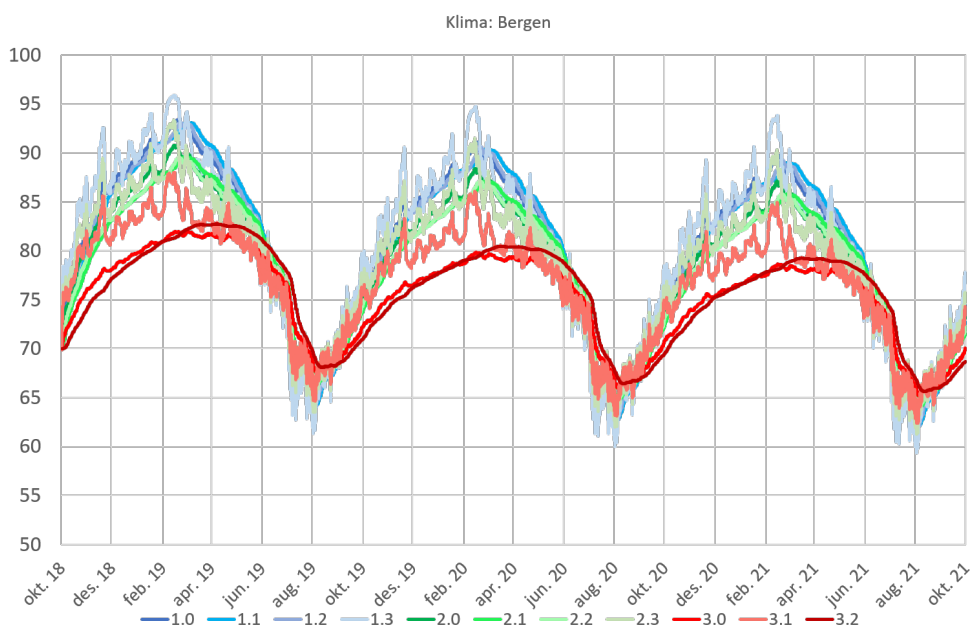


(a) RF

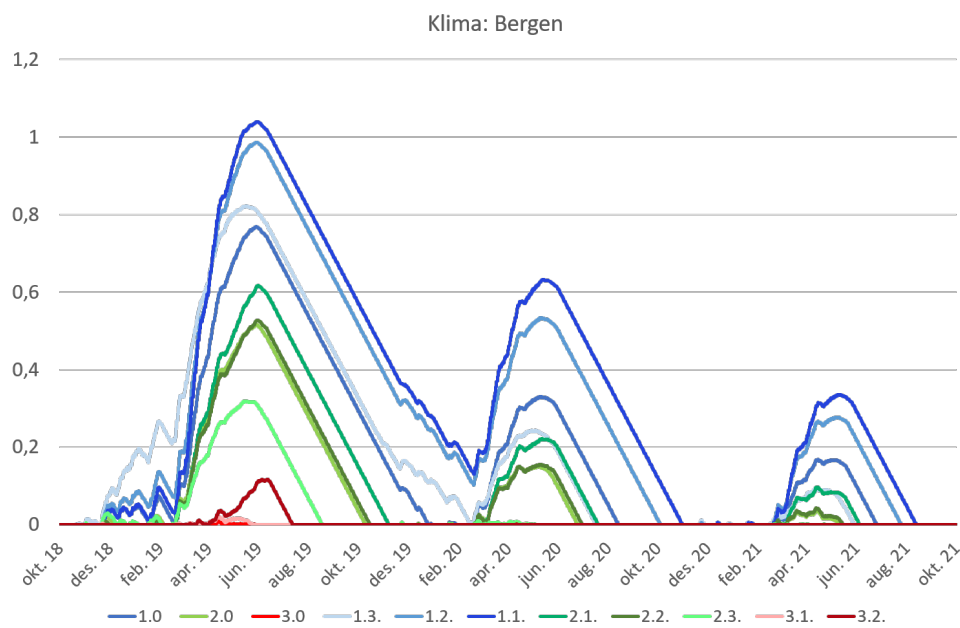


(b) VTT-muggmodell.

Figur C.6: Beregning med middels fukttilskudd.

