

Institutt for bygg- og energiteknikk — Energi og miljø i bygg

Postadresse: Postboks 4 St. Olavs plass, 0130 Oslo

Besøksadresse: Pilestredet 35, Oslo

Webside: www.oslomet.no

MASTEROPPGAVE

OPPGAVENS TITTEL: Bygningsfysisk analyse av prefabrikkert svømmehall i massivtre	DATO: 25.05.2021
	ANTALL SIDER OG VEDLEGG: 86 sider inkludert 6 vedlegg.
FORFATTERE: Ludvig Strand Normann-Hansen	VEILEDER: Bjørn Aas (SIAT) Wolfgang Kampel (Oslo Met)

UTFØRT I SAMARBEID MED: Senter for idrettsanlegg og teknologi (SIAT) ved Bjørn Aas og Green Advisers AS ved Joakim Dørum.	KONTAKTPERSONER: Bjørn Aas og Joakim Dørum.
---	--

KORT SAMMENDRAG:
Studien tar for seg det bygningsfysiske aspektet for en svømmehall utført med bæresystem i limtre- og massivtrekonstruksjoner, og prefabrikkerte isolerte elementer av bindingsverk. Det er utarbeidet detaljløsninger av utvalgte konstruksjoner og overganger for å sørge for byggbare, robuste og luft- og diffusjonstette løsninger. Både for tradisjonell byggemetode med inntrukket bæresystem, men også for løsning med bæresystem plassert i klimaskallet, som er den foretrukne byggemetoden med hensyn til økonomi og byggbarhet på grunn av skjøter for massivtreelementer og de isolerte bindingsverkselementene. For å sikre akseptable konstruksjoner uten risiko for utfelling av kondens og/eller muggvekst er det gjort både statiske og dynamiske simuleringer for utvalgte konstruksjoner, overganger og kuldebroer. Statiske simuleringer er gjort i Ubakus og Flixo Energi med dimensjonerende utetemperatur på -25 °C, mens de dynamiske simuleringene er gjort i Wufi 2D og Wufi Mould Index VTT for tre svært ulike klimafilere i Norge (Oslo, Bergen, Karasjøk). Innvendig svømmehallsklima er satt til lufttemperatur på 32 °C og 55 % RF for alle simuleringer.

NØKKEWORD (en per linje):

Massivtre
Svømmehall
Fukt

Oppgavetekst

Det er et stort behov for svømmehaller i Norge, og denne oppgaven tar for seg det bygningsfysiske aspektet ved utviklingen av et konsept for en standardisert løsning basert på prefabrikasjon og bruk av limtre- og massivtrekonstruksjoner i bæresystemet.

Norske svømmehaller har svært høye byggekostnader sammenlignet med prisnivå i andre skandinaviske land. Det er behov for å differensiere markedet med sikte på løsninger for ulike brukergrupper og behov. Dette gjelder særlig kommuner og områder der det er behov for flere vannflater, men uten de typiske attraksjonene som forbindes med svømmehaller bygget de senere år.

Basert på dette er det utarbeidet en «case-bygning» som utfordrer de tradisjonelle prinsippene med bruk av limtre- og massivtrekonstruksjoner i svømmehall og plassering av bæresystemet i klimaskallet. Bygningen skal redusere byggekostnader, men også tilstrebe lavt energibruk og klimagassutslipp.

Utgangspunktet for energibruken til bygningen er dagens normalkrav til passivhus-konstruksjoner, men bindes ikke opp til minstekravene til enkeltkomponenter og søker heller ingen sertifisering.

Planløsningen er utarbeidet ut fra Kulturdepartementets krav til idrettsanlegg med hensyn på plassbehov i svømmehall, garderober og fellesareal. Det er lagt stor vekt på logistikk både på publikums- og driftsside. Konseptet er også utarbeidet slik at det skal kunne tilpasses ulike tomte- og grunnforhold. Dette er fortrinnsvis basert på at ingen konstruksjoner skal etableres under bakkenivå.

Bygningen har som alle svømmehaller et krevende og fuktig inn klima. Det er derfor avgjørende at de ulike konstruksjonene prosjekteres og utføres med høyt fokus på bygningsfysikk.

Denne oppgaven skal se på det bygningsfysiske aspektet for bygningen og dokumentere at de ulike konstruksjonene utføres tilstrekkelig gode for å tåle både de indre- og ytre klimapåkjenningene. Fokusområder i forbindelse med bygningsfysikken er byggbarhet, robusthet, luft- og diffusjonstetthet og risiko for kondens- eller muggvekst. Utgangspunktet for oppbyggingen til de ulike konstruksjonene og overgangene er hensyntatt at bygningen utføres med limtre- og massivtrekonstruksjoner, og prefabrikkerte isolerte bindingsverkselementer.

Oppgaven inneholder ikke vurderinger i forbindelse med energibruk, klimagassutslipp, kostnader, ventilasjon og inn klima eller dagslysforhold.

Nøkkelinformasjon

Tittel: Bygningsfysisk analyse av prefabrikkert svømmehall i massivtre

English title: Building physical analysis of prefabricated swimming pool in solid wood

Hovedveileder: Bjørn Aas (Senter for idrettsanlegg og teknologi (SIAT))

Samarbeid/biveileder: Wolfgang Kampel (Oslo Met)

Bakgrunn

Bakgrunnen for arbeidet er et ønske om å bygge en tilstrekkelig energi- og kostnadseffektiv, samt bygningsfysisk akseptabel svømmehall i massivtre. Denne oppgaven ser på det bygningsfysiske aspektet ved svømmehallen og inkluderer ikke dokumentasjon for energibruk av bygningen, klimagassutslipp, inneklimate, dagslys eller kostnader i forbindelse med oppføring.

For det bygningsfysiske innebærer dette å se på byggbarheten rundt de ulike detaljovergangene, samt kondens- og muggvekstrisiko ved kritiske punkter i konstruksjonene. Det er også gjort U-verdi beregninger, samt beregning av varmetapstall for å sikre et akseptabelt klimaskall i henhold til normalkrav for passivhuskonstruksjoner.

Den tradisjonelle byggemetoden og den generelle anbefalingen om inntrukket bæresystem og klimaskall i sin helhet plassert utenfor bæresystemet utfordres og kontrolleres ved fuktsimuleringer av utvalgte konstruksjoner og kuldebroer for både statiske og dynamiske forhold for 3 ulike klimatyper (Oslo, Bergen og Karasjok) for både bygning med bæresystem inne i klimaskall og inntrukket bæresystem.

Bakgrunnen for at det er ønsket å plassere bæresystemet i klimaskallet er at dette er den foretrukne byggemåten med hensyn til økonomi og byggbarhet for den prefabrikkerte bygningen på grunn av skjøter for massivtreelementer og de isolerte bindingsverkselementene. I tillegg vil bæresystem i klimaskall medføre at mindre innvendig areal brukes opp av bæresystemet. Løsningen med bæresystem i klimaskall strider mot den generelle anbefalingen i henhold til håndbok 52 for bade- og svømmeanlegg [1].

Case-bygningen har ferdige utarbeidede plantegninger og IFC-modell, og oppgaven bygger på dette grunnlaget. Dette grunnlaget har ikke vært låst og det har underveis i oppgaven vært mulig å komme med innspill til endringer i grunnlaget for å sikre en bedre byggbarhet med hensyn til det bygningsfysiske aspektet i svømmehallen.

En viktig del av oppgaven har vært å utføre varme- og fuktsimulering av utvalgte konstruksjoner, overganger og kuldebroer for å sikre at ingen konstruksjoner har risiko for kondens og/eller muggvekst. Dette er særdeles viktig i selve svømmehallklimaet som er satt til å holde en lufttemperatur på 32 °C og ≤ 55 % relativ luftfuktighet (RF).

Mål

Målet med oppgaven er å dokumentere tilfredsstillende miljø- og bygningsfysiske egenskaper for svømmehall utført i limtre- og massivtrekonstruksjoner med ulike byggemetoder og plassering av bæresystem.

Det er 3 forskningsspørsmål som besvares i oppgaven:

1. Hvilke detaljløsninger sikrer akseptable bygningsfysiske konstruksjoner med hensyn til U-verdi, fuktsikring og kuldebroer?
2. Vil noen konstruksjoner eller kuldebroer ved ulike varme- og fuktsimuleringer medføre utfelling eller høy risiko for kondens og/eller muggvekst?
3. Hvilken plassering av bæresystem i limtre- og massivtrekonstruksjoner vurderes til å gi mest bygningsfysiske fordeler?

Metode / Arbeidsoppgaver

Hensikten med oppgaven er å dokumentere tilfredsstillende miljø- og bygningsfysiske egenskaper for en prefabrikkert svømmehall i limtre- og massivtrekonstruksjoner. Arbeidsoppgavene som er utført i forbindelse med dette kan sees i liste under.

- Areal- og mengdeberegninger av bygning.
- U-verdi beregninger av konstruksjoner.
- Beregning av varmetapstall for bygningen.
- Gjennomgang av soneinndeling med hensyn til inneklimate, tørre/våte sone og korrosjonssikring. Utarbeidelse av korrosjonskart.
- Beskrivelse og skisser/detaljer av utvalgte konstruksjoner og overganger i klimaskall.
- Vurderinger og beskrivelse rundt byggbarhet og luft- og diffusjonstetthet.
- Identifisering av kuldebroer og beskrivelse med skisser.
- Statistiske og dynamiske simuleringer for kondens- og muggvekstrisiko i Ubakus, Flixo og Wufi 2D, samt Wufi Mould Index VTT for utvalgte konstruksjoner, overganger og kuldebroer.

Avgrensninger:

- **Energibruk:** Arbeidet for energibruk begrenser seg til å kun se på U-verdier og varmetapstall for å sikre en akseptabel konstruksjon, og ser ikke på energibruken i kWh/m² eller annen enhet. Energibruk i svømmehaller er svært avhengig av de interne prosessene og det er lite hensiktsmessig å beregne en svømmehall med normerte internlaste opp mot krav i TEK17 i henhold til idrettsbygning.
- **Inneklimate og ventilasjon:** Dette er en stor del av prosjekteringen av svømmehaller, men det er ikke med vurderinger knyttet til ventilasjon og inneklimate i denne oppgaven, foruten noe innledende teori og anbefalinger i forbindelse med minste dimensjonerende utetemperatur for å sløyfe betrykning av vindusflater.
- **Dagslys:** Avgrenses, ingen arbeid på dette foruten om plassering av vinduer blir 0,8 meter over gulv/lysgrav. Svømmehall bygget i massivtre vil ikke ha noen ulemper utover en vanlig svømmehall med tanke på dagslysfaktor. Påvirkning her er i stor grad vinduer, LT, skjerming fra bygninger og refleksjonsfaktorer, samt utforming av rom. Alt dette (foruten refleksjonsfaktor) kan utføres likt for disse bygningene.
- **Klimagassutslipp:** Det var i utgangspunktet tenkt å utføre klimagassberegninger for bygningen og sammenligne dette med tilsvarende bygning utført i betong/stål, men dette avgrenset med hensyn til omfang og tidsbruk.
- **Kostnader:** Det er ikke gjort vurderinger rundt kostnadene til de ulike løsningene som sees på i oppgaven.

Forord

Masteroppgaven «Bygningsfysisk analyse av prefabrikkert svømmehall i massivtre» er avsluttende oppgave for masterprogrammet energi og miljø i bygg - sivilingeniør ved Oslo Met. Oppgaven er planlagt og skrevet våren 2022 og tilsvarer 30 studiepoeng.

Oppgaven tar for seg det bygningsfysiske aspektet av en svømmehall utført med bæresystem av limtre- og massivtrekonstruksjoner og prefabrikkerte isolerte elementer av bindingsverk. Det er utarbeidet en rekke detaljer av utvalgte konstruksjoner og overganger for å sørge for byggbare, robuste og luft- og diffusjonstette løsninger. I tillegg er det gjort både statiske og dynamiske simuleringer for kontroll av kondens- og muggvekstrisiko for utvalgte konstruksjoner, overganger og kuldebroer.

Motivasjonen for oppgaven er å bidra til praktiske løsninger som er tilstrekkelig gode for å ivareta det bygningsfysiske aspektet og dokumentere risikoen for kondens- og muggvekst ved varme- og fukttekniske simuleringer i ulike programvarer av utvalgte konstruksjoner og kuldebroer.

Jeg ønsker å rette en stor takk til min eksterne veileder Bjørn Aas fra Senter for idrettsanlegg og teknologi (SIAT), min interne veileder Wolfgang Kempel fra Multiconsult og Joakim Dørum i Green Advisers for særdeles god oppfølging, bistand, sparring og møter gjennom hele oppgaveskrivingen. I tillegg ønsker jeg å takke min arbeidsgiver Sweco Norge AS for muligheten til å gjennomføre deltidsstudiene ved siden av en ellers hektisk arbeidshverdag, og for hjelp fra gode kollegaer på Oslo-, Hamar- og Sarpsborg-kontoret. Det skal og rettes en takk til Lars Olav Holmen og Magne Agnalt som støttespillere gjennom studietiden og for kvalitetssikring av oppgaven.

Til slutt ønsker jeg å takke min høygravide samboer og kjæreste for støtte og forståelse gjennom de tre årene som har vært.

Ludvig Strand Normann-Hansen



25.05.2022

Sammendrag

Denne studien tar for seg det bygningsfysiske aspektet av en svømmehall utført med bæresystem i limtre- og massivtrekonstruksjoner og prefabrikkerte isolerte elementer av bindingsverk. Forskningspørmålene som besvares kan sees under.

1. Hvilke detaljløsninger sikrer akseptable bygningsfysiske konstruksjoner med hensyn til U-verdi, fuktsikring og kuldebroer?
2. Vil noen konstruksjoner eller kuldebroer ved ulike varme- og fuktsimuleringer medføre utfelling eller høy risiko for kondens og/eller muggvekst?
3. Hvilken plassering av bæresystem i limtre- og massivtrekonstruksjoner vurderes til å gi mest bygningsfysiske fordeler?

I studien er det gjort en bygningsfysisk analyse av en case-bygning. Det er gjort innledende vurderinger for soneinndeling med hensyn til klima- og vannpåkjenning, samt korrosjonssikring. For å sikre et akseptabel klimaskall er det gjort beregning av varmetapstall for bygningen basert på mengder og U-verdier. Det er utarbeidet detaljløsninger av utvalgte konstruksjoner og overganger for å sørge for byggbare, robuste og luft- og diffusjonstette løsninger. Både for tradisjonelle byggemetode med inntrukket bæresystem, men også for løsninger med bæresystem plassert i klimaskallet, som er den foretrukne byggemetoden med hensyn til økonomi og byggbarhet på grunn av skjøter for massivtreelementer og de isolerte bindingsverkselementene. Forutsatt en god utførelse vil detaljer rundt plassering av bæresystemet i klimaskallet være akseptable for å sikre tilstrekkelig lufttetthet.

For å sikre akseptable konstruksjoner uten risiko for utfelling av kondens og/eller muggvekst er det gjort både statiske og dynamiske simuleringer for utvalgte konstruksjoner, overganger og kuldebroer. Statiske simuleringer er gjort i Ubakus og Flixo Energi med dimensjonerende utetemperatur på $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, mens de dynamiske simuleringene er gjort i Wufi 2D og Wufi Mould Index VTT for tre svært ulike klimafilere; Oslo, Bergen og Karasjok. Innvendig svømmehallsklima er satt til lufttemperatur på $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ og 55 % RF for alle simuleringer.

Statiske simuleringer viser at det ikke er behov for bstrykning av vindusflater før utvendig dimensjonerende temperatur kommer under $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. I tillegg er det vist at det ikke er noen risiko for kondens eller muggvekst i standard ytterveggssnitt. Det er også gjort simuleringer knyttet til andre tilhørende overganger og rom. De dynamiske simuleringene viser at dersom bæresystemet plasseres lenger ut i klimaskallet medfører dette mer ustabil klima og høyere risiko for kondens og muggvekst, men det er vist at alle konstruksjoner foruten en uisolert søyle med «worst-case» materiale i Karasjok klima har akseptabel risiko for utfelling av kondens og muggvekst. For søyleplasseringene vil søyle med 50 mm isolasjon på kald side ha muggvekstindeks som i snitt er henholdsvis 25 og 39 % bedre for «worst-case» materiale og ubehandlet treverk for alle 3 klimafilere. Helt inntrukket søyle vil være 39 og 55 % bedre for tilsvarende materialer sammenlignet med uisolert søyle. Den største endringen av disse simuleringene tas ved 50 mm isolasjon på kald side.

English Summary

This study deals with the building physical aspect of a swimming pool made with a load-bearing system in laminated and solid wood constructions and prefabricated half-timbered insulated elements. The research questions that are answered can be seen below.

1. Which detailed solutions ensure acceptable building physical constructions with regard to U-value, moisture protection and cold bridges?
2. Will any constructions or cold bridges in various heat and moisture simulations lead to precipitation or a high risk of condensation and/or mold growth?
3. Which placement of the support system in laminated and solid wood constructions is considered to provide the most building physical benefits?

In the study, a building physical analysis of a case building was made. Initial assessments have been made for zoning with regard to climate and water stress, as well as corrosion protection. To ensure an acceptable climate shell, a calculation has been made of heat loss figures for the building based on quantities and U-values. Detailed solutions of selected constructions and transitions have been prepared to ensure buildable, robust and air- and diffusion-tight solutions. Both for traditional construction method with retracted support system, but also for solutions with support system located in the climate shell, which is the preferred construction method in terms of economy and buildability due to joints for solid wood elements and the insulated half-timbered elements. Provided a good design, details regarding the location of the support system in the climate shell will be acceptable to ensure sufficient air tightness.

To ensure acceptable constructions without the risk of condensation and/or mold growth, both static and dynamic simulations have been performed for selected constructions, transitions, and cold bridges. Static simulations have been done in UbaKus and Flixo Energy with a design outdoor temperature of -25 °C, but the dynamic simulations have been done in Wufi 2D and Wufi Mold Index VTT for three very different climate files; Oslo, Bergen and Karasjok. Indoor swimming pool climate is set to air temperature of 32 °C and 55 % RH for all simulations.

Static simulations show that there is no need for coating of window surfaces before the external dimensioning temperature falls below -30 °C. In addition, it has been shown that there is no risk of condensation or mold growth in standard outer wall sections. Simulations have also been made in connection with other associated transitions and rooms. The dynamic simulations show that if the support system is placed further out in the building skin, this leads to a more unstable climate and a higher risk of condensation and mold growth, but it has been shown that all constructions except an uninsulated column with "worst-case" material in Karasjok climate have acceptable risk of precipitation of condensation and mold growth. For the column locations, a column with 50 mm insulation on the cold side will have a mold growth index that is on average 25 and 39 % better for "worst-case" material and untreated wood for all 3 climate files, respectively. Fully retracted column will be 39 and 55 % better for similar materials compared to uninsulated column. The biggest change of these simulations is taken with 50 mm insulation on the cold side.