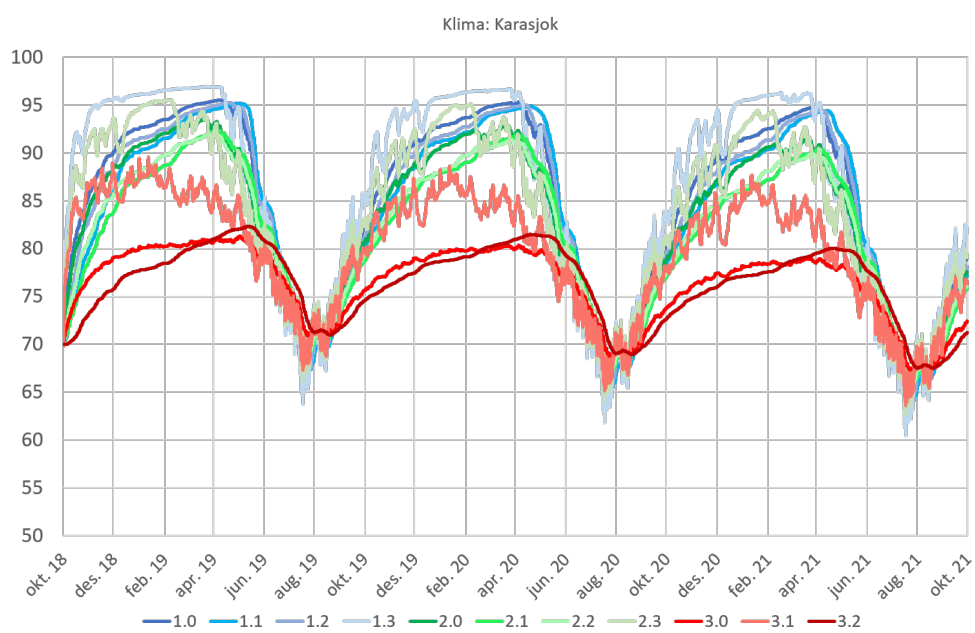


(a) RF

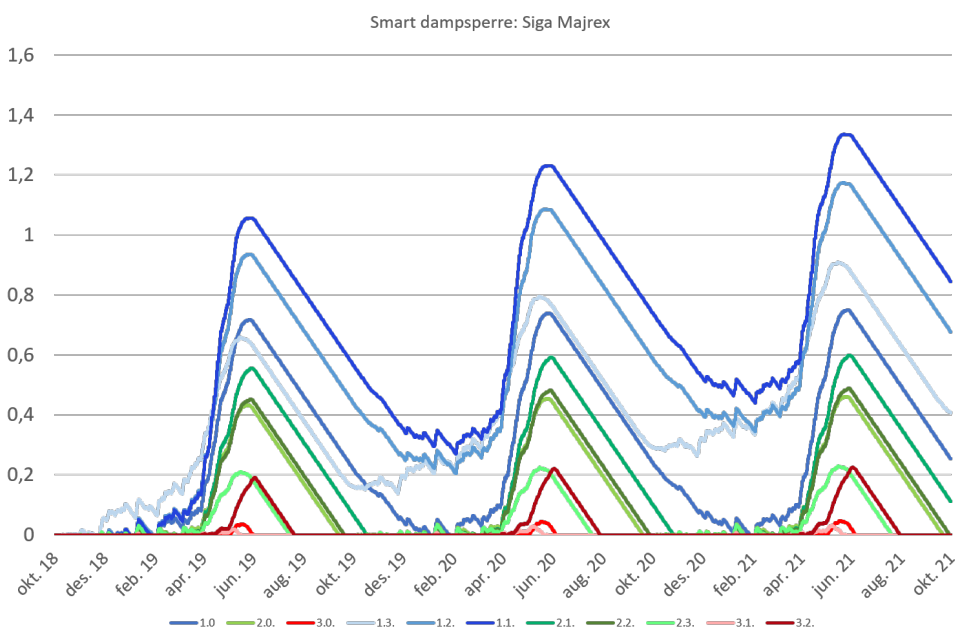
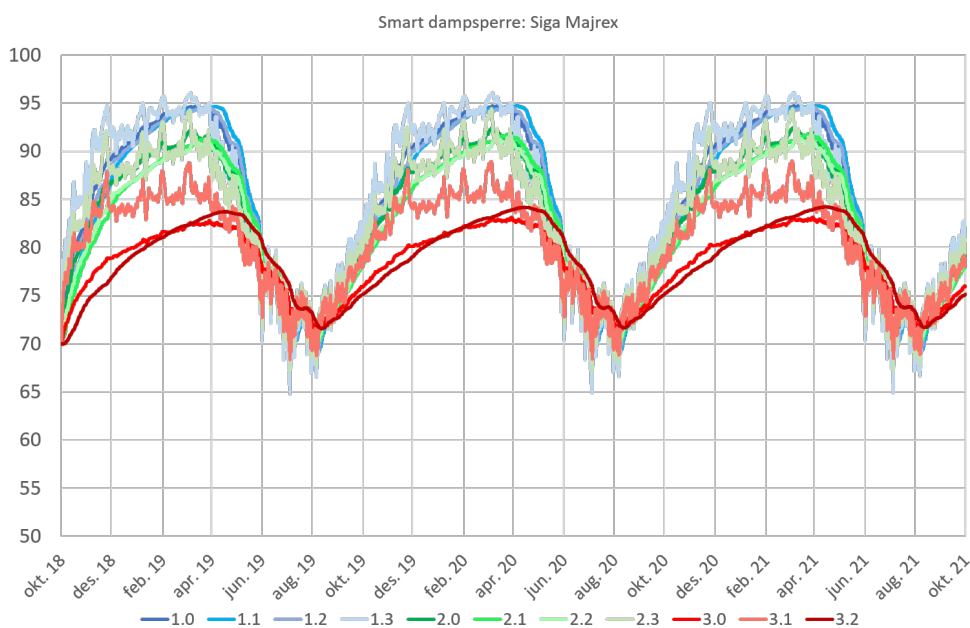