Innhold

Oppgavetekst	ii
Nøkkelinformasjon.....	ii
Bakgrunn.....	iii
Mål.....	iii
Metode / Arbeidsoppgaver	iv
Forord	v
Sammendrag	vi
English Summary.....	vii
Innhold.....	viii
Figurliste	x
Tabelliste	xi
1 Introduksjon	1
1.1 Innledning.....	1
1.2 Historikk og dagens bad.....	1
1.3 Motivasjon.....	2
1.4 Tidligere arbeider	2
2 Bakgrunn og teori.....	3
2.1 Bygningsfysikk.....	3
2.1.1 Bæresystem	3
2.1.2 Fukt i bygninger: Diffusjon og luftlekkasjer (konveksjon)	4
2.1.3 Kondens.....	7
2.1.4 Kuldebroer	7
2.1.5 U-verdier og overgangsmotstander.....	9
2.1.6 Massivtreelementer - Egenskaper og oppbygging	9
2.1.7 Fukt i materialer	10
2.1.8 Muggvekst	12
2.1.9 Korrosjonsbeskyttelse.....	13
2.2 Klimaforhold	14
2.3 Svømmehall.....	14
2.4 Krav og metoder	15
2.4.1 Byggteknisk forskrift (TEK17).....	15
2.4.2 Passivhus	16
2.4.3 Dagslys.....	16
2.5 Programvare	17
2.5.1 Simien.....	17
2.5.2 Ubakus	17
2.5.3 Flixo Energy.....	17
2.5.4 Wufi 2D.....	18
2.5.5 Wufi Mould Index VTT	18
2.6 Case-bygning.....	20
2.6.1 Soneinndeling med hensyn til klima og belastning.....	21

2.6.2	Korrosjonskart	24
2.6.3	Utvendig klimaskall.....	25
3	Metoder og materialer	28
3.1	Oppsummering.....	28
3.2	Klimadata.....	30
3.3	Varmetapstall.....	30
3.4	Utvendig klimaskall.....	30
3.4.1	Inndata - Flixo - Gulv mot friluft.....	31
3.4.2	Inndata for beregning av overflatetemperatur på glass - Ubakus	31
3.4.3	Oversikt og inndata - Tak mot friluft.....	32
3.4.4	Oversikt og inndata - Tresøyle i yttervegger	35
3.5	Usikkerhet.....	40
4	Resultater og diskusjon.....	41
4.1	Avgrensninger	41
4.2	Mengdeberegning	41
4.3	Byggteknisk inndata for klimaskall	42
4.4	Varmetapstall.....	43
4.5	Soneinndeling.....	43
4.6	Utvendig klimaskall.....	43
4.6.1	Gulv på grunn.....	45
4.6.2	Sokkel - Overgang gulv/vegg.....	45
4.6.3	Etasjeskillere og gulv mot friluft.....	46
4.6.4	Yttervegger	49
4.6.5	Vinduer	50
4.6.6	Luft- og diffusjonstetthet.....	52
4.6.7	Temperaturprofil i yttervegger	53
4.6.8	Kondensrisiko for glassoverflater	53
4.6.9	Gulv mot friluft - Resultat beregninger	54
4.6.10	Yttertak - Resultat beregninger	55
4.6.11	Søylar i yttervegger - Resultat beregninger	56
5	Konklusjon.....	66
5.1	Videre arbeid.....	67
6	Referanser.....	68
	VEDLEGG.....	70
	Vedlegg A - Plantegninger	71
	Vedlegg B - Inndata gulv mot friluft	74
	Vedlegg C - Inndata yttertak.....	75
	Vedlegg D - Inndata kuldebro søyle	76
	Vedlegg E - U-verdi beregninger.....	80
	Vedlegg F - Fullstendige resultater kuldebro søyle - dynamiske simuleringer	82

Figurliste

Figur 1: Prinsipp for plassering av bæresystem i svømmehaller.....	3
Figur 2: Vanlige fuktkilder og transportformer.....	4
Figur 3: Fukktransport via. diffusjon som følge av forskjeller i vanndamptrykk.....	5
Figur 4: Forskjell i lufttrykk ute og inne på grunn av oppdriftskrefter.....	6
Figur 5: Eksempler på tilslutninger hvor det kan oppstå kuldebroer.....	8
Figur 6: Eksempler på materialbetingede kuldebroer.....	8
Figur 7: Eksempler på geometrisk kuldebro.....	8
Figur 8: Krysslågt element uten kantliming (a) og med kantliming (b).....	9
Figur 9: Prinsipp for massivtreelement yttervegg og isolering.....	10
Figur 10: Eksempel på sorpsjonskurve for furu med densitet 500 kg/m ³	11
Figur 11: Oversikt over fuktopptak i porøse materialer i bygninger.....	12
Figur 12: Forutsetninger for muggsopp.....	12
Figur 13: Relativ muggveksthastighet for vanlige muggsopper.....	13
Figur 14: Krav til netto energibehov (energiramme) for de ulike bygningskategoriene iht. TEK 17.....	15
Figur 15: Minstekrav i henhold til TEK17.....	16
Figur 16: Muggvekstindeks ved trafikklys fra Wufi Mould Index VTT.....	20
Figur 17: Illustrasjon av bygningen.....	21
Figur 18: Mollierdiagram med markering av duggpunktstemperatur ved 32 °C og 55 % RF.....	22
Figur 19: Våt sone (kun dusj - vanlige våtrom) i plan 1.....	23
Figur 20: Våt sone i plan 2 for bassengareal, samt dusjareal.....	23
Figur 21: Prinsipiell føring av stålbasseng.....	24
Figur 22: Korrosjonskart av plan 1 (venstre) og plan 2 (høyre).....	25
Figur 23: Korrosjonskart av plan 3.....	25
Figur 24: Typisk sokkeldetalj.....	26
Figur 25: Illustrasjon av plassering av Oslo (venstre), Bergen (midt) og Karasjok (høyre).....	29
Figur 26: Slagregnsmengder [mm/år] og retninger for de ulike klimafilene.....	30
Figur 27: Illustrasjon som viser konstruksjoner og overganger som er vurdert i klimaskallet.....	31
Figur 28: Prinsippsnitt - Yttertak - Bæresystem i klimaskall (case Y.1).....	32
Figur 29: Prinsippsnitt - Yttertak - Delvis inntrukket bæresystem (case Y.2).....	32
Figur 30: Prinsippsnitt - Yttertak - Inntrukket bæresystem (case Y.3).....	33
Figur 31: Prinsippsnitt - Overgang vegg/tak - Bæresystem i klimaskall (case S.1 og Y.1).....	33
Figur 32: Prinsippsnitt - Overgang vegg/tak - Bæresystem delvis i klimaskall (case S.2 og Y.2).....	34
Figur 33: Prinsippsnitt - Overgang vegg/tak - Inntrukket bæresystem(case S.3 og Y.3).....	34
Figur 34: Søyلة på utsiden av massivtreelement (case S.1).....	35
Figur 35: Søyلة mellom massivtreelement og 50 mm isolasjon i forkant av søyلة (case S.2).....	36
Figur 36: Søyلة inntrukket innenfor klimaskall (case S.3).....	36
Figur 37: Valg av noder for uthenting av informasjon i Wufi 2D for søyلة uten isolasjon.....	38
Figur 38: Valg av noder for uthenting av informasjon i Wufi 2D for søyلة med 50 mm isolasjon.....	38
Figur 39: Valg av noder for uthenting av informasjon i Wufi 2D for inntrukket søyلة.....	38
Figur 40: Oppsummering av sentrale inndata fra manuell mengdeberegning.....	41
Figur 41: Beregnet varmetapstall for bygningen med NKV lik 0,08 W/m ² K.....	43
Figur 42: Prinsippsnitt av de to sokkelløsningene.....	44
Figur 43: Utklipp fra IFC-modell som viser gulv på grunn.....	45
Figur 44: Oppbygging av gulv på grunn.....	45
Figur 45: Prinsippsnitt sokkel med luftet betongbrystning og ingen ringmur.....	46
Figur 46: Prinsippsnitt - Overgang etasjeskiller/vegg ved bæring.....	47
Figur 47: Prinsippsnitt - Overgang etasjeskiller/vegg uten bæring.....	47
Figur 48: Plassering av gulv mot friluft.....	48
Figur 49: Prinsippsnitt - Overgang etasjeskiller/vegg ved gulv mot friluft.....	49
Figur 50: Prinsippsnitt - Yttervegger mot det fri.....	50
Figur 51: Prinsippskisse vindusinnsetting vanlig rom.....	51
Figur 52: Prinsippskisse vindusinnsetting svømmehall.....	52
Figur 53: Temperaturprofil i yttervegg ved standard snitt.....	53

Figur 54: Temperaturfordeling over glass.....	54
Figur 55: Flixo simulering av gulv mot friluft og dimensjonerende utetemperatur på -25 °C	54
Figur 56: Simulering for yttertak med takdragere plassert likt med ytterkant isolasjon.....	55
Figur 57: Simulering for yttertak med takdragere delvis inntrukket (200 mm).....	55
Figur 58: Simulering for yttertak med takdragere helt inntrukket.....	55
Figur 59: Resultater fra simulering for søyle uten isolasjon på kald side og DUT -25 °C	56
Figur 60: Resultater fra simulering for søyle med 50 mm isolasjon på kald side og DUT -25 °C	57
Figur 61: Resultater fra simulering for søyle med inntrukket bæresystem	57
Figur 62: Sammenstilt linjediagram for temperatur i kritisk punkt for case S.1	58
Figur 63: Sammenstilt linjediagram for relativ luftfuktighet i kritisk punkt for case S.1	59
Figur 64: Sammenstilt linjediagram for temperatur i kritisk punkt for case S.2	59
Figur 65: Sammenstilt linjediagram for relativ luftfuktighet i kritisk punkt for case S.2	60
Figur 66: Sammenstilt linjediagram for temperatur i kritisk punkt for case S.3.....	60
Figur 67: Sammenstilt linjediagram for relativ luftfuktighet i kritisk punkt for case S.3	61
Figur 68: Resultater fra S.1 - Massivtreelementer.....	62
Figur 69: Resultater fra S.1 - «worst-case» materiale.....	62
Figur 70: Resultater fra S.2 - Massivtreelementer.....	63
Figur 71: Resultater fra S.2 - «worst-case» materiale.....	63
Figur 72: Resultater fra S.3 - Massivtreelementer.....	64
Figur 73: Resultater fra S.3 - «worst-case» materiale.....	64
Figur 74: Sammenstilling av maks muggvekstindeks i løpet av 5 års simulering.....	65

Tabelliste

Tabell 1: Vanndampmotstand og Sd-verdi for et utvalg materialer	7
Tabell 2: Varmeovergangsmotstander i henhold til NS-EN ISO 6946.....	9
Tabell 3: Aktuelle korrosivitetskategorier og eksempel på typiske miljøer.....	13
Tabell 4: Krav til vanntemperaturer fra Norsk svømmeforbund.....	14
Tabell 5: Minstekrav til passivhus iht. NS 3701.....	16
Tabell 6: Transportmekanismer i Wufi 2D.....	18
Tabell 7: Variabler i ligning til VTT.....	19
Tabell 8: Sensitivitetsklasser for muggvekst.....	19
Tabell 9: Muggvekstindeks iht. VTT-modell.....	20
Tabell 10: Forutsatt dimensjonerende inneklime (temperatur og RF)	21
Tabell 11: Miljøklasser for ulike soner	24
Tabell 12: Dimensjonerende verdier for klimaer benyttet i dynamiske simuleringer	30
Tabell 13: Relevant materialdata som er benyttet i Flixo ved gulv mot friluft.....	31
Tabell 14: Materialinformasjon til glass	32
Tabell 15: Mest relevant materialdata som er benyttet i Flixo for yttertak.....	35
Tabell 16: Mest relevant materialdata som er benyttet i Flixo for søyler	37
Tabell 17: Mest relevant materialdata som er benyttet i Wufi 2D simuleringer	37
Tabell 18: Grenseverdier for muggvekstindeks som er valgt for konstruksjonen.....	39
Tabell 19: Materialelegenskapene massivtreelement for simulering av muggvekstindeks i VTT	39
Tabell 20: Materialelegenskapene til «worst-case» for simulering av muggvekstindeks i VTT	39
Tabell 21: Forutsetninger for konstruksjoner i klimaskall.....	42

1 Introduksjon

1.1 Innledning

Svømmehaller har et svært krevende inneklima, med høye temperaturer, høy fuktbelastning og en atmosfære som er forurenset med nødvendige klorider fra vannbehandling.

Det bygningsfysiske aspektet er dermed en stor del av prosjekteringen av svømmehaller, og er svært viktig for å forebygge byggskader som følge av fukt og råte. Innvendige overflater og konstruksjoner må prosjekteres for å tåle store påkjenninger [1]

Bygningen som er utgangspunktet for oppgaven er tenkt oppført i limtre- og massivtrekonstruksjoner, og prefabrikkerte, isolerte bindingsverkselementer. Denne byggemetoden vil kunne medføre reduserte byggekostnader og vil sikre en effektiv byggeprosess på byggeplassen.

For å sikre at bygningen utføres med konstruksjoner og overganger som tilfredsstillende nødvendige krav til byggbarhet, robusthet, luft- og diffusjonstetthet er det gjort en bygningsfysisk analyse av bygningen.

1.2 Historikk og dagens bad

Den første offentlige svømmehallen som ble åpnet i Norge var Bislett bad i Oslo. Bislett bad var ferdigstilt i 1920 og ble åpnet i 1921. Bislett bad ble et andregenerasjonsbad, der fokus ikke lenger bare var kroppsvask og hygiene, men også innendørs fritidsaktivitet og svømmeopplæring.

Fram til andre verdenskrig ble det bygget 14-15 offentlige svømmehaller på landsbasis. Svømmehaller var generelt ikke prioriterte bygg i tidsperioden.

På bakgrunn av at vi fra 1960-tallet gikk inn i en tidsepoke som økonomisk sett var bedre enn tidligere ble det omfattende utbygging i kommunene som også innebar svømmehaller. Bakgrunnen var at svømmeferdighetene til skolebarn var svært lave. Det ble innarbeidet støtteordning fra daværende Statens ungdoms- og idrettskontor (STUI) ved at STUI dekket 1/3 av kostnadene ved oppføring av anlegg for svømmeopplæring.

Dette bidro til at det fra 1960 til 1990 ble bygget svært mange bade- og svømmeanlegg. Iht. Håndbok 52 som har innhentet data fra Kultur- og kirke departementets register for idrettsanlegg og spillemiddelsøknader (KRIS) ble det bygget i snitt 25 bade- og svømmeanlegg årlig i denne 30-årsperioden. Dette resulterte i at man i 1990 hadde 800 offentlige bade- og svømmeanlegg i Norge.

Utbyggingskurven har etter dette flatet ut og i 2004 var det i overkant av 1200 offentlige bade- og svømmeanlegg [1]

Den første tiden under storutbyggingen mellom 1960 til 1990 var fokuset på behov for svømmeopplæring. Det ble derfor mange skolebad med 12,5 meters basseng. Behovet for folkebad og idrett økte utover og det ble også bygget 25 meters basseng, samt noen færre 16,67 meters basseng. Det ble også bygget 3 stk. 50 meter basseng fra 1970-1990. Bassengmålene i perioden var også preget av at det var noen udiskutable krav som lå til grunn for støtteordning fra STUI. Bassenget skulle være rektangulært, bredden skulle kunne delelig med 2 meter, lengden skulle x antall ganger utgjøre 100 meter, minstedybden skulle være 0,9 meter og bassengtemperaturen skulle være 24 °C [1].

Fra 1970 kom det også en ny form for fritidsbad og varmtvannsbassenger. Det ble bygget 25 institusjoner for personer med funksjonshemninger, badene hadde vanntemperaturer fra 32 °C. I tillegg ble det etter hvert vanlig å varme opp andre eksisterende bade- og svømmeanlegg til 32 °C en gang i uka. Dette var også populært for de vanlige besøkende og i 1980 hadde de fleste offentlige bassenger økt temperaturen til 28 °C. Høyere temperatur medførte økt behov for planlegging for å unngå fuktskader.

Denne perioden tok også med seg tredjegerasjonsbadene. Dette var bad der fokusområdene ble barn, unge og familier. Badene inneholdt vannsklier, kanaler, bølgebasseng, klatrevegger, ulike bassenger i ulike størrelser, boblebad og ulike dybder. Fordelene med disse badene var at de kunne tilfredsstillende

flere krav enn tidligere, og kunne i tillegg til svømmeopplæring og svømmetrening fungere som bad for familier, funksjonshemmede, samt babysvømming. Dette ga en bedre driftsøkonomi for badene.

Den økte vanntemperaturen, samt strengere krav til energieffektivitet medførte at det er blitt nødvendig å rehabiliterer flere av anleggene fra 1980-tallet og tidligere [1].

Aftenposten skrev i 2020 at «*hundrevis av svømmehaller står tomme i Norge*» [2] og ved starten av 2020 var det rundt 850 offentlige svømmeanlegg [3], noe som tyder på at flere av badene som er bygget i perioden mellom 1960-1990 er ute av drift eller stengt. Gjennomsnittet av dagens bad er 37 år gamle og rundt 450 svømmeanlegg opererer med utdatert teknologi. Likevel har Norge fortsatt et stort antall bade- og svømmeanlegg sammenlignet med befolkningsstørrelsen [4].

Energikostnadene ved svømmehaller er langt høyere enn for andre bygningskategorier, og det øker for nye svømmehaller [5].

1.3 Motivasjon

Oppgaven er stilt fra Senter for idrettsanlegg og teknologi (SIAT) [6]. SIAT har i løpet av de siste 10 årene blant annet utført flere oppgaver for å belyse det faktum at det bør stilles andre krav enn dagens energikrav når det kommer til idrettsbygninger, og herunder særskilt svømmehaller. Dagens krav i henhold til Byggteknisk forskrift (TEK17) knyttes ikke opp mot varmegjenvinning av gråvannsvarme og fordampningsvarme. Det er heller ingen utvidede U-verdi krav i klimaskall eller krav for begrensning av vannbruk [3]. Studiene som utføres fra SIAT er viktige for å belyse temaet rundt energibruk i svømmehaller og for å bidra til å endre trenden om økt energibruk for nyere svømmehaller [3].

Min motivasjon for oppgaven er å bidra til praktiske og tilstrekkelige gode løsninger for å ivareta det bygningsfysiske aspektet for en standardisert svømmehall utviklet av SIAT i samarbeid med Green Advisers AS.

Bygningsfysikk er sentralt når det kommer til å sikre svømmehaller mot fuktskader som følge av kondensproblemer. Ved utviklingen av en standardisert løsning med bruk av massivtreelementer, prefabrikkerte isolerte bindingsverk elementer, samt bæresystem plassert i klimaskallet er det svært viktig å gjennomgå og analysere de ulike konstruksjonsoppbyggingene og overgangene for å sikre byggbare, robuste og luft- og diffusjonstette løsninger som ikke innebærer risiko for kondens eller muggvekst. I tillegg til beskrivelse og detaljering innebærer oppgaven å dokumentere risikoen for kondens- og muggvekst ved varme- og fukttekniske simuleringer i ulike programvarer av kritiske utvalgte snitt. Både for statiske og dynamiske forhold med ulike klimafilere.

1.4 Tidligere arbeider

Håndbok 52 [1] utarbeidet av Trond Bøhlerengen og Frank Henning Holm i 2004 inneholder svært mye beskrivelse rundt bade- og svømmeanlegg, samt de typiske problemområdene. Det er ved store deler av teorikapittelet tatt utgangspunkt i litteratur fra denne boken. For massivtreelementer og sperresjikt er det gjort flere studier og det er hentet inn en del informasjon fra SINTEF sin prosjektrapport 81 [7].

Det er hentet inspirasjon fra flere Byggdetaljblader fra SINTEF Byggforsk kunnskapssystemer i forbindelse med beskrivelser og utarbeidelse av detaljer.

Senter for idrettsanlegg og teknologi (SIAT) har gjort flere studier rundt energibruk i svømmehaller, samt i forbindelse med de kravene som er satt til energibruk. Det er også utført oppgaver i forbindelse med ventilasjon og inneklima i svømmehaller.

Flere av detaljovergangene baserer seg på byggemetoden til Green Advisers for prefabrikkerte bygninger med massivtreelementer og isolert bindingsverkselementer.

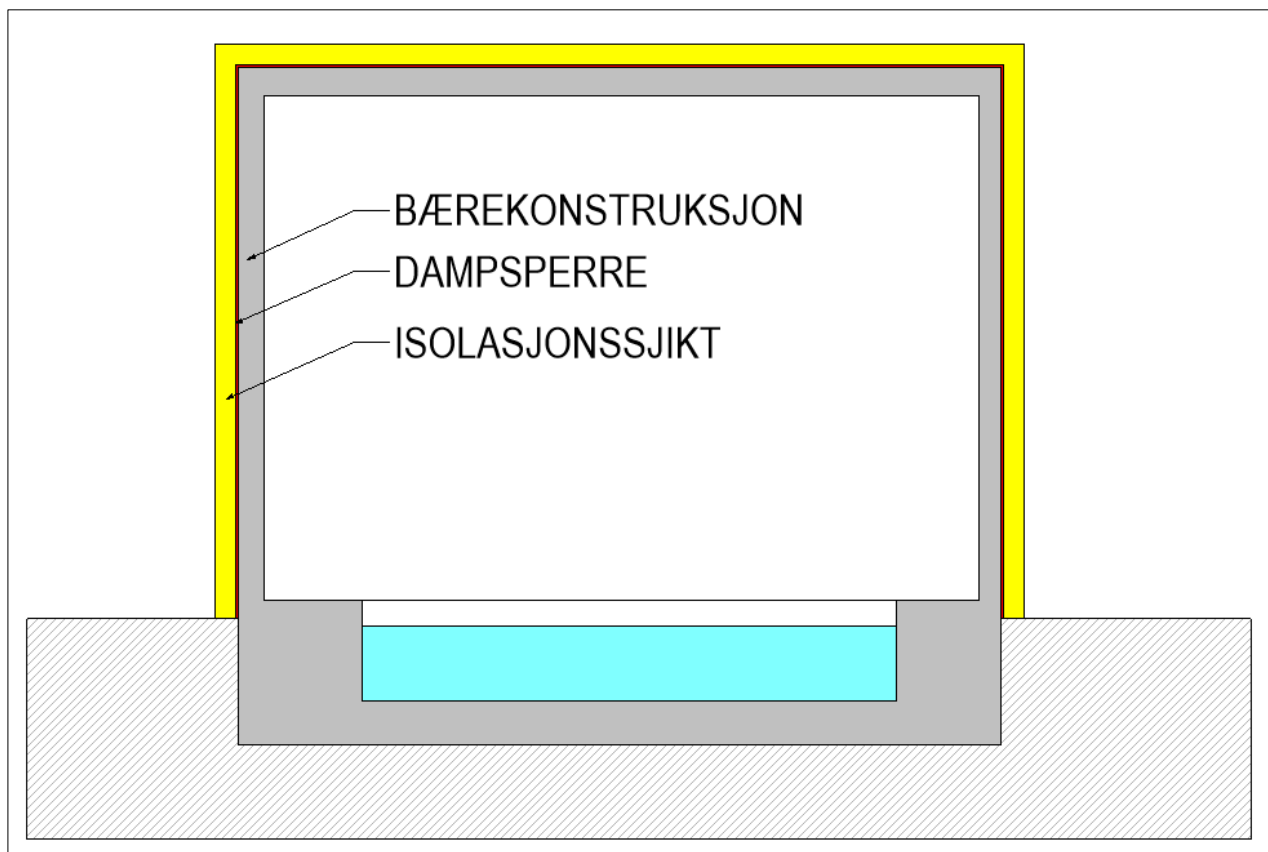
2 Bakgrunn og teori

2.1 Bygningsfysikk

Bygningsfysikk omhandler det ytre og indre klimaets påvirkning på konstruksjonen. Hovedområdene oppsummeres gjerne som varme-, luft- og fukttransport og materialbruk [8].

2.1.1 Bæresystem

Det er anbefalt for bade- og svømmeanlegg at bæresystem plasseres i sin helhet innenfor klimaskallet, slik at både dampsperre og isolasjonssjikt kan føres kontinuerlig på utsiden. Prinsipp er vist i Figur 1.



Figur 1: Prinsipp for plassering av bæresystem i svømmehaller. Tegnet i Revit basert på skisse i Håndbok 52 [1].

Fordelene med å gjøre det slik er at det sørger for et kontinuerlig dampsperrsjikt som også på en god måte kan gjennomføres tett i overgang vegg/tak. Hele bæresystemet havner også på varm side og kuldebroer med nedsatte overflatetemperaturer reduseres.

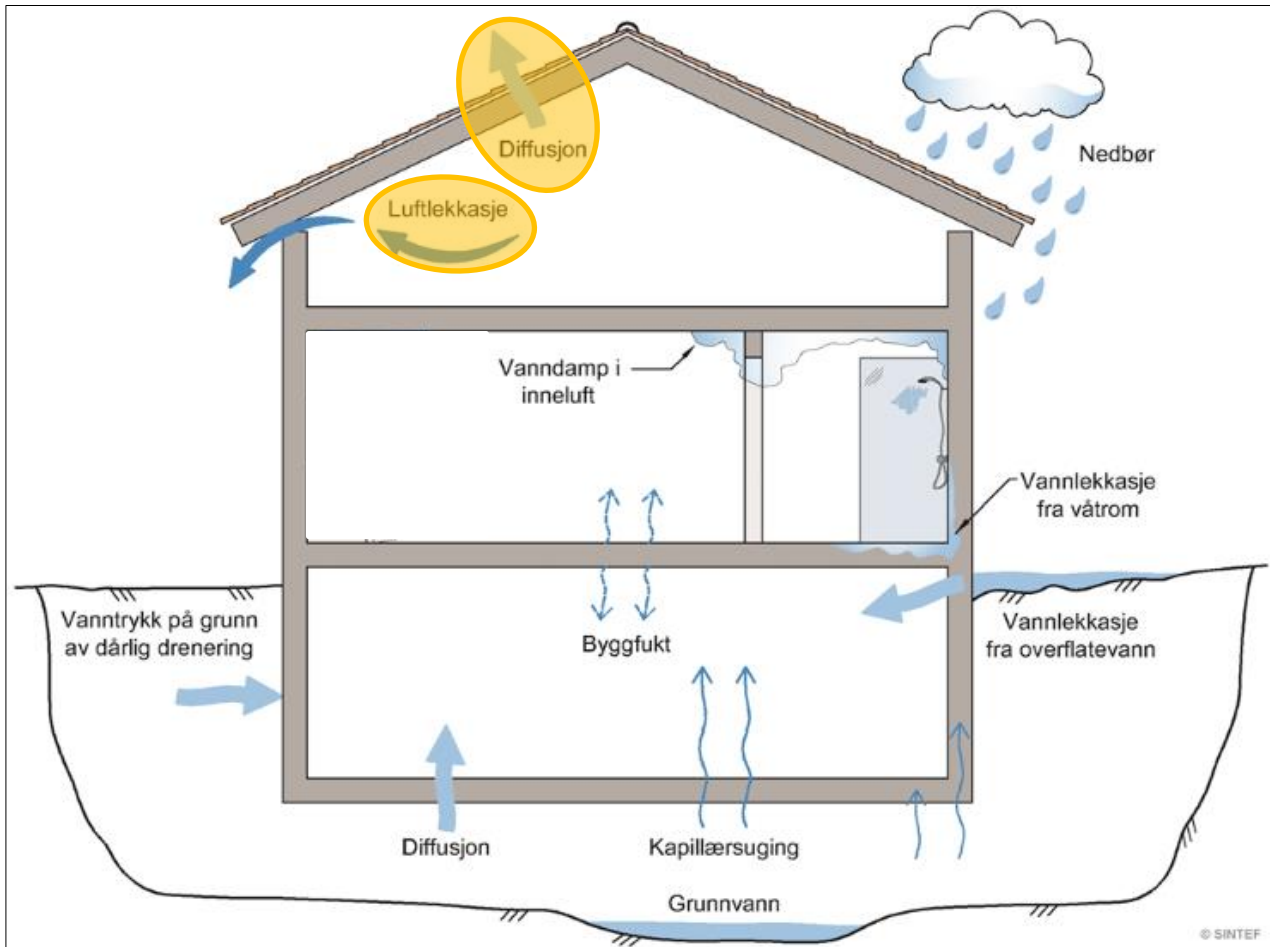
Bæresystemet vil ha stabile forhold ved denne plasseringen.

For valg av type bæresystem så anbefales det å benytte tunge, kompakte konstruksjoner for å enklere kunne få til en lufttett konstruksjon [1].

En relativt vanlig bærekonstruksjon for å bidra til å sikre lufttett konstruksjon, kontinuerlig sperrsjikt og utenpåliggende isolasjon er plasstøpt betong.

2.1.2 Fukt i bygninger: Diffusjon og luftlekkasjer (konveksjon)

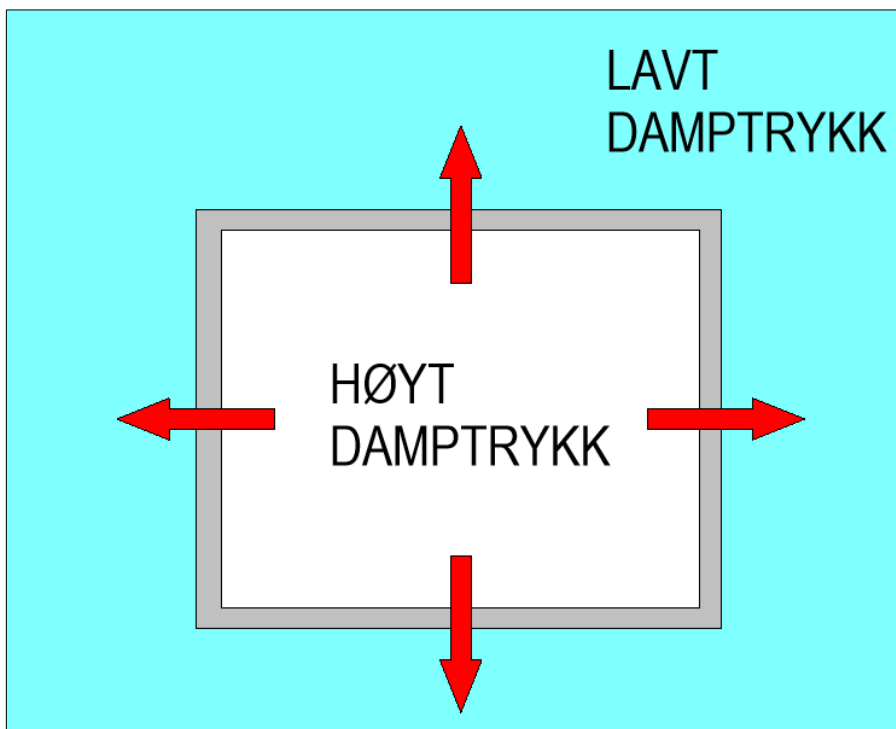
En oppsummering av de vanlige fuktkildene i bygninger kan sees i Figur 2 [9].



Figur 2: Vanlige fuktkilder og transportformer, oransje markerer fukttransport fra innvendig side via diffusjon og/eller luftlekkasjer (figur er modifisert) [9].

For svømmehaller så har ikke disse noen høyere påkjenning enn vanlige bygninger fra utvendig side, men skiller seg ut ved at de har rom med konstant høy fuktbelastning i kombinasjon med høy temperatur. Dette medfører at bade- og svømmeanlegg har svært høyt fuktinnhold i gram vann per m^3 romluft sammenlignet med andre rom og utelufta. De vanligste skadene i klimaskallet i svømmehaller kommer derfor fra fukttransport fra innvendig side (diffusjon og/eller luftlekkasjer) [1].

Fukttransport via **diffusjon** oppstår som følge av forskjeller i vanndamptrykk (N/m^2 eller Pa) og vil alltid medføre transport fra det stedet med høyest vanndamptrykk til stedet med lavere vanndamptrykk. For svømmehaller som har mye tilført fuktighet som følge av fordampning fra bassenger og våte flater vil vanndamptrykket inne i våtsonene i svømmehallen nesten alltid ha høyere vanndamptrykk enn utelufta og tilstøtende tørre rom. Siden vanndamptrykket er en funksjon av temperatur og fuktighet i lufta er det også slik at diffusjon i praksis skjer fra side med høy temperatur til side med lav temperatur [1]. Prinsipp er vist i Figur 3.



Figur 3: Fukttransport via. diffusjon som følge av forskjeller i vanndamptrykk (utrykk for luftas fuktinnhold). Tegnet i Revit basert på skisse i Håndbok 52 [1].

For å hindre fukttransport via. diffusjon må det legges inn et diffusjonstett sjikt (dampsperre) for klimaskall mot uteluft, men også mot tilstøtende rom om temperaturen der er lavere enn duggpunktstemperaturen til romlufta i svømmehallen.

I vanlige bygninger er anbefalt diffusjonsekvivalent luftlagstykkelse (S_d -verdi) minimum 10 meter. For svømmehaller er anbefalt S_d -verdi minimum 50 meter. Dette er som følge av at vanninnhold og vanndamptrykket vil være nesten tre ganger høyere enn vanlig bygninger og kan komme opp i henholdsvis 20 g/m^3 og 2700 Pa [1]. Til sammenligning vil det for en vanlig bolig på vinterstid forutsatt 22°C og 20-40% RF være fra $3,9\text{-}7,8 \text{ g/m}^3$ og $470\text{-}935 \text{ Pa}$.

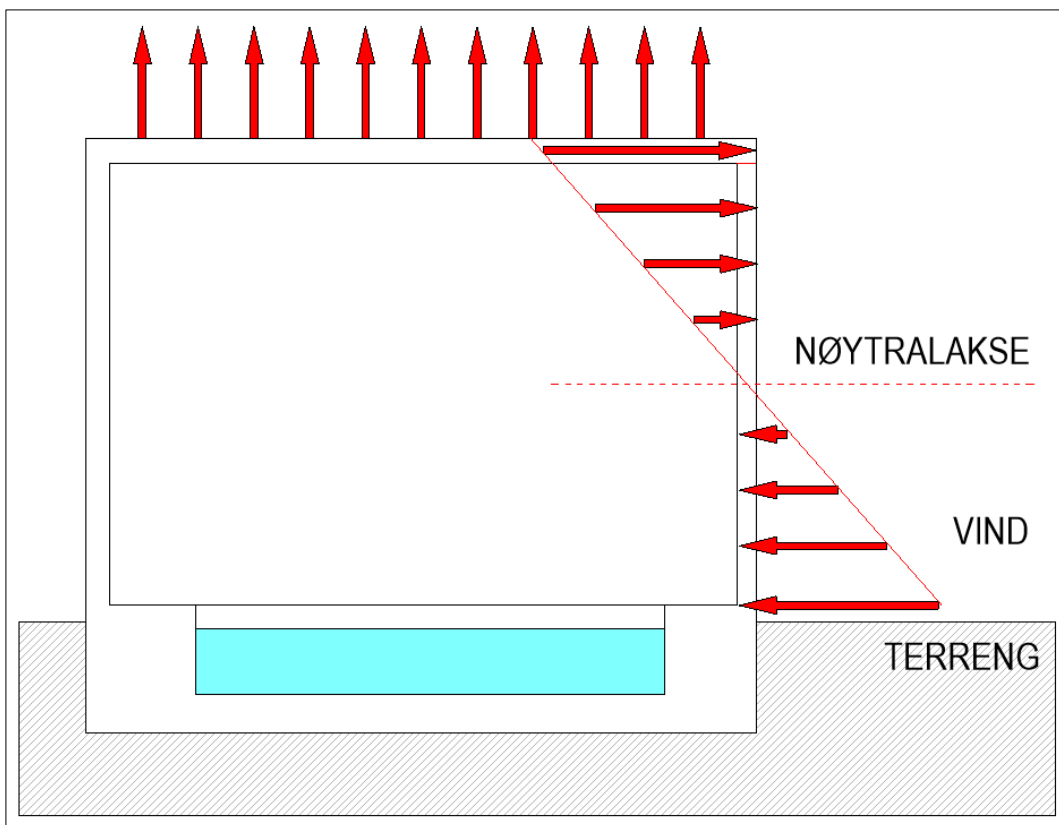
Fukttransport via. diffusjon skjer langsamt og er en funksjon av tid, damptrykkforskjell, areal av flate og samlet vanndampmotstand til materialene. Dette betyr at utettheter i det diffusjonstette sjiktet har svært liten praktisk betydning med hensyn fuktmengden som vil bli transportert gjennom de små åpningene. Arealet er så forsvinnende lite i forhold til totalt overflateareal.

Luftrykk påvirker ikke vanndamptrykket. Så selv om det er forskjeller i luftrykk (over- eller undertrykk) vil ikke det påvirke vanndampdiffusjonen. Det vil fortsatt oppstå diffusjon selv med undertrykk.

Derimot vil både utettheter i diffusjonssjiktet og forskjeller i luftrykk påvirke fukttransporten som skjer via. **luftlekkasjer** (også kalt konveksjon). Luftlekkasjene er avhengig av begge disse forutsetningene, om enten utettheter eller trykkforskjellene fjernes vil det ikke oppstå fukttransport som følge av luftlekkasjer.

Sammenlignet med diffusjon kan luftlekkasjer i løpet av kort tid transportere store mengder med fuktig luft selv bare ved små utettheter.