(b) VTT-muggmodell.

Figur C.7: Beregning med klima fra Bergen.



Figur C.8: RF for beregning med klima fra Karasjok (VTT-figur mangler).



Figur C.9: Beregning med Siga Majrex.

Vedlegg D

Parametermatrise

Vedlegget inneholder syv sider med parametermatrise, Tabell D.1 til D.7.

Tabell D.7: Parametermatrise (7/7).

Parameter	Parameter variasjon	Innetemp.: 23 grader	Referansekonstruksjon	Referansekonstruksjon; Høy bygghukt	Referansekonstruksjon; Høyt fukttilskudd
Smart dampsperre produkt	AirGuard Smart	x			
	Intello				
	Majrex				
Referansekonstruksjon	Trad. dampsperre & Dampåpent undertak		x	x	x
Beregningsstart	1. okt	x	x	x	x
	1. apr				
	1. jul				
Orientering	Nord	x	x	x	x
	Sør				
	Øst				
	Vest				
	Nord/øst				
	Nord/vest				
Fuktilskudd	Lavt	x	x	x	x
	Middels				
	Høyt				x
Startfukt nivå	Lavt				
	Middels	x	x	x	x
	Høyt			x	
Absorbians	0				
	0,6				
	0,7				
	0,8	x	x	x	x
Sted uteklima	Trondheim	x	x	x	x
	Bergen				
	Oslo				
	Karasjok				
	Tromsø				
	Kristiansand				
	Mo i Rana				
	Vernes				x
	Kristiansund				
Takkhelling	15 grader				
	30°				
Innetemperatur	45 grader	x	x	x	x
	20 °C				
	21 °C		x	x	x
	22 °C				
	23 °C				x

Vedlegg E

Standardsimulering oversikt

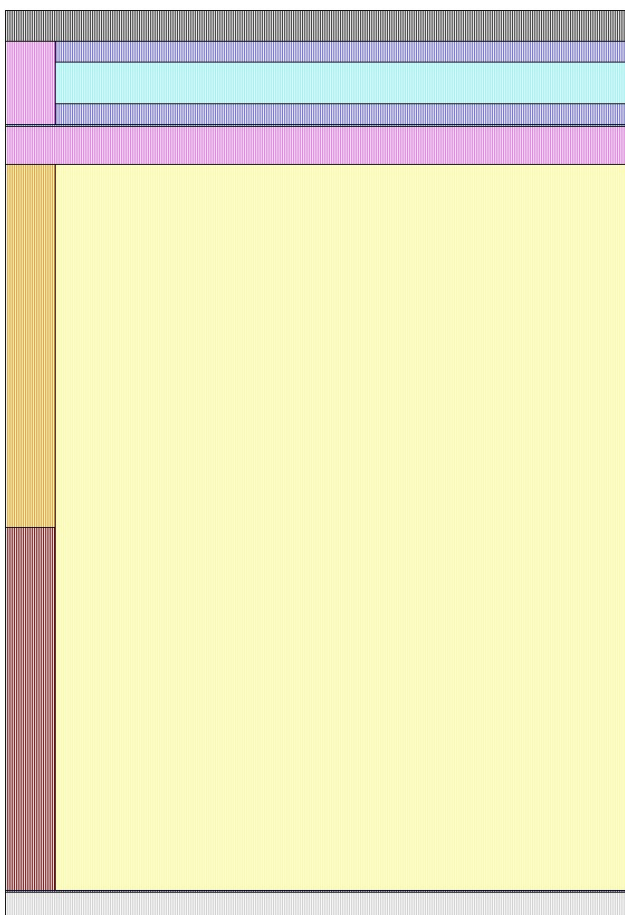
I vedlegget ligger utskift av oversiktsdokument for standardmodellen, med inngangsparametere i WUFI.