Det kan alltid forutsettes at det er forskjellig luftrykk mellom ute og inne på grunn av når temperaturen inne er høyere enn ute vil varm luft stige og skape et overtrykk i øvre del av bygningen (skorsteinseffekten), se Figur 4 for illustrasjon [1].



Figur 4: Forskjell i lufttrykk ute og inne på grunn av oppdriftskrefter («skorsteinseffekten»). Tegnet i Revit basert på skisse i Håndbok 52 [1].

I svømmehaller er det vanlig å prosjektere ventilasjonsanlegget slik at avtrekket er større enn tilluft som vil redusere lufttrykket i svømmehallen. Dette hever da nøytralaksen som vist i Figur 4. Selv om det prosjekteres med undertrykk vil trykkforholdene medføre at fukttransport fra luftlekkasjer fra innvendig side kan oppstå hele året. Det er svært viktig å sørge for god lufttetting med å unngå utettheter i klimaskallet ved diffusjonstett sjikt (dampsperre). I tillegg til fare for fuktskader medfører utetthetene også er stort varmetap. For å sørge for god lufttetting må det benyttes dampsperre på varm side og vindsperre på kald side. Praksisen er at antall og utførelsen av skjøtene er svært viktig for tettheten med hensyn til luftlekkasjer [1].

Oppsummert har dampsperreresjiktet to funksjoner og det er å ivareta tilstrekkelig diffusjonstetthet og lufttetthet.

Anbefalingen iht. Håndbok 52 er at det monteres en solid dampsperre av enten PVC-folier eller asfalttakbelegg i svømmehaller. I tillegg til tilstrekkelig diffusjonstetthet vil de sveisede skjøtene bidra til god lufttetthet. I vegger kan eventuelt 0,20 mm polyetylenfolie (PE-folie) benyttes, men da anbefales det at skjøtene varmlufts-sveises eller limes og klemmes med separate skrudedde klemlister. En oversikt over typiske vanndampmotstander og S_d -verdier til de ulike materialene kan sees i Tabell 1 [10].

Tabell 1: Vanndampmotstand og S_d -verdi for et utvalg materialer [10].

Materiale	Tykkelse [mm]	Vanndampmotstand, Z_p [$10^9 \text{ m}^2 \text{ sPa/kg}$]	Ekvivalent luftlags-tykkelse / s_d -verdi [m]
Anbefalt krav til vindsperrer generelt		$\leq 2,5$	$\leq 0,5$
Gipsplate GU	9,5	0,3 - 0,5	0,05 - 0,12
Plastfiberduk av polyetylen (Vindsperre rullprodukt)	-	0,13	0,025
Anbefalt krav til dampperre i bade- og svømmeanlegg		≥ 250	≥ 50
(Anbefalt krav til dampperre generelt)		≥ 50	≥ 10
Asfaltbelegg med stamme av polyesterfilt		514	100
Polyetylenfolie	0,15 0,20	360 450	70 90
PVC takfolie	1,2 1,5 2,0-2,4	113-118 133-143 184-190	22-23 26-28 36-37

2.1.3 Kondens

Vanndamp i luft vil utfelles som kondens dersom luft treffer en flate der flatens temperatur er lik eller lavere enn duggpunktstemperaturen til luften. Duggpunktstemperaturen bestemmes av temperatur og relativ luftfuktighet (RF) i luften [11]. Den største årsaken til kondens er vanligvis høy luftfuktighet i kombinasjon med lave overflatetemperaturer [12].

For romluft som lokalt blir avkjølt mot en kald overflate, «*øker RF ved overflaten etter hvert som temperaturen synker, til den når 100 % ved luftas duggpunktstemperatur*» [13].

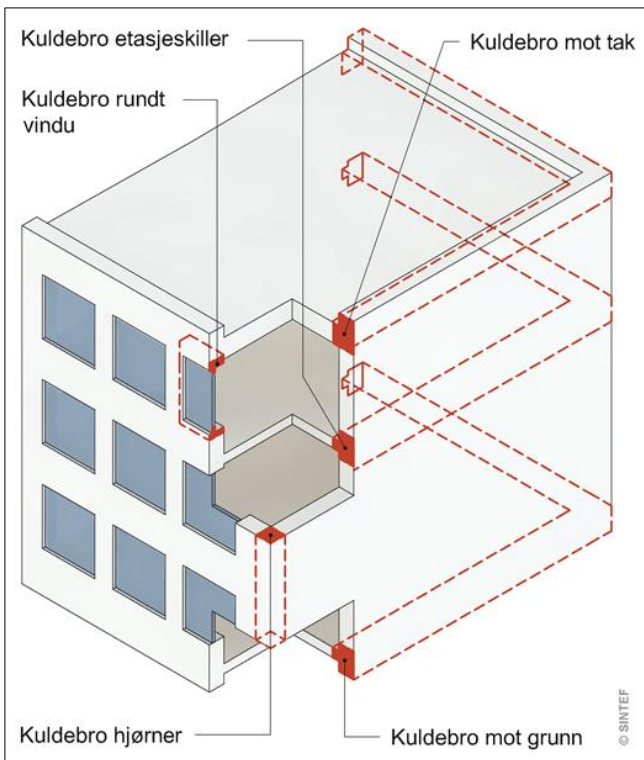
Både fuktransport ved diffusjon og luftlekkasjer (konveksjon) kan medføre kondens i konstruksjoner.

Dersom vanndampen kondenserer på flater med temperatur lavere enn $0 \text{ }^\circ\text{C}$ blir kondensen rim eller is [13].

2.1.4 Kuldebroer

En kuldebro er et område som har økt varmetap i tilslutninger mellom to eller flere bygningsdeler [14]. Kuldebroer har stor risiko for utfelling av kondens på grunn av at de får lavere temperatur enn de omkringliggende konstruksjonene [11].

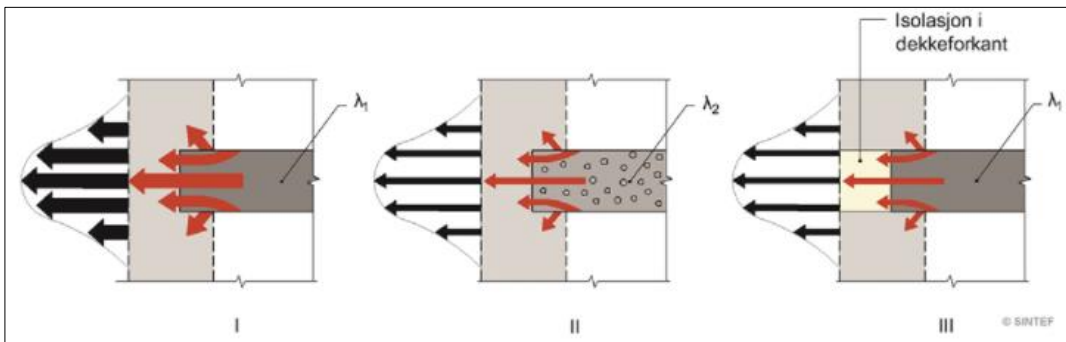
Varmetapet gjennom en kuldebro er ikke det samme som klimaskjermens U-verdi. Eksempler på tilslutninger hvor det kan oppstå kuldebroer kan sees i Figur 5.



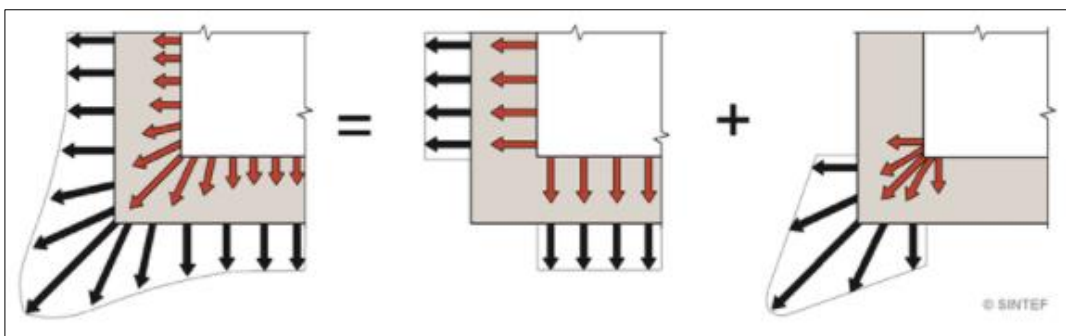
Figur 5: Eksempler på tilslutninger hvor det kan oppstå kuldebroer. Hentet fra Byggforskblad 472.001.[14]

De to hovedårsakene til kuldebroer er materialbetinget eller geometrisk kuldebro.

Materialbetingede kuldebroer er der klimaskjermen gjennomtrenges helt eller delvis av materialer med en annen varmekonduktivitet (varmeledningsevne), mens geometriske kuldebroer er der det er forskjell mellom arealet på innvendige og utvendige overflater. Illustrasjon av både materialbetingede og geometriske kuldebroer kan sees i Figur 6 og Figur 7.



Figur 6: Eksempler på materialbetingede kuldebroer. Hentet fra Byggforskblad 472.001.[14]



Figur 7: Eksempler på geometrisk kuldebro. Hentet fra Byggforskblad 472.001.[14]

Videre er det to ulike typer kuldebroer og det er lineære kuldebroer og punktkuldebroer. Lineære kuldebroer vil typisk kunne være langs en etasjeskiller eller rundt vinduer, mens punktkuldebro f.eks. kan være en søyle gjennom klimaskillet. For energitap så er lineære kuldebroer mest av betydning, men for overflatekondens eller termisk ubehag er også punktkuldebroer vesentlige.

2.1.5 U-verdier og overgangsmotstander

U-verdier (varmegjennomgangskoeffisient) er et mål på hvor enkelt en konstruksjon/bygningsdel slipper gjennom varme [15].

Formel for U-verdi er:

$$U = \frac{1}{R_{tot}} + \Delta U$$

R_{tot} er total varmemotstand og inkluderer i tillegg til varmemotstanden til de ulike materialsjiktene også innvendige og utvendige overgangsmotstander.

En oversikt over de ulike overgangsmotstandene iht. NS-EN ISO 6946 kan sees i Tabell 2.

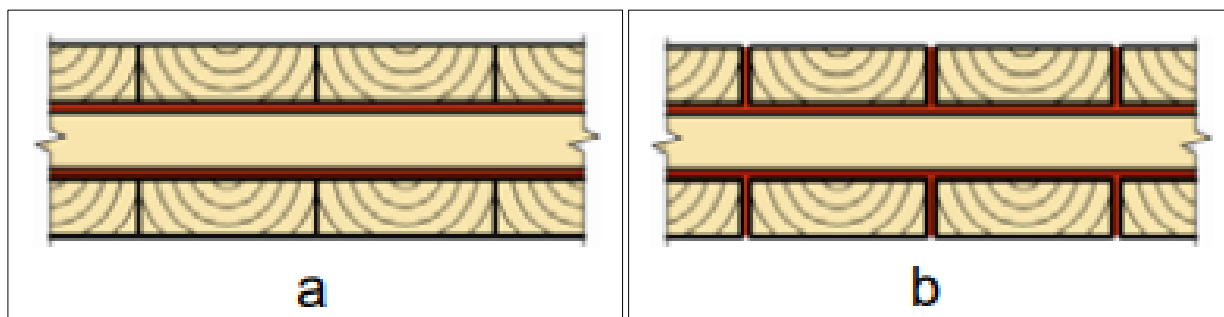
Tabell 2: Varmeovergangsmotstander i henhold til NS-EN ISO 6946 [16].

Overflate	Varmeovergangsmotstand (m^2K/W) Varmestrømsretning		
	Oppover	Horisontalt	Nedover
Innvendig (R_{si})	0,10	0,13	0,17
Innvendig (R_{se})	0,04	0,04	0,04
Utvendig, inkludert ventilert kledning	0,10	0,13	0,17

2.1.6 Massivtreelementer - Egenskaper og oppbygging

Massivtreelementer er lameller satt sammen til elementer ved bruk av spiker, skruer, tredybler, lim eller stålsag. Tresorten som vanligvis benyttes er gran eller furu, men yttersjiktene kan også bestå av treslag som furu, osp, bjørk eller eik. Elementene kan benyttes som bærende eller ikke-bærende elementer i gulv, vegger og tak. Hovedkategoriene er kantstilte eller krysslagte elementer. Tykkelsen på elementene varierer typisk fra 60-240 mm [17].

Limede massivtreelementer kan utføres med eller uten kantliming. For kantlimte elementer er lamellene limt på alle fire sider, mens uten kantliming er lamellene kun sammenlimt på flaksen (flatsiden), se Figur 8 [7].



Figur 8: Krysslagte element uten kantliming (a) og med kantliming (b) [7].

I prosjektrapport utarbeidet av Sintef Byggforsk ble det vist at luftlekkasjene i en massivtrekonstruksjon uten kantliming grovt sett er dobbelt så store som for massivtrekonstruksjonen med kantliming [7].

Det er svært variable verdier for vanddampmotstandsfaktor for massivtreelementer på grunn av at summen av vanddampmotstanden utgjøres av både trelamellene og limsjiktene.

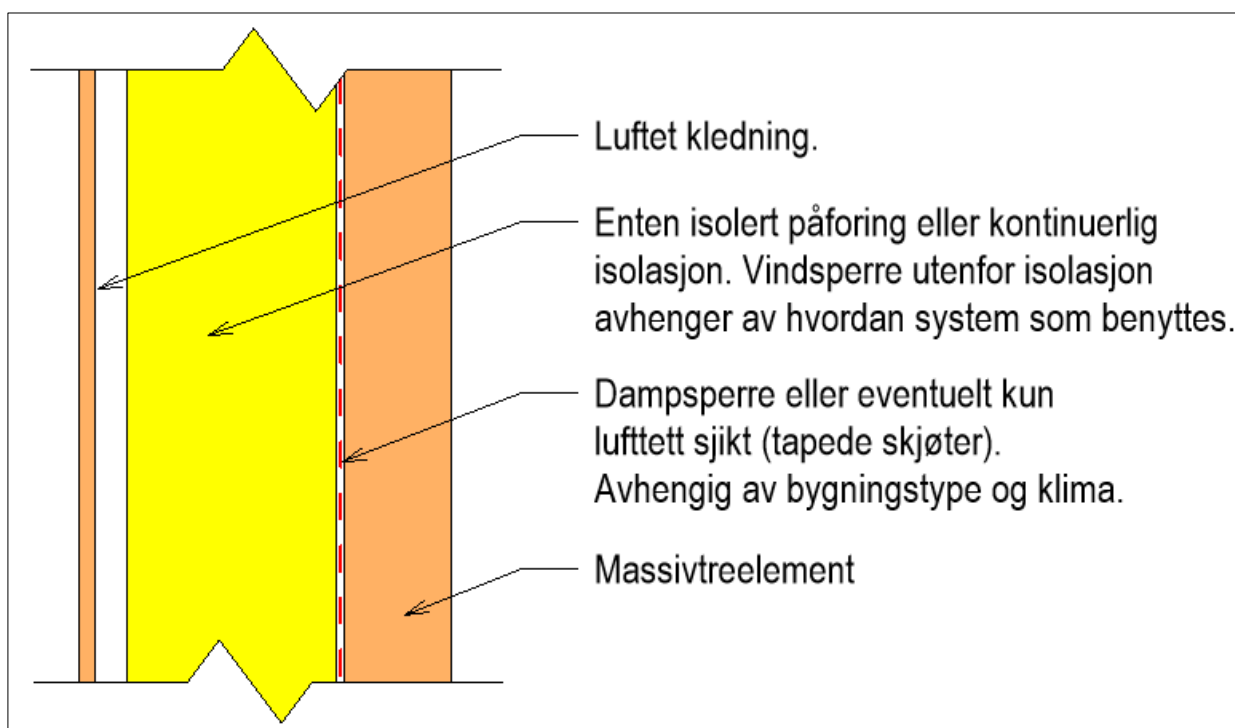
Furu og gran vil på tvers av fiberretningen ha en vanddampmotstandsfaktor, μ fra 29-130 mellom 35-70 % RF. Det vil si en S_d -verdi (ekvivalent luftlagstykkelse) på 2,9 - 13 meter for tykkelse 100 mm ($S_d = \mu \cdot d$) [10].

Selv om massivtreelement på 100 mm (trevirke i kombinasjon med lim) har tilstrekkelig vanddampmotstand til å forhindre oppfukning av konstruksjonen ved diffusjon i normalt fuktbelastede bygninger er vurderingen til SINTEF Byggforsk at det på varm side av massivtrekonstruksjonen må være et damptett og lufttett sjikt som hindrer fuktig luft å trenge ut i konstruksjonen ved luftlekkasjer eller diffusjon. For normalt fuktbelastede bygninger er dampsperre i konstruksjonen med S_d -verdi på 10 meter eller mer en fuktsikker løsning [7].

For svømmehaller anbefales det som nevnt en S_d -verdi på minimum 50 meter [1].

Det er viktig å unngå oppfukning av elementer under byggeperioden. Eksponerte overflater bør ha fuktinnhold mellom 8-12 % i yttersjiktet mot varm side [17].

Yttervegger med massivtreelementer vil normalt bygges opp med en utenpåliggende isolasjon av enten en isolert påføring eller en homogen (kontinuerlig) trykkfast isolasjon. Prinsipp kan sees i Figur 9.

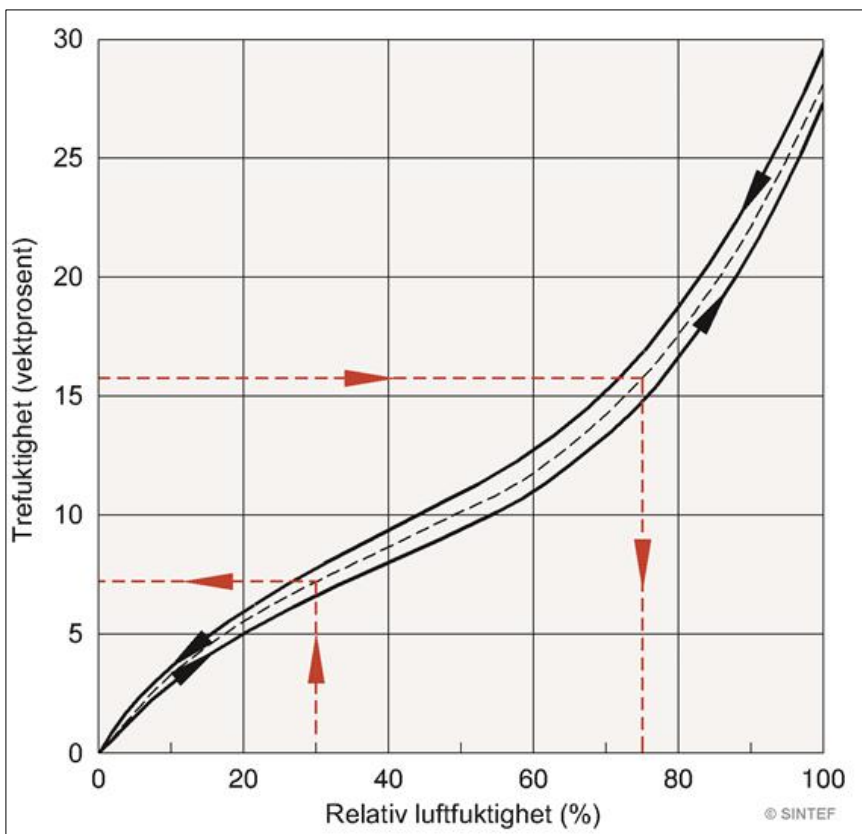


Figur 9: Prinsipp for massivtreelement yttervegg og isolering. Tegnet i Revit.

2.1.7 Fukt i materialer

I materialer angis fuktinnhold som absolutt fuktinnhold eller som relativ luftfuktighet (RF) i porelufta inne i materialene. Absolutt fuktinnhold kan oppgis som kg/kg (ev. vektprosent), kg/m³ (ev. volumprosent) eller m³/m³. For RF i porelufta oppgis dette på samme måte som RF i luft [9].

Fuktinnhold i porøse materialer vil ved en gitt RF i omgivende luft gradvis nærme seg en verdi, verdien er likevektsfuktigheten ved aktuell RF. For flere materialer er disse likevektsfuktighetene målt ved ulike RF-nivåer og sammenstilt til en sorpsjonskurve som gir oversikt over fuktlikevekten, eksempel på sorpsjonskurve for furu kan sees i Figur 10 [9].

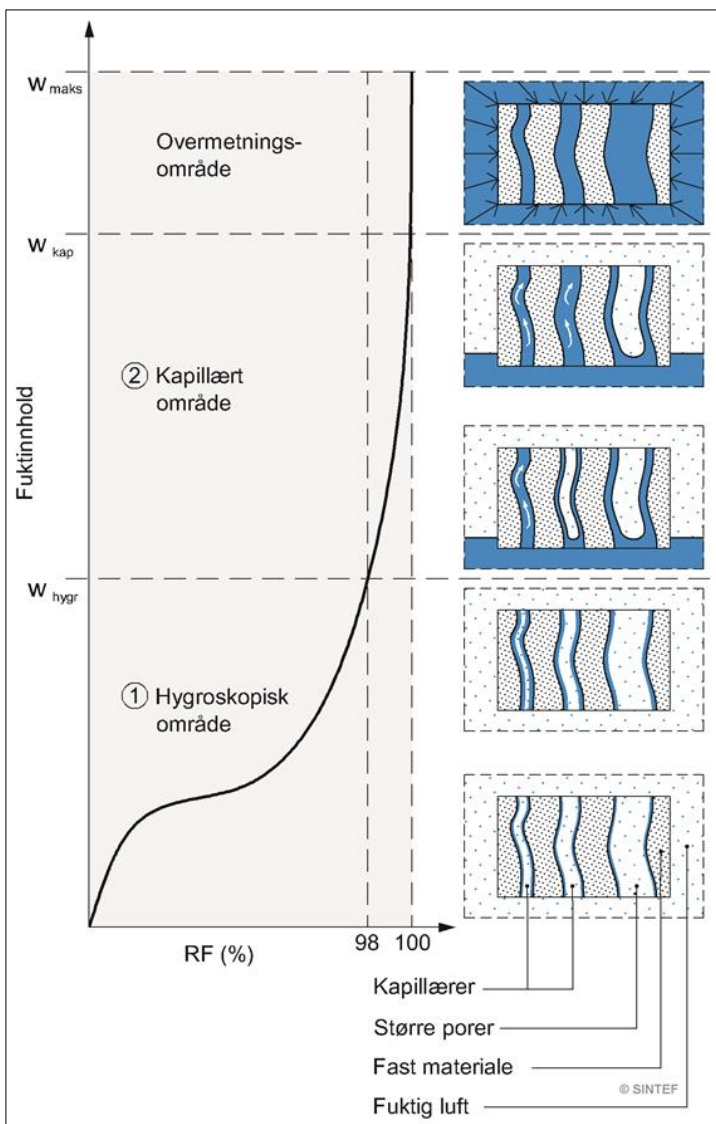


Figur 10: Eksempel på sorpsjonskurve for furu med densitet 500 kg/m^3 [9].

I sorpsjonskurven kan RF eller eventuelt absolutt fuktinnholdet leses av dersom en av disse er målt. Grunnen til at det er to ulike kurver i sorpsjonskurven er på grunn av at treverk innstiller seg på et lavere fuktnivå når fuktes opp, fremfor når det tørker ut (kalles hysteresese).

Selve fuktopptaket i materialer avhenger av hvilken fuktpåvirkning, materialtype og hvilke egenskaper poresystemet har. Fukt i materialene er i det hygroscopiske område om det er under rundt 98 % RF, mens det er i kapillært område dersom det er over 98 % RF. Sistnevnte vil vanligvis innebære at materialet er i kontakt med fritt vann.

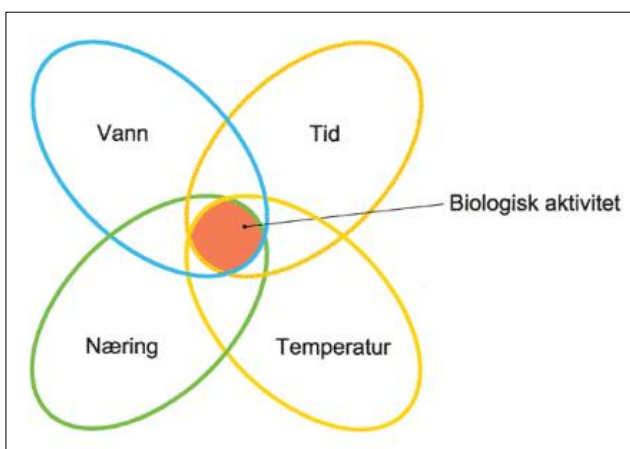
For fuktopptak i hygroscopisk område skjer dette ved at vanddampmolekyler diffunderer inn i poresystemet til materialet og absorberes i molekyllagene til porene. Når RF er opp mot 98 % er de minste porene fylt med vann. Over 98 % RF så er materiale i det kapillære området og da er det kontinuerlig væskestrømning ved kapillærsuging. Full metning av materiale oppnås ikke før eventuelt koking eller vakuumbehandling på grunn av at det er en del porer som er for store til kapillært oppsug. Stort sett kan materialer ta opp mye mer fukt i kapillært område enn i hygroscopisk område. En oversikt over de ulike områdene for fuktopptak med tilhørende forklarende skisser kan sees i Figur 11 [9].



Figur 11: Oversikt over fuktoptak i porøse materialer i bygninger [9].

2.1.8 Muggvekst

Sopp trenger næring, vann/fukt, gunstig temperatur og tid for å vokse, se Figur 12 for illustrasjon [18].



Figur 12: Forutsetninger for muggsopp[18].

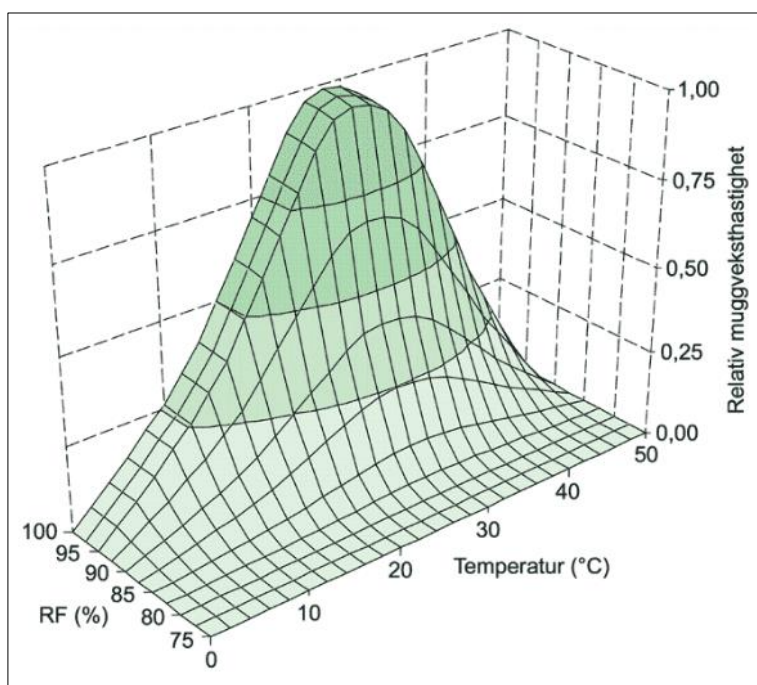
Næring finnes i alle organiske materialer, og det er stort sett celluloseholdige materialer som typisk blir angrepet av muggsopper innendørs, men også uorganiske materialer kan bli angrepet dersom de har bindemidler, mykgjørere eller støvforurensing på overflaten.

Vanlige muggsopparter krever over 80-85 % RF på selve materialoverflaten eller i porene i materialoverflaten dersom det skal vokse. Jo høyere RF også over dette, jo flere arter får gunstige vekstvilkår [18].

Optimal temperatur er fra ca. 25-30 °C, men noen kan også vokse ved lavere temperaturer. Ved kulde vil soppene gå i dvale, men stort sett ikke dø. Over 30 °C går vekst saktere, og over 40-50 °C dør de fleste muggsoppene.

Med hensyn til tid så kan direkte vannskader raskt gi veldig gode vekstforhold for muggsopp, og soppangrepet kan starte bare etter et par dager. For høy eller eventuelt varierende luftfuktighet kan gi vekst i løpet av noen uker eller måneder avhengig av hvor gunstige vekstforholdene er [18].

Relativ muggveksthastighet for de vanligste muggsoppene som en funksjon av temperatur og RF kan sees i Figur 13.



Figur 13: Relativ muggveksthastighet for vanlige muggsopper [18].

2.1.9 Korrosjonsbeskyttelse

Bruk av metaller i svømmehaller stiller høye krav til korrosjonsbeskyttelse. Ulike korrosjonsklasser er eksempelvis gitt i NS-EN ISO 12944-2 og kan sees i Tabell 3.

Tabell 3: Aktuelle korrosivitetskategorier og eksempel på typiske miljøer [19].

Korrosivitetskategori	Eksempel på typiske miljøer
C2, lav	Uoppvarmede bygninger, lager, sportshaller.
C3, middels	Produksjonslokaler med høy RF og noe luftforurensning, f.eks. vaskerier, bryggerier og meierier.
C4, høy	Kjemiske bedrifter, innendørs svømmebassenger, skipsverft og båtbyggerier.
C5, meget høy	Bygninger med konstant kondensasjon og sterkt forurenset atmosfære, badeland med mye sprut.

I bygningsfysisk analyse må det utarbeides et korrosjonskart som viser de anbefalte miljøklassene for de ulike sonene i bygningen. Dette må også gjøres i samråd med ventilasjon i forhold til soneinndelingen for de ulike aggregatene.

2.2 Klimaforhold

De lokale klimaforholdene for aktuell plassering av bygninger vil ha svært mye å si for de ytre påkjenningene. Årsmiddeltemperatur, laveste tre-døgns middeltemperatur, frostmengde, frostdybde, slagregnsmengde, normalregn og slagregnsretning er typiske faktorer som må kontrolleres i forbindelse med bygningsfysisk analysing av bygninger [20, 21].

For vanddampinnholdet i utelufta varierer også dette med geografisk plassering og årstid, og er høyest om sommeren. Relativ luftfuktighet (RF) i utelufta er vanligvis lavest om våren og høyest om vinteren, mens for inneluft vil RF være lavere på vinteren som følge av at utelufta varmes opp innendørs. Når temperaturen stiger for luft der vanddampinnholdet er konstant vil RF synke på grunn av at varmere luft kan holde på mer fuktighet. Døgnmidlet for RF utendørs i Norge ligger normalt mellom 50-90% [9].

2.3 Svømmehall

Romlufta i svømmehaller tilføres svært mye fuktighet fra bassenget og fra våte flater som følge av fordampning. For å redusere fordampningen bør lufttemperaturen ligge to grader over vanntemperaturen. Det er motstridene krav i forhold til at tørre personer vil mene dette er for varmt, mens badende personer som enda er våte vil oppfatte temperaturen som behagelig.

I svømmehaller må lufta avfuktes via ventilasjonsaggregatet for å forhindre kondens på kalde overflater. Den relative luftfuktigheten (RF) bør være fra 50-55% på vinteren, men kan holde 65% på sommeren på grunn av redusert damptrykkforskjell mellom innvendig og utvendig [22].

Ulike brukergrupper ønsker ulike vanntemperaturer og en oversikt over noen av de ulike kravene til vanntemperaturer fra Norsk Svømmeforbund kan sees i Tabell 4.

Tabell 4: Krav til vanntemperaturer fra Norsk svømmeforbund [22].

Kategori, basseng	Krav til vanntemperatur
Opplæringsbasseng	28-34 °C, må kunne varieres
Svømmebasseng	26-29 °C
Trenings- og konkurransebasseng	26-27 °C
Badelandsbasseng	28-34 °C

Ventilasjonen i svømmehaller må sørge for å etablere et undertrykk på mellom 10-20 Pa for å redusere forskjellen i lufttrykk i klimaskallet. Det finnes flere ulike systemløsninger for dette, men det vil ikke beskrives ytterligere i denne oppgaven.

Det skal nevnes at riktig fordeling av luft i svømmehallene kan ha stor betydning for å unngå kondens på kalde flater. Tilluftsventiler har tradisjonelt blitt plassert slik at den varme og tørre friskluften kommer inn langs vindusflater og yttervegger. Plassering kan være under- eller over vinder. I Byggforskblad 552.315 står det at det «*må plasseres tilluftsventiler under alle vinduer*»[22]. Dette er også den tradisjonelle tilnærmingen for bestrykningsløsninger på bakgrunn av at yttervegger og vinduer tradisjonelt ikke klarer å holde overflatetemperatur over duggpunktstemperatur.

Behovet for bestrykning kan kontrolleres ved å beregne overflatetemperatur på overflater som har behov for bestrykning ved dimensjonerende utetemperatur. Dersom overflatetemperatur er lavere enn duggpunktstemperatur for romlufta vil det utfelles kondens på overflaten. Bestrykningsløsninger vil kunne bidra til å eliminere kondensrisikoen (dette skjer typisk på vinduer).

2.4 Krav og metoder

Kravgrunnlaget for bygningsfysikk er gitt i Teknisk Forskrift (TEK17). Krav med tanke på fukt-energi-prosjektering finnes i relevante deler av TEK17 kapittel 13 og kapittel 14 [23].

Bruk av preaksepterte løsninger fra SINTEF Byggforsk [24] tilfredsstiller generelt løsninger mot TEK17. Variasjoner og andre løsninger skal dokumenteres gjennom relevante analyser og vurderinger.

2.4.1 Byggteknisk forskrift (TEK17)

Byggteknisk forskrift (TEK17) stiller krav til energibruk for alle nye bygninger som oppføres i Norge. Dette er krav som må følges, og sikrer en viss standard for bygninger.

Alle krav som omhandler energi i TEK17 finnes under kapittel 14. For yrkesbygninger slik som svømmehall stilles det krav til netto energibehov (kWh/m² oppvarmet BRA per år.), minimumskrav til enkeltkomponenter og krav til løsninger i forbindelse med energiforsyning [23].

Netto energibehov er bygningens energibehov, uten hensyn til virkningsgraden i energisystemet eller tap i energikjeden. Beregning for aktuell bygningskategori gjøres etter reglene i NS3031:2014. Alle energiposter skal inngå i kontrollberegningen, men det skal benyttes standardverdier iht. NS3031:2014, samt gjennomsnittsklima for Norge.

Kravene til netto energibehov for de ulike bygningskategoriene kan sees i Figur 14.

Bygningskategori	Totalt netto energibehov [kWh/m ² oppvarmet BRA pr. år]
Småhus, samt fritidsbolig over 150 m ² oppvarmet BRA	100 + 1600/m ² oppvarmet BRA
Boligblokk	95
Barnehage	135
Kontorbygning	115
Skolebygning	110
Universitet/høyskole	125
Sykehus	225 (265)
Sykehjem	195 (230)
Hotellbygning	170
Idrettsbygning	145
Forretningsbygning	180
Kulturbygning	130
Lett industri/verksteder	140 (160)

Figur 14: Krav til netto energibehov (energiramme) for de ulike bygningskategoriene i henhold til Byggteknisk forskrift (TEK17) [23].

Det finnes ingen egen bygningskategori for svømmehaller og dermed havner svømmehaller under idrettsbygning som har en energiramme på 145 kWh/m² oppvarmet BRA per år. Det er ikke hensiktsmessig at svømmehaller havner under samme kategori som ellers vanlige idrettsbygninger gitt temperatur, interlaster og interne prosesser. «Svømmehaller er et prosessbygg, og energibruk avhenger i større grad av prosessene enn av bygningskroppen» [5].

I tillegg til energiramme er det som nevnt også noen minstekrav til enkeltkomponenter i byggteknisk forskrift, minstekravene finnes i §14-3 og kan sees i Figur 15.

U-verdi yttervegg [W/(m ² K)]	U-verdi tak [W/(m ² K)]	U-verdi gulv på grunn og mot det fri [W/(m ² K)]	U-verdi vindu og dør inkludert karm/ramme [W/(m ² K)]	Lekkasjetall ved 50 Pa trykkforskjell [luftveksling pr. time]
≤ 0,22	≤ 0,18	≤ 0,18	≤ 1,2	≤ 1,5

Figur 15: Minstekrav i henhold til Byggteknisk forskrift (TEK17) [23].

2.4.2 Passivhus

NS3701:2012 Kriterier for passivhus og lavenergibygninger- yrkesbygninger er den norske standarden for lavenergibygging og passivhus. Standarden stiller krav til bygninger som kan defineres som passivhus og lavenergibygninger i norsk klima.

Standarden bygger på energibehovsberegninger etter NS 3031:2014 med standardiserte inndata og setter krav til energibehov, beregningskriterier og nødvendig dokumentasjon for yrkesbygninger som skal klassifiseres som lavenergibygninger eller passivhus.

Standarden angir videre krav til maksimalt varmetap (varmetapstall), netto oppvarmings- og kjølebehov, energibehov til belysning og minstekrav til komponenter, systemer og lekkasjetall.

Ved evaluering mot passivhuskravet benyttes det lokale klimadata.

Varmetapstall er varmetransportkoeffisienten for transmisjon, infiltrasjon og ventilasjon dividert på oppvarmet del av BRA [25]. For idrettsbygning (svømmehall) med oppvarmet BRA > 1000 m² skal varmetapstallet ikke overskride 0,45 W/m²K [26].

Minstekrav iht. NS 3701 kan sees i Tabell 5.

Tabell 5: Minstekrav til passivhus iht. NS 3701 [26].