WUFI2D Project Overview

Info:

Projectname: Masteroppgave
 Contact:
 Phone:
 City-Zip:
 Street:
 Client:
 Number: 1
 Remarks:
 e-Mail:
 Responsible:
 Fax:
 Date of creation: 2021-02-08 09:08:29

Construction:



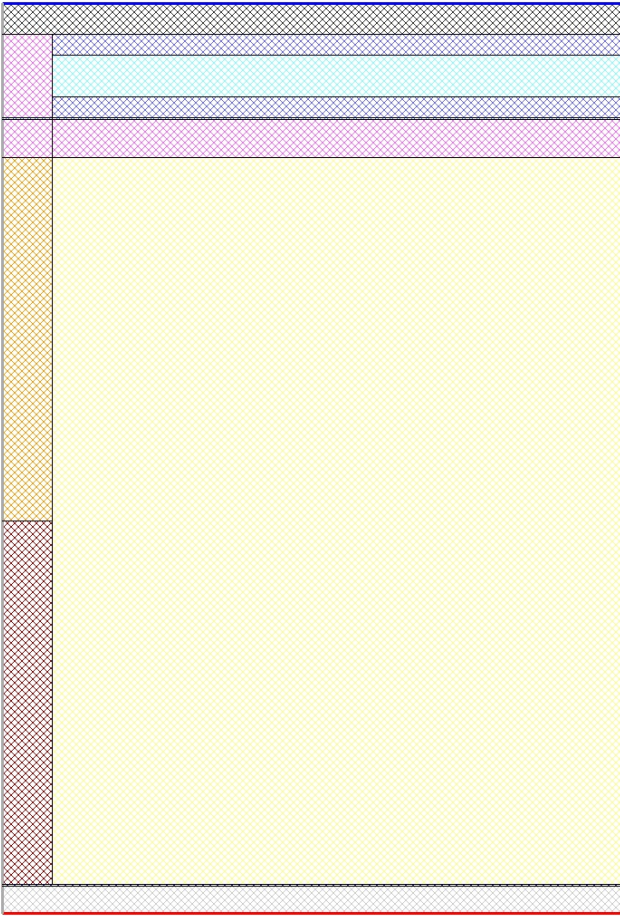
Rectangles / Orthogonal Polygons:

12

Name	XMaterialFilename	YMaterialFilename	Initial Theta	Initial Phi	Initial WaterContent
taktekking	Concretewe.xml	ditto	20	0.7	72
søyfe	TaktroScandinaviansprucetransversedirectionIunlocked.xml	ditto	20	0.8	58.3
luftespalte.over	AirLayermm.xml	ditto	20	0.7	1.1
luftespalte.midt	AirLayermmwithoutadditionalmoisturecapacity.xml	ditto	20	0.7	0.0
luftespalte.nede	AirLayermm.xml	ditto	20	0.8	1.9
undertaksbelegg	RoofMembraneV.xml	ditto	20	0.7	0
taktro	TaktroScandinaviansprucetransversedirectionIunlocked.xml	ditto	20	0.8	58.3
Taksperre ny	TaksperrenyScandinaviansprucetransversedirectionIunlocked.xml	ditto	20	0.8	58.3
Taksperre gammel	TaksperregammelScandinaviansprucetransversedirectionIunlocked.xml	ditto	20	0.6	41
Isolasjon	ISOVERGWIntegraZKE.xml	ditto	20	0.7	0.7
Sm.dampsperre	Dupontairguardsmartendretfraintello.xml	ditto	20	0.5	1.8
Innv.kl.gips	Gypsumboardinterior.xml	ditto	20	0.5	4

Outersurfaces:

19

**Surface Coefficients:**

3

Name	Heat Transfer Coefficient	SD-Value	Rain Absorption	Radiation Absorption	Radiation Emissivity
Exterior Surface	19	----	----	0.8	0.9
Indoor Surface	8.0	0.01	----	0	0
Adiabatic/System Border	0	----	0	0	0

Climate:

ClimateFile	Orientation	Inclination
230	North	45
230	North	90
0	North	90

Sources:

1

Name	Type	Fraction	FileName	Associated Boundary
Luftskifte	Air Exchange Source	40	-	Exterior Surface