Egenskap		Minstekrav til passivhus
Gjennomsnittlig U-verdi for vindu og dør		0,80 W/m ² K
Normalisert kuldebroverdi		0,03 W/m ² K
Lekkasjetall ved 50 Pa trykkforskjell (luftveksling pr. time)		≤ 0,60 oms/h
Årsgjennomsnittlig temperaturvirkningsgrad varmegjenvinner		≥ 80 %
SFP-faktor ventilasjonsanlegg		≤ 1,5 kW/(m ³ /s)
Belysning	Dynamisk dagslys- og konstant lysstyring	Minst 60 % av installert effekt til belysning er underlagt styringssystemet.
	Dynamisk behovsstyring ved tilstedeværelse	Minst en styringssone per rom eller en styringssone per 30 m ² i større rom.
Merknad 1: I tillegg til krav satt her skal bygningen oppfylle minstekrav i forskrift om tekniske krav til byggverk (TEK17).		

2.4.3 Dagslys

Byggteknisk forskrift (TEK17) stiller krav til at alle rom for varig opphold skal ha tilfredsstillende tilgang på dagslys [23]. For yrkesbygninger må dette dokumenteres ved beregninger med forutsetninger som er gitt i NS-EN 12464-1:2011 og program som er validert etter CIE 171:2006.

Kravet er at rom for varig opphold skal ha en gjennomsnittlig dagslysfaktor på minimum 2,0 %. Dagslysfaktor er forholdet mellom horisontal belysningsstyrke innendørs og horisontal belysningsstyrke utendørs og måles 0,80 meter over gulvet [27].

2.5 Programvare

Det er benyttet flere ulike programvarer i denne oppgaven og en liste over de ulike kan sees under. De ulike programvarene er også beskrevet mer utfyllende i underkapitlene fra 2.5.1 til 2.5.5.

- Simien
- Ubakus
- Flixo Energy
- Wufi 2D
- Wufi Mould Index VTT

2.5.1 Simien

«Simien er et simuleringsverktøy for beregning av energibruk og vurdering av inneklime i bygninger. Bruksområdet er evaluering mot byggeforskrifter, energimerking, beregning av årlig energibehov, validering av inneklime og dimensjonering av oppvarmingsanlegg, ventilasjonsanlegg og romkjøling. Det er også mulig å gjøre lønnsomhetsvurderinger av ulike tiltak på bygningen » [28].

Det er syv ulike simuleringstyper i SIMIEN:

- Dimensjonerende vinterforhold.
- Dimensjonerende sommerforhold.
- Årssimulering.
- Evaluering av forskrifter.
- Energimerking.
- Passivhus/lavenergi.
- Lønnsomhet tiltak.

Alle beregninger utføres i henhold til NS 3031 [25], samt NS 3701 [26] for passivhusevalueringer for yrkesbygninger.

2.5.2 Ubakus

Ubakus er et nettbasert program utarbeidet av fysiker Ralf Plag fra Tyskland [29]. Programmet kan i hovedsak kan benyttes til statisk beregning av temperaturer og varmetap (U-verdier) for konstruksjoner, men viser også relativ luftfuktighet og kondensrisiko for ulike konstruksjoner. Inngangsverdier for både innvendig og utvendig temperatur og relativ luftfuktighet kan velges og konstruksjoner kan bygges opp som enten homogene eller inhomogene sjikt. Programmet har et stort bibliotek med ulike materialdata, i tillegg til at materialer kan lages selv.

2.5.3 Flixo Energy

Flixo energy er et program for beregning av kuldebroer og er validert i henhold til EN ISO 10211:2007 [30]. Programmet er utviklet av Utvikling og Profil AS.

I programmet kan man bygge opp ønskede byggdetaljer ved å lage firkanter som gis riktige dimensjoner og materialeegenskaper. For materialeegenskapene er det viktig å legge inn riktig varmemotstand for de ulike materialene, i tillegg til at det kan gis en valgfri farge.

Byggdetaljen bygges opp i henhold til valgt snitt og retningslinjer i forhold til lengder for de ulike tilstøtende konstruksjonene må følge beskrivelse i henhold til prosjektrapport 25 [31]. Etter detaljen er

bygget opp må de ulike overflatene gis ulike egenskaper og overgangsmotstander. De ulike overgangsmotstandene for ulike flater er tidligere vist i Tabell 2.

2.5.4 Wufi 2D

Wufi 2D er utviklet av Fraunhofer Institut für Bauphysik i Tyskland. Programmet er basert på Windows og benyttes til beregning av koblet varme- og fukttransport for bygningsdeler. Beregninger er dynamiske (ikke-stasjonære) av hygrotermiske forhold i konstruksjoner med ulike klimafilere [32].

Geometrien til en ønsket detalj kan bygges opp ved å lage firkanter i et todimensjonalt koordinatsystem. Firkantene kan så tilegnes et material fra Wufi sin database eller eventuelt egentilpassede materialer [33].

Videre velges initialverdier og grensebetingelser. For initialverdier settes temperatur og RF for hvert material. Standardverdi i program er 20 °C og 80% RF. For grensebetingelser kan det velges mellom innendørs, utendørs eller adiabatisk grensesnitt.

Innendørs kan velges ut fra ulike standardgrafer for antatt fukttilskudd eller legges inn med enten konstante eller variabel temperatur og RF. Klimadata utendørs kan hentes fra flere forskjellige steder i Europa, Nord-Amerika og Japan. Som klimadata blir Moisture Design Reference Year (MDRY) benyttet [34]. MDRY er klimadata som på timesbasis er valgt ut for en mer kritisk fuktbelastning enn gjennomsnittsklimaet. Denne timesverdien er bestemt ved en lineær interpolasjon [33].

Wufi 2D tar flere transportmekanismer i betraktning ved simulering, en oversikt kan sees i Tabell 6 [35] [33].

Tabell 6: Transportmekanismer i Wufi 2D [35] [33].

Transportmekanismer	
Varmetransport	Varmeledning Entalpiendringer ved faseoverganger i fukt Kortbølget stråling Langbølget stråling
Damptransport	Vanndampdiffusjon Løsningsdiffusjon
Væsketransport	Kapillærkonduksjon Overflatekrypning

Resultatene fra simuleringer i Wufi 2D kan fremstilles grafisk, som rådata eller video.

2.5.5 Wufi Mould Index VTT

For å indikere muggvekstrisiko basert på materialtype, temperatur og RF kan Wufi Mould Index VTT benyttes. VTT er et tilleggsprogram til Wufi som kan benyttes både til Wufi PRO og Wufi 2D. Programmet er utviklet av VTT Technical Centre of Finland og Fraunhofer IBP [36].

VTT er en matematisk-empirisk modell som baserer seg muggvekstmodellen presentert av Hukka og Viitanen i 1999 [37]. Ligningen kan sees under.

$$\frac{dM}{dt} = \frac{1}{7 \cdot \exp(-0,68 \ln T - 13,9 \ln RH + 0,14W - 0,33SQ + 66,02)} k_1 k_2$$

De ulike variablene i ligningen kan sees i Tabell 7.

Tabell 7: Variabler i ligning til VTT [37] og [33].

Forkortelse	Beskrivelse
M	Muggvekstindeks
T	Temperatur [°C]
RH	Relativ luftfuktighet [%]
W	Tresort (0 = furu og 1 = gran)
SQ	Overflatekvalitet (SQ = 0 for saget overflate, SQ = 1 for ovnstørket overfalte) For andre materialer enn trevirke settes SQ lik 0.
t	Tid [h]
k₁, k₂	Empiriske verdier som er avhengig av hvor sensitive materialene er for muggvekst (4 klasser, kan sees i Tabell 8). k ₁ representerer intensitetskoeffisienten som baseres på vekstnivået. k ₂ representerer tilpasningen til vekstintensiteten når muggindeksen nærmer seg toppverdien.

Sensitivitetsklassene for muggvekst kan sees i Tabell 21 [38] [33].

Tabell 8: Sensitivitetsklasser for muggvekst [38] [33].

Klasse/gruppe	Beskrivelse
Svært sensitiv	Optimalt vekstmedium. - Ubehandlet trevirke.
Sensitiv	Biologisk nedbrytbare byggematerialer. - Høvlet trevirke, limtre, trebaserte plater, produkter belagt med papp.
Middels motstandsdyktig	Byggematerialer som inneholder noen biologisk nedbrytbare forbindelser - Betong og plastbaserte materialer.
Motstandsdyktig	Ikke-biologisk nedbrytbare byggematerialer, uten næringsstoffer. - Glass og metallprodukter.

Det er to andre faktorer som er med i den numeriske beregningen av muggvekstindeksen. Det er kritisk RF ($RF_{kritisk}$) for vekst og synkende muggindeksnivå dersom det er kalde eller tørre perioder. Kritisk RF er for denne modellen grensen der RF er høy nok til at muggvekst kan forekomme [33].

Ligningen for kritisk RF kan sees under [37].

$$RF_{kritisk} = \begin{cases} -0,0026 \cdot T^3 + 0,160 \cdot T^2 - 3,13 \cdot T + 100 & \text{hvis } T \leq 20^\circ\text{C} \\ 80 \% & \text{hvis } T > 20^\circ\text{C} \end{cases}$$

I perioder der det er lav temperatur og RF reduserer VTT-modellen muggvekstindeksen. Over tid vil det synke lineært [33, 37].

Det er stor usikkerhet til VTT-modellen på grunn av variasjonen i reduksjonen er veldig avhengig av hvilket materiale som benyttes. I tillegg er heller ikke effekten av hurtig skiftende RF undersøkt godt. Det er anbefalt å benytte en lav reduksjonsfaktor når modellen brukes [33].

VTT-modellen gir en indeks som følger en skala fra 0 til 6 for henholdsvis minst og mest mugg. Indeksene kan sees i Tabell 9 [37].

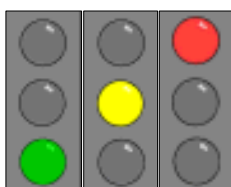
Tabell 9: Muggvekstindeks iht. VTT-modell [37].

Indeks	Vekstrate
0	Ingen muggvekst.
1	Små mengder mugg synlig på overflate (mikroskop), initialt vekststadie.
2	Flere lokale muggvekstkolonier synlig på overflate (mikroskop).
3	< 10% dekning (visuelt), eller < 50% dekning (mikroskop).
4	10-50% dekning (visuelt), eller > 50% dekning (mikroskop).
5	Store mengder muggvekst på overflate: > 50% dekning visuelt.
6	Tett dekning av muggvekst, ca. 100% dekning.

Plassering i bygningskroppen er avgjørende for om det ansees som kritisk muggvekstindeks[33].

- Innvendige eksponert overflate: Muggvekstindeks skal være under 1.
- Utover i konstruksjonen: Anbefales lavere enn 3.

VTT viser i tillegg til muggvekstindeks resultatet med trafikkllys som enten er grønt, gult eller rødt, se Figur 16.



Figur 16: Muggvekstindeks ved trafikkllys fra Wufi Mould Index VTT.

Utover i konstruksjonen vil grønt lys være $\leq 2,0$, gult lys være $\leq 3,0$, mens rødt lys er $\geq 3,0$.

2.6 Case-bygning

Oppgaven baserer seg på en bygningsfysisk analyse av en svømmehall i limtre- og massivtrekonstruksjoner, og isolerte prefabrickerte bindingsverkselementer. Bygningen skal være en energi- og kostnadseffektiv svømmehall som skal benyttes til svømmeopplæring- og trening. Alle konstruksjoner skal oppføres over bakkenivå, slik at bygningen kan tilpasses ulike tomte- og grunnforhold.

Illustrasjon av bygningen fra to sider kan sees i Figur 17 og plantegningene kan sees i vedlegg A.



Figur 17: Illustrasjon av bygningen. Utklippet fra IFC-modell utarbeidet av Green Advisers AS.

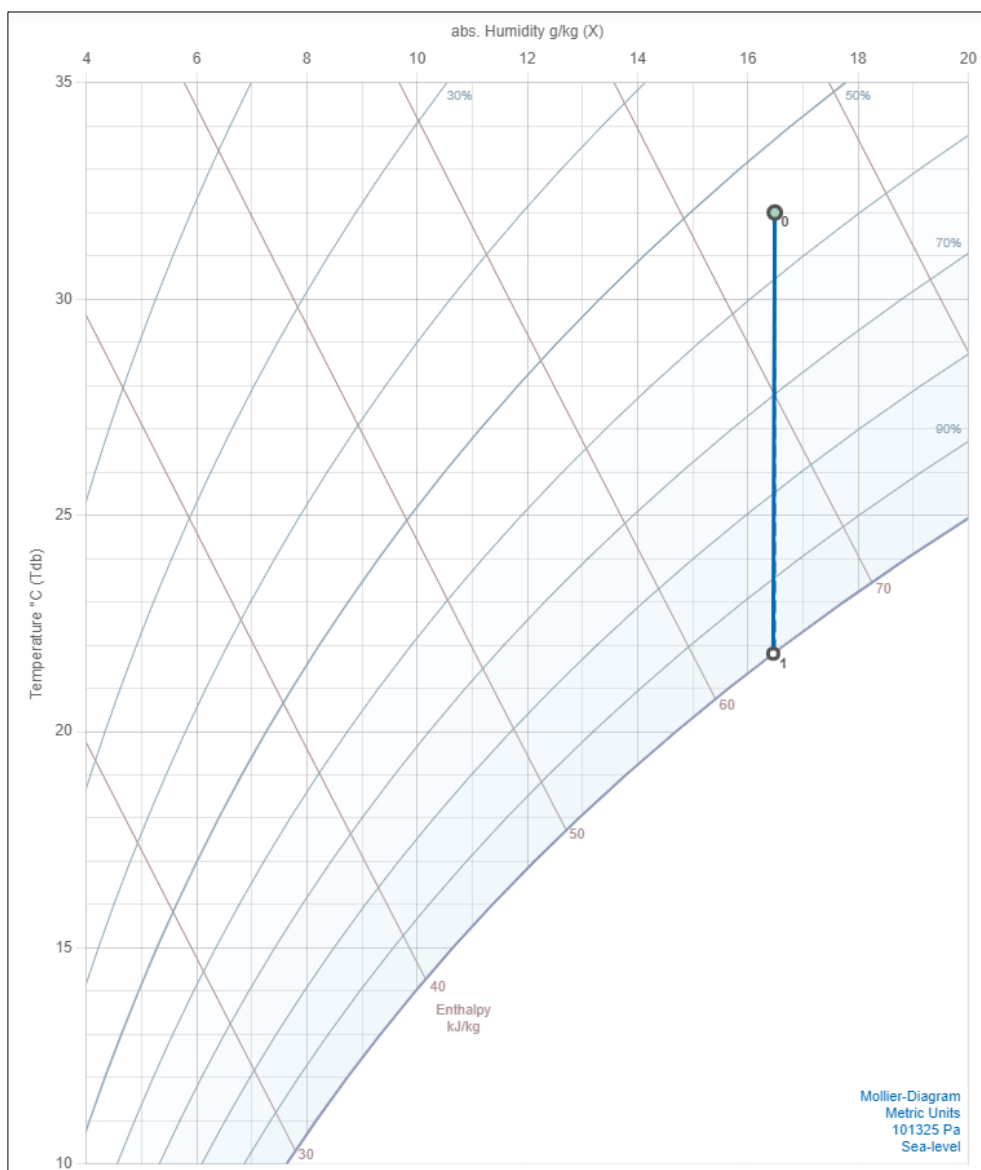
2.6.1 Soneinndeling med hensyn til klima og belastning

Svømmehaller har et av de mest utfordrende inneklimatene med tanke på temperatur og fuktforhold. Forutsetningene for innetemperaturer og relativ luftfuktighet i bygningen basert på norsk svømmeforbund og Byggforsk kan sees i Tabell 10 [22].

Tabell 10: Forutsatt dimensjonerende inneklimate (temperatur og RF) [22].

Rom/sone	Operativ temperatur	Relativ luftfuktighet (vinter)
Bassengrom (teknisk)	28-32 °C	Tørt rom. Vil ha vesentlig lavere RF enn for rom med bassengflate. Antar 25-30% på vinterstid.
Generelt «vanlige» rom: Vrimle/trapp, kiosk, spiserom, garderobes, WC besøkende, hallvakt	22 °C	25-30 % på vinterstid. Styres av RF i uteluft som varmes opp over ventilasjonsaggregat.
Rom med bassengflate og tilhørende lager, samt dusjareal	32 °C	≤ 55 % (styrt med avfukting)
Ventilasjonsrom plan 3	32 °C	Som bassengrom (teknisk). 25-30 %. Alt er lukkede prosesser.

Rom med bassengflate vil ved operativ innetemperatur på 32 °C og en konstant RF på 55 % ha en duggpunktstemperatur på 21,8 °C. Det vil si at alle på alle overflater som har lik eller lavere temperatur enn 21,8 °C vil det utfelles kondens. Duggpunktstemperaturen under gitte forutsetninger er illustrert i Molliardiagram i Figur 18.



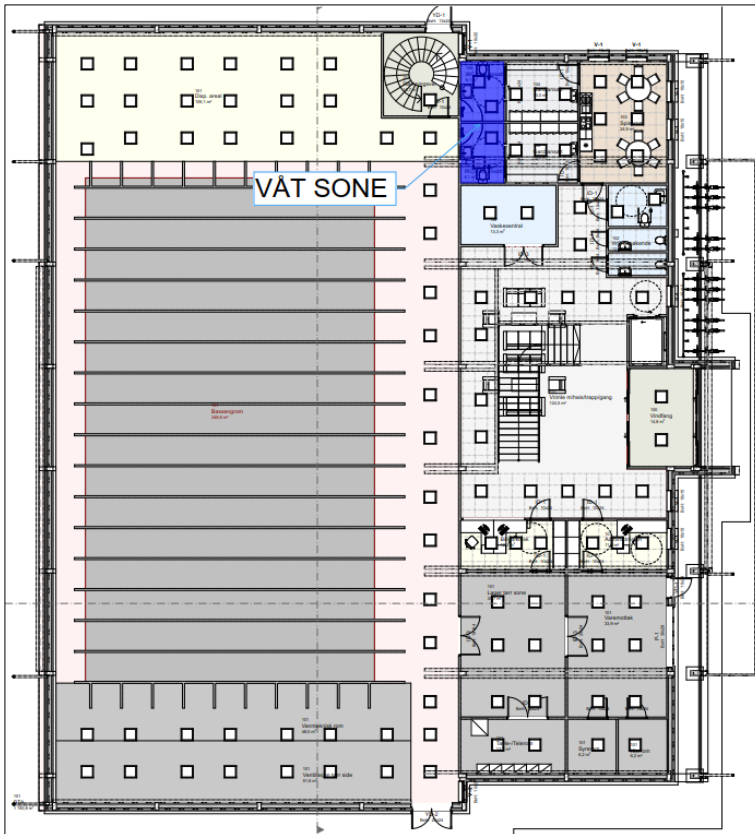
Figur 18: Molliardiagram med markering av duggpunktstemperatur ved 32 °C og 55 % RF [39].

Det er ingen av de tilstøtende rommene som har forutsatt romluftstemperatur under duggpunktstemperaturen i rom med bassengflate. Likevel er det viktig å få til et effektiv klimaskille mellom disse sonene. Både med tanke på termisk inneklime (oppvarming) og med tanke på klorider i luften. Dette også med tanke på dersom det skulle være nattsinking av tilstøtende rom som vil medfølge at romluftstemperatur synker under duggpunktstemperaturen.

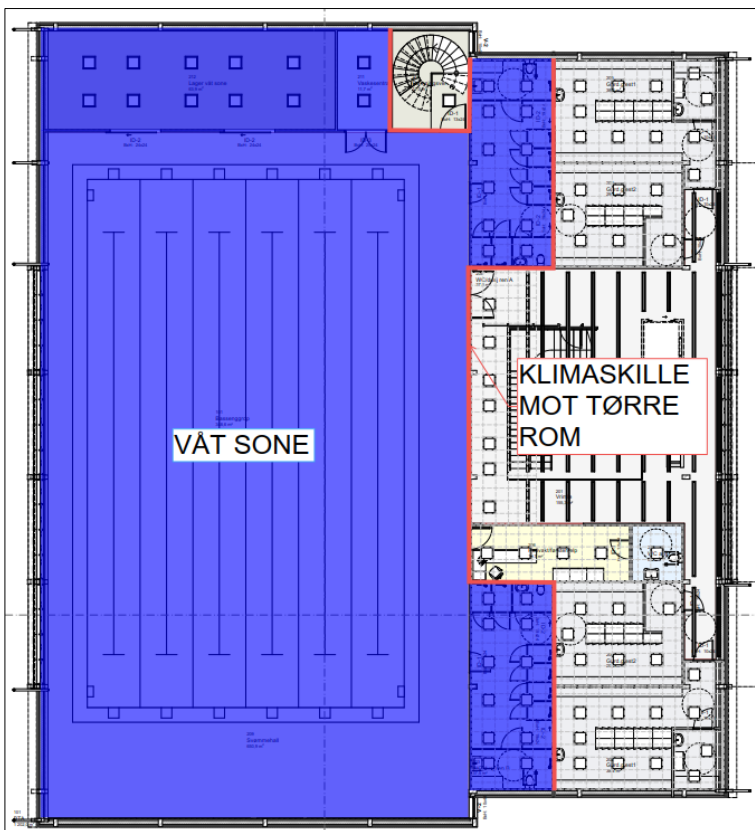
Duggpunktstemperatur for vanlig oppvarmede rom (22 °C) vil være fra 1,1 °C til 3,6 °C forutsatt 25-30 % RF.

I tillegg til inneklime og klimaskille er det for svømmehaller våte og tørre soner. Klimaskille mot «tørre» rom må ivaretas og utføres som lufttette og tilstrekkelig damp-tette konstruksjoner.

En oversikt over våte soner og klimaskillet for case-bygningen kan sees i Figur 19 og Figur 20.

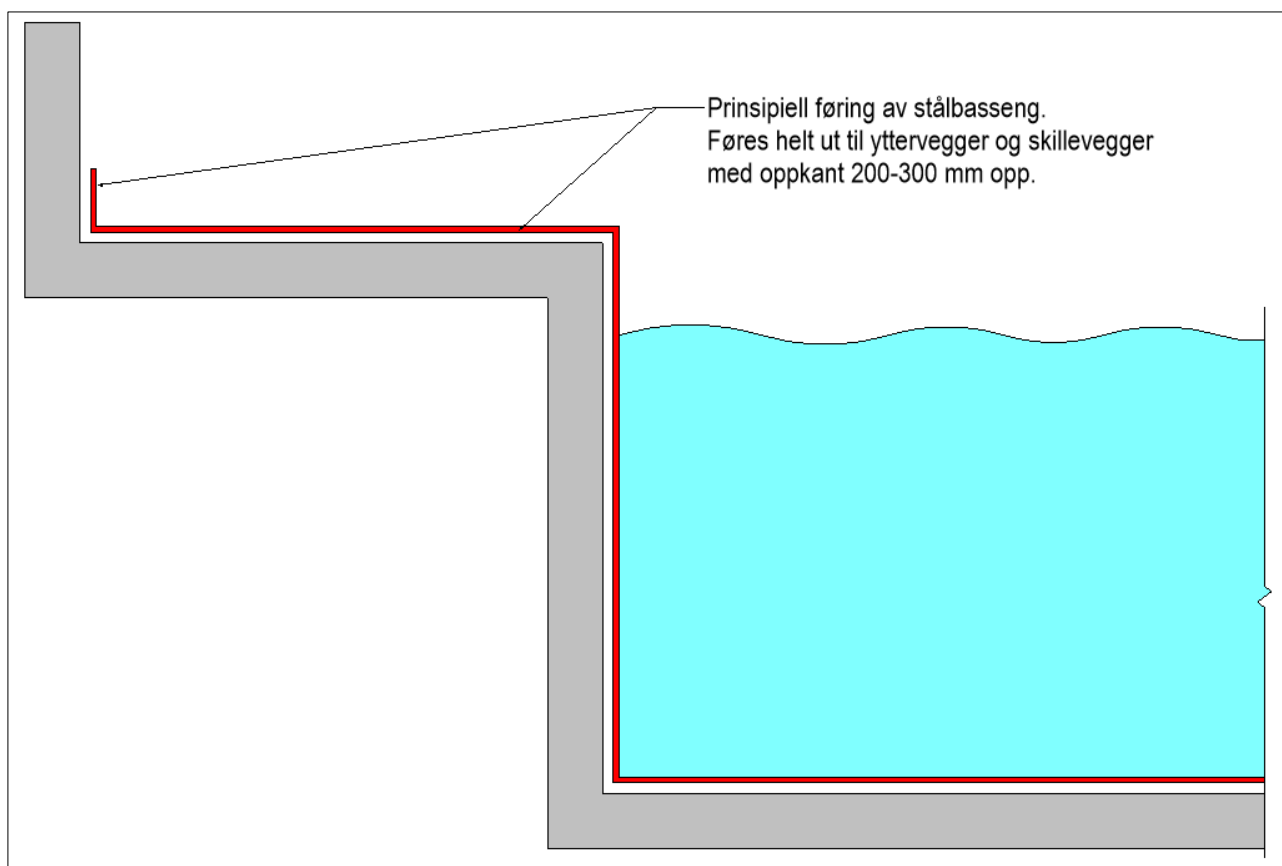


Figur 19: Våt sone (kun dusj - vanlige våtrom) i plan 1. Markert i PDF-tegninger oversendt fra Green Advisers AS.



Figur 20: Våt sone i plan 2 for bassengareal, samt dusjareal. Klimaskille mot tørre rom er vist med rødt. Markert i PDF-tegninger oversendt fra Green Advisers AS.

Selve bassenget skal utføres med stålbaseng og tanken er at stålet skal dras med over gulv i bassengrommet, samt føres 200-300 mm opp på tilstøtende vegger for å lage en vanntett sokkel. Dette er basert på typiske anbefalinger fra Håndbok 52 og SINTEF Byggforsk [1]. Prinsipp for løsningen kan sees i Figur 21.



Figur 21: Prinsipiell føring av stålbaseng. Tegnet i Revit.

Løsning med stålbaseng sikrer en kort byggetid på grunn av en stor andel prefabrikkerte deler levert direkte fra fabrikk. Syrefast stål vil heller normalt ikke sprekke, misfarges eller lekke, samt at det har en lang levetid. Stålbaseng sørger også for lave vedlikeholdskostnader og enkel rengjøring på grunn av porefrie og glatte overflater. Vekten vil også være rundt 1/3 av et typisk betongbaseng [40]. Løsninger rundt stålbasenget skal ivaretas av en leverandør for bassenget og beskrives ikke ytterligere i denne oppgaven.

For plan 3 av bygningen så inneholder dette kun ventilasjonsrom og rømningsvei/trapp. Dette rommet kan entes defineres som våt eller tørr sone, men det er forutsatt en lukket ventilasjonsprosess og at rommet utføres som et tørt rom.

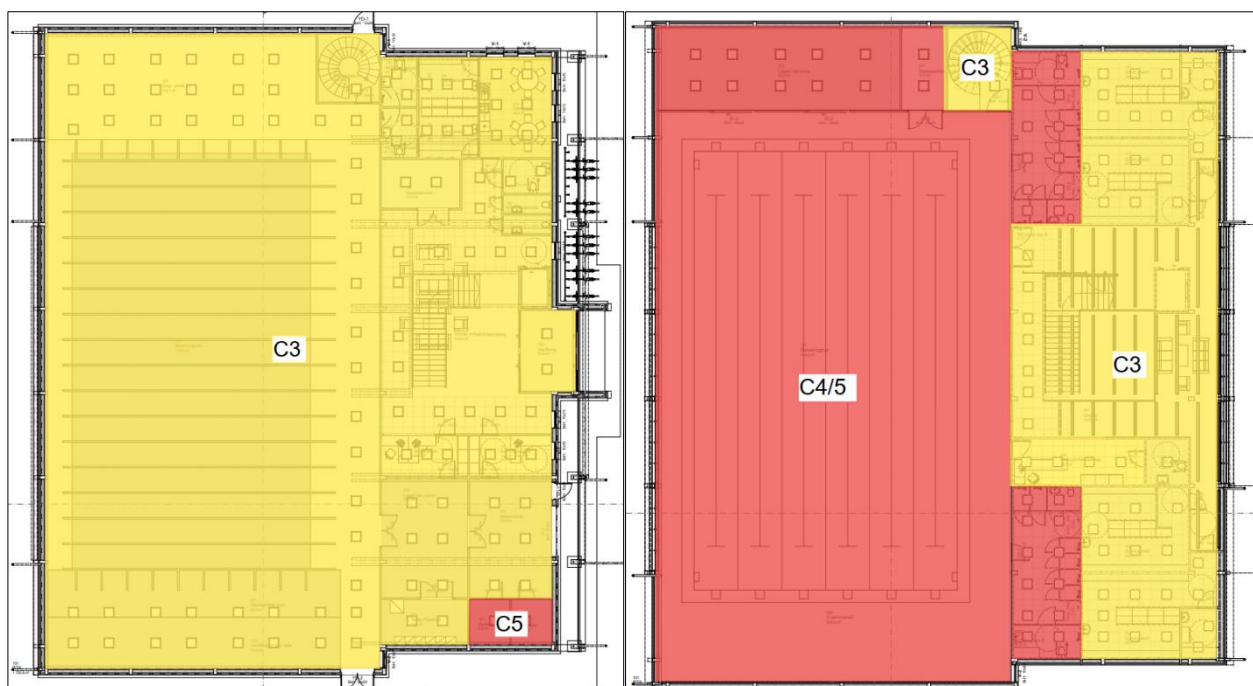
2.6.2 Korrosjonskart

Tabell 11 viser anbefalte miljøklasser for de ulike sonene i bygningen basert på NS-EN ISO 12944-2 [19].

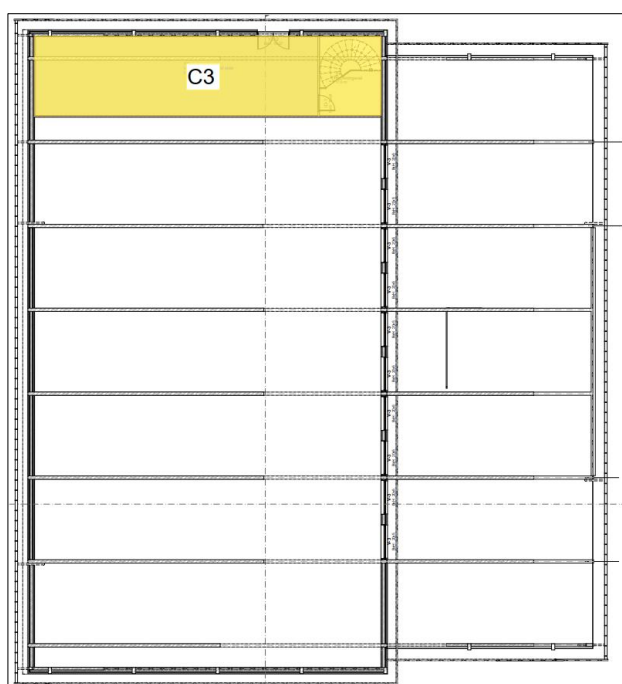
Tabell 11: Miljøklasser for ulike soner [19].

Beskrivelse	Miljøklasse
Bassengrom (teknisk), generelt «vanlige» rom: Vrimle/trapp, kiosk, spiserom, garderobes, WC besøkende, hallvakt, ventilasjonsrom plan 3	C3
Rom med bassengflate og tilhørende lager, samt dusjareal	C4/5
Kjemikalierom (klor og syrerom)	C5

Korrosjonskart for alle tre plan basert på tabell over kan sees i Figur 22 og Figur 23.



Figur 22: Korrosjonskart av plan 1 (venstre) og plan 2 (høyre). Markert i plantegning med PDF-Creator.



Figur 23: Korrosjonskart av plan 3. Markert i plantegning med PDF-Creator.

2.6.3 Utvendig klimaskall

2.6.3.1 Gulv på grunn

Betonggulvet kan isoleres med plater av EPS/XPS eller steinull. Det er viktig at det valgte materialet tåler den aktuelle trykkbelastningen uten å bli komprimert.

Mellom betongstøp og isolasjon må det legges en 0,20 mm polyetylenfolie (PE-folie). Plastfolien vil både ha funksjon som dampsperre, beskyttelse for radonmembranen, men også fungere som et glidesjikt for å forhindre sprekker i betongen. Under PE-folien legges det en radonmembran. Alternativt om radonmembran av ulike årsaker skal sløyfes eller legges lenger ned i konstruksjonen anbefales det å

legge to sjikt med 0,20 PE-folie for å sørge for en mer robust løsning med hensyn til perforeringer under armeringsarbeidet (fare for rifter). PE-folien må ha 200 mm overlapp i skjøter.

Under radonmembran eller eventuelt PE-folien legges isolasjonsplater på 250 mm. Denne isolasjonen vil fungere som et kapillærbrytende lag under betonggulvet og medfører at det er tilstrekkelig med 100 mm puk (finpukk 4-16 mm) under isolasjonssjiktet. Drenslaget må beskyttes mot inntrenging av finpartikler fra underliggende masser med fiberduk.

Den nystøpte betongen har en relativ fuktighet (RF) i porelufta nær 100 %, og blir vanligvis beskyttet mot opptørking i rundt en uke etter støp. For å unngå fuktskader i bygningen er det viktig at betongen får tørket ut tilstrekkelig slik at RF inne i porelufta er lavere enn kritisk fukttilstand for materialene som kommer i kontakt med betongen. Uttørkingstiden er avhengig av uttørkingsforhold, tykkelse og kritisk fukttilstand for de tilstøtende konstruksjonene.

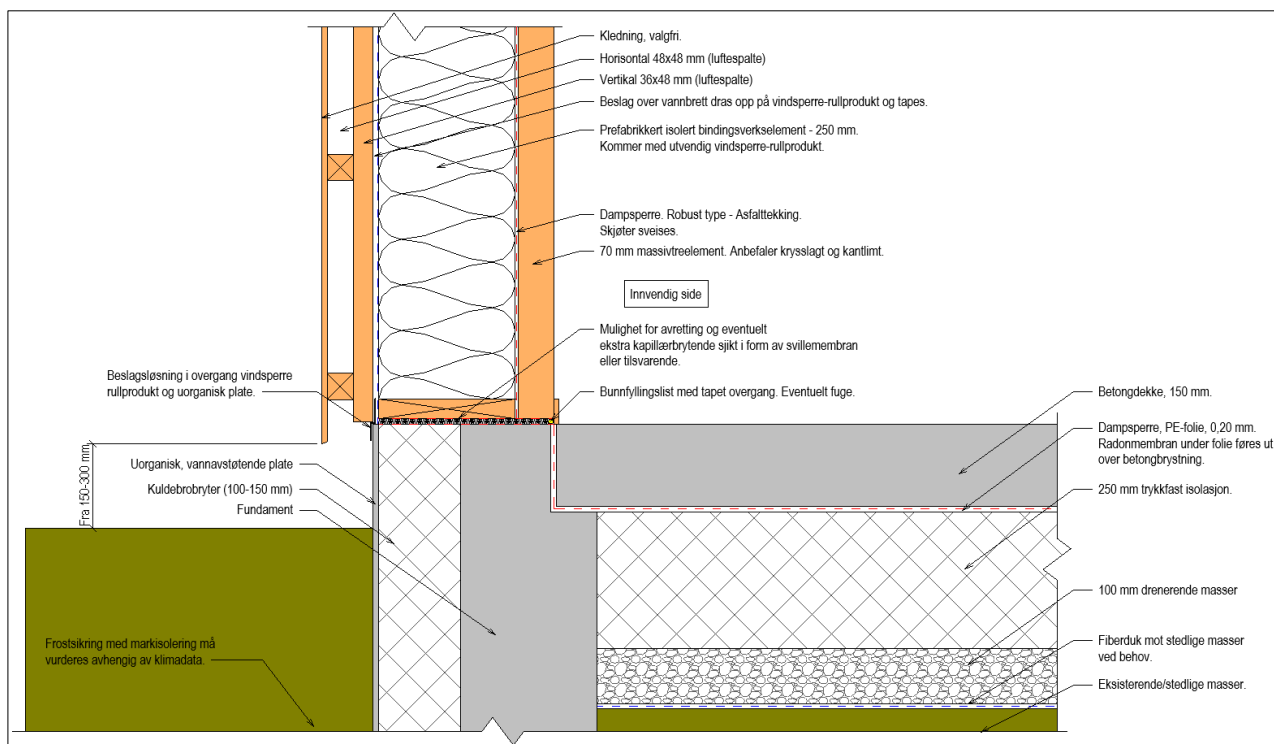
Selv om det benyttes aktive tiltak for å øke tørkehastigheten kan det ta lang tid før fuktinnholdet kommer ned på et akseptabelt nivå. Det er derfor viktig at betongen har tørket tilstrekkelig før det legges på gulvoverflate. Det bør gjøres kontrollmålinger av fuktinnhold før gulv legges. Det kritiske fuktinnholdet er avhengig av hva slags type gulv som skal benyttes, og varierer mellom 60 – 100 % RF [41].

2.6.3.2 Sokkel - Overgang gulv/vegg

Overgang gulv/vegg i plan 1 er ikke overgang inn mot bassengflate og 32 °C og 55 % RF på grunn av at bassenget er hevet over bakken. Sokkelen i plan 1 er tilstøtende mot vanlige oppholdsrom, men også bassengrom som er under selve bassengarealet. Som beskrevet tidligere i kapittel 2.6.1 vil det også her kunne bli 32 °C, men den relative luftfuktigheten vil være vesentlig lavere og vil ha et mer normalt fukttilskudd. RF antas å variere med utelufta i forhold til de ulike årstidene.

Sokkel er en overgang som typisk med hensyn til kuldebroer vil stå for mye av varmetapet, overgangen er jo også svært fuktutsatt med hensyn til at det ligger nærme terrenget.

En typisk tradisjonell sokkeldetalj er vist i Figur 24.



Figur 24: Typisk sokkeldetalj med vanlig kuldebryter utenfor fundament og ingen betongbrystning til beskyttelse. Tegnet i Revit.

2.6.3.3 Yttervegger

De største problemene for yttervegger skapes av slagregn. Man kan best sikre seg mot dette ved å følge prinsippet for totrinnstetting. Det vil si at en skiller regntettingen og lufttettingen med et drenert og ventilert luftrom. Regntettingen ivaretas av utvendig regnskjerm og vindtettingen med vindsperre. Vindsperren må ikke ha en S_d -verdi over 0,5 meter, mens dampsperran i svømmehaller må ha en S_d -verdi > 50 meter.

Luftespalten bak kledning er viktig for å drenere ut vannet som kommer inn bak regnskjermen, samtidig som det sikrer konstruksjonen en god uttørkingsevne. For å sikre god gjennomlufting må det være spalteåpninger i over- og underkant veggen. Åpning i underkant bør være større enn 5 mm.

Mellom massivtreelementer og betongstøp må det benyttes kapillærbrytende sjikt for å forhindre kapillært oppsug, for eksempel elastisk svillemembran. Dette vil også bidra til god lufttetthet. Totrinnstettingen gjelder også for fuger og løses ved at man har en form for regnskjerm i forkant av fugen, ofte beslag [42].

2.6.3.4 Vinduer

Det er hovedsakelig to prinsipielle plasseringer som benyttes til innsetting av vinduer; enten i flukt med vindsperre, eller inntrukket. Vinduer som er plassert med spor i bunnkarm i flukt med vindsperre gir god robusthet mot regnlekkasjer. Vinduer som flyttes lenger inn i veggen vil gi en bedre kuldebroverdi, men vil medføre økt risiko for fuktskader og krever derfor ekstra sikring i form av membran [43].

Lufttetting rundt vinduer og dører er sentralt for å oppnå lufttetthetskravet, siden store andeler av luftlekkasjene typisk inntreffer her. Det er derfor svært viktig at man ivaretar totrinnstetting ved montering av vinduer.

2.6.3.5 Tak mot friluft

Yttertaket bygges med bæring av limtredragere, massivtreelementer og prefabrikkerte isolerte bindingsverkselementer. Taket bygget som luftet, skrått tak med utvendig renne og nedløp.

For isolerte skråtak så er det i hovedsak to prinsipper man kan benytte, enten den tradisjonelle måten med lufting mellom vindsperre og undertak eller løsning med kombinert undertak og vindsperre. Begge løsninger har tilsvarende oppbygging opp til overkant av isolasjonssjiktet. Forskjellen ligger i utførelsen av luftesjiktet, der det for kombinert løsning er ett sjikt mindre og det er derfor nødvendig å benytte et dampåpent undertak, slik at treverket i takkonstruksjonen ikke lukkes mellom to damptette sjikt. Tradisjonell løsning er mer solid og sikrere enn kombinert løsning, men vil også være dyrere.

Det som er viktig for løsningen med forenklet løsning er at det benyttes undertaksprodukt som er tilstrekkelig vanntette og samtidig dampåpent ($s_d \leq 0,5$ meter). Utførelse av skjøter må også gjøres slik at sjiktet blir luft- og regntett også i skjøter og ved eventuelle gjennomføringer. Omleggsskjøter mm. må gjøres iht. leverandørs anbefalinger, men det må være minimum 50 mm omlegg på langsgående skjøter [44].

For begge løsninger er det viktig at det etableres tilstrekkelig luftesjikt. Dette er for å forhindre snøsmelting på taket, samt fjerne byggfukt og eventuell fukt i form av kondens eller lekkasjer fra utettheter i konstruksjonen. Det gjøres ikke vurderinger i forbindelse med tykkelse på luftesjikt i denne oppgaven.

3 Metoder og materialer

3.1 Oppsummering

I den bygningsfysiske analysen er fokusområdene byggbarhet, robusthet, fuktsikring, luft- og diffusjonstetthet og risiko for kondens eller muggvekst. For å ivareta dette er det stilt 3 forskningsspørsmål som skal besvares.

1. Hvilke detaljløsninger sikrer akseptable bygningsfysiske konstruksjoner med hensyn til U-verdi, fuktsikring og kuldebroer?
2. Vil noen konstruksjoner eller kuldebroer ved ulike varme- og fuktsimuleringer medføre utfelling eller høy risiko for kondens og/eller muggvekst?
3. Hvilken plassering av bæresystem i limtre- og massivtrekonstruksjoner vurderes til å gi mest bygningsfysiske fordeler?

For å svare på forskningsspørsmålene og sikre akseptable konstruksjoner, kuldebroer og overganger er det gjort en gjennomgang av bygningen i sin helhet og detaljering i forbindelse med klimaskall.

Første del er manuell mengdeberegning for å få kontroll på omfanget av gulv, vegger, tak og vindu/dør. Mengdeberegningen benyttes videre i kombinasjon med U-verdi beregning for å sikre et akseptabelt klimaskall med hensyn energitap.

Det er kartlagt de ulike inneklimatekene for de ulike sonene i bygningen for å sikre at klimaskillet også internt i bygningen har en fornuftig plassering. Dette benyttes også for å legge føringer for våte/tørre soner og ulik korrosjonssikring.

Utvalgte konstruksjoner og kritiske overganger i klimaskallet er tegnet opp i Revit for å få kontroll på detaljene, samt legge til rette for byggbare og robuste løsninger med hensyn til indre og ytre påkjenninger.

Det er i den bygningsfysiske analysen både sett på en nokså tradisjonell byggemetode, men også en forenklet og utradisjonell metode for bæresystem og montering av prefabrikkerte elementer. Bakgrunnen for at denne metoden er analysert er at dette er den foretrukne byggemetoden for å redusere både material- og tidsbruk, samt tilhørende reduserte kostnader.

De isolerte ytterveggselementene vil for den foretrukne byggemetoden henges opp mellom søyler. Utover innfestning av prefabrikkerte bindingsverkselementene vil disse ha tilsvarende oppbygging både for en tradisjonell løsning med ringmur og/eller inntrukket bæresystem.

Bygningen utfordrer det generelle prinsippet og anbefalingen om å plassere bæresystemet i sin helhet innenfor klimaskallet. Bakgrunnen for dette er med hensyn til byggemetode og kostnader. For søyler i yttervegger så er det sett på 3 ulike varianter av plassering av søylene. Det er plassering i klimaskall uten isolasjon på kald side (case S.1), plassering i klimaskall med 50 mm isolasjon på kald side (case S.2) og plassering inntrukket i sin helhet innenfor klimaskall (case S.3). For case S.2 med 50 mm isolasjon utenfor søyle er detalj bygget opp med foretrukket metode med hensyn til skjøting av limtre- og massivtrekonstruksjoner og oppheng av prefabrikkerte isolerte bindingsverkselementer.

Yttertak er i utgangspunktet tenkt oppført som isolert, skrått luftet tak med limtretragere, massivtreelementer og prefabrikkerte isolerte bindingsverkselementer med utvendig diffusjonsåpent undertak, lufting og utvendig taktekking. Det er sett på 3 ulike varianter av plassering av takdragere, en variant der ytterkant takdrager er likt med diffusjonsåpent undertak (case Y.1), en variant med 200 mm prefabrikkert isolert bindingsverkselement utenfor takdrager (case Y.2) og en variant med helt inntrukket takdrager på innsiden av massivtreelement (case Y.3).

Ved å flytte bæresystemet utover i klimaskallet medfører det mer ustabil klima, samt høyere risiko for kondens og muggvekst for kritiske punkter i konstruksjonene. For å dokumentere om løsningene som er detaljert får utfelling av kondens og/eller har risiko for muggvekst over tid er det gjort både statiske og dynamiske simuleringer av utvalgte konstruksjoner, overganger og kuldebroer.

De statiske simuleringene for å kontrollere overflatetemperatur ved utvalgte kritiske punkter, og er gjort for dimensjonerende utetemperatur lik $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Simuleringer for gulv mot friluft, yttertak og søyler i klimaskillet er gjort i Flixo energy og simuleringer for temperaturprofil i yttervegger og innvendig overflatetemperatur på glass i vinduer er gjort i Ubakus.

Det er for det mest kritiske snittet (søyle i yttervegg) i tillegg utført dynamiske todimensjonale simuleringer for tre ulike Moisture Design Reference Year (MDRY) klimafil (Oslo, Bergen og Karasjok) for å kontrollere kondens- og muggvekstrisiko over tid i reelt klima. Dette er tre svært ulike klimaer som sørger for at simuleringene får noe differanser fra hverandre. Oversikt over Norges kart og plassering av valgte klimaer for illustrasjon kan sees i Figur 25.



Figur 25: Illustrasjon av plassering av Oslo (venstre), Bergen (midt) og Karasjok (høyre) [45].

Simuleringene er utført i Wufi 2D på bakgrunn av at dette er egnet simuleringsprogram som tar flere transportmekanismer i betraktning i forbindelse med simuleringer. I tillegg kan resultatene fremstilles grafisk, som rådata eller video. I simuleringene er byggdetaljene til de tre ulike søyleplasseringene tegnet inn og gitt tilhørende materialelegenskaper, samt initialverdier og grensebetingelser. Resultatet fra simulering er hentet ut i form av rådata for temperatur og relativ luftfuktighet (RF) i utvalgte kritiske punkter (noder).

Etter simulering i Wufi 2D ble rådataen fra utvalgte noder konvertert til tekstfiler som ble slått sammen og lastet inn som klimafil i tilleggsprogrammet Wufi Mould Index VTT for kontroll av muggvekstrisiko for massivtreelementene. Det er også gjort konservative vurderinger av et forhåndsdefinert «worst-case» materiale fra VTT sin database over materialer. Resultatene fra VTT er beskrevet som en muggvekstindeks fra 0-6, samt med tilhørende trafikklys (grønt, gult eller rødt).

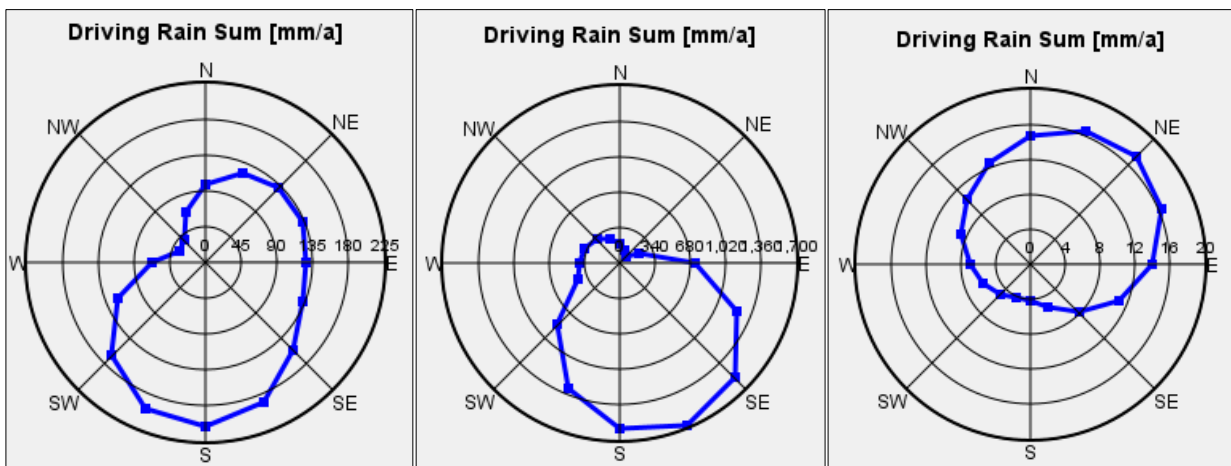
3.2 Klimadata

For statiske beregninger er det forutsatt en dimensjonerende utetemperatur på $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

For de dynamiske todimensjonale simuleringene er Moisture Design Reference Year (MDRY) for Oslo, Bergen og Karasjok benyttet i simuleringer. En oversikt over de mest sentrale inndataene hentet ut fra Wufi 2D kan sees i Tabell 12 og Figur 26.

Tabell 12: Dimensjonerende verdier for klimaer benyttet i dynamiske simuleringer.

	Oslo	Bergen	Karasjok
Årsmiddeltemperatur [$^{\circ}\text{C}$]	6,8	8,1	-3,1
Maks temperatur [$^{\circ}\text{C}$]	29,3	28	24
Minste temperatur [$^{\circ}\text{C}$]	-14,8	-9,7	-44,2
Normalregn [mm/år]	604,7	2421	249,1



Figur 26: Slagregnsmengder [mm/år] og retning for henholdsvis Oslo (venstre), Bergen (midt) og Karasjok (høyre). Hentet fra databasen til Wufi 2D.

3.3 Varmetapstall

Krav til varmetapstall i henhold til passivhusstandard for idrettsbygning med BRA over 1000 m^2 er $0,45\text{ W/m}^2\text{K}$. Med forutsetninger for mengder og inndata i klimaskall som presentert tidligere er det gjort beregning av varmetapstallet til bygningen i Simien.

Generelt egner Simien seg dårlig for å simulere energiflyt i kompliserte bygninger som svømmehaller på bakgrunn av at det ikke er mulig å legge inn typiske svømmehallsprosesser som fordampning, avfukting og avansert teknisk utstyr [5]. I denne oppgaven er det ikke sett på energibruken til bygningen. Simien modellen er kun benyttet til å sikre et akseptabelt klimaskall som er godt innenfor krav til varmetapstall i henhold til passivhuskrav. Simien er derfor vurdert som et egnet program gitt hensikten med beregningen.

3.4 Utvendig klimaskall

For den bygningsfysiske analysen av utvendig klimaskall er ulike utvalgte konstruksjoner i klimaskallet gjennomgått for å sikre tilfredsstillende oppbygging og materialvalg. Utvendig klimaskall for bygningen består av gulv på grunn, gulv mot friluft, yttervegger, vindu/dør/port og yttertak. Det er sett på både nokså tradisjonell byggemetode, men også en forenklet og utradisjonell metode for bæresystem og montering av prefabrikkerte elementer. Det er videre vurdert løsninger både med bæresystem inntrukket innenfor klimaskall og bæresystem inne i klimaskall.

En oversikt over de ulike konstruksjonene og overgangene som er vurdert i forbindelse med utvendig klimaskall kan sees i Figur 27.



Figur 27: Illustrasjon som viser konstruksjoner og overganger som er vurdert i klimaskallet. Markert i IFC-modell.

Det er også gjort varme- og fuktsimuleringer i forbindelse med utvalgte konstruksjoner, overganger og kuldebroer i klimaskallet. I svømmehaller er det svært lite rom for kuldebroer. Ved dimensjonerende romluftstemperatur lik 32 °C og forutsetning om relativ luftfuktighet (RF) lik 55% vil duggpunktstemperatur som nevnt være 21,80 °C.

Fundamentering er ikke beskrevet utover det som vises i de ulike sokkeldetaljene for bygningen.

3.4.1 Inndata - Flixo - Gulv mot friluft

Inndata til simulering av gulv mot friluft ved vanlig romtemperatur i Flixo kan sees i Tabell 13 og i vedlegg B.

Tabell 13: Mest relevant materialdata som er benyttet i Flixo for overgang etasjeskiller/vegg ved gulv mot friluft.

Materiale	Varmekonduktivitet[W/mK]
Limtre- og massivtrekonstruksjoner og bindingsverk	0,13
Isolert bindingsverkselement (blandet sjikt, 22%)	0,056
Isolasjonssjikt - alene	0,032

3.4.2 Inndata for beregning av overflatetemperatur på glass - Ubakus

Det er svært viktig med lav U-verdi på vinduer i svømmehaller. Om vi forutsetter en dimensjonerende utetemperatur på -25 °C så vil det være en differanse mellom innvendig svømmehall og utvendig klima på 57 °C. Om vi forutsetter laveste tredøgns middeltemperatur for Oslo, Bergen eller Karasjok blir temperaturdifferansen henholdsvis 51,8 °C, 44 °C og 80,6 °C.

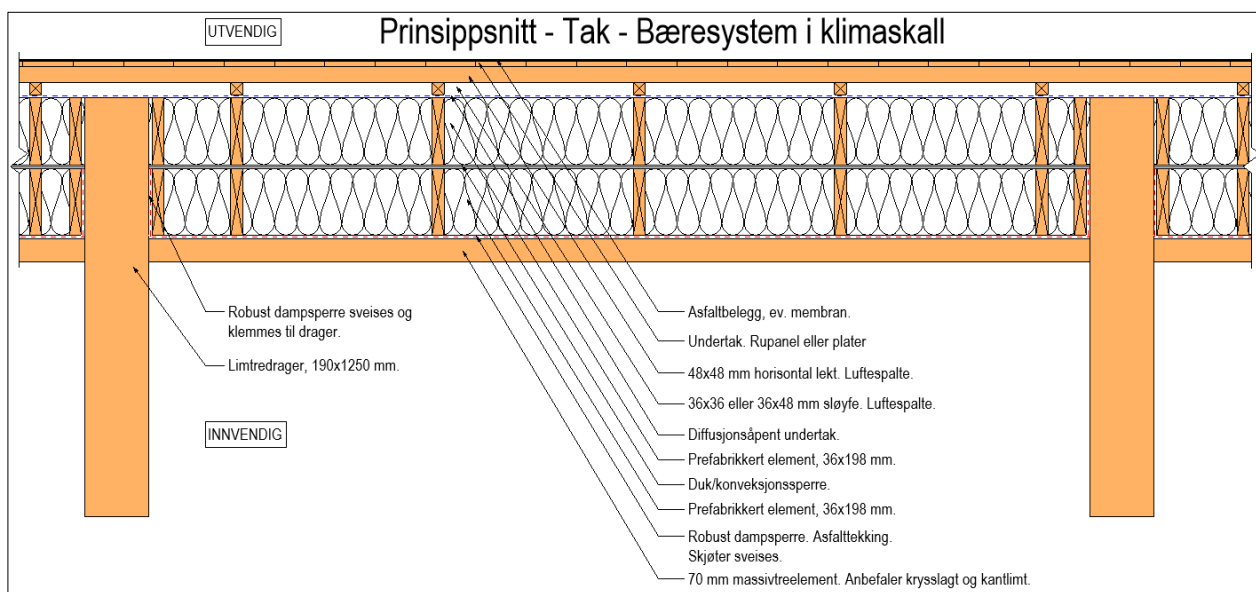
Det er forutsatt 3-lags glass med en U-verdi på 0,70 W/m²K [46] på selve glasset. For å kontrollere innvendig overflatetemperatur er det gjort simuleringer i Ubakus under statiske forhold. Inndata for glass (3-lags isolasjonsglass med U-verdi lik 0,70 W/m²K) som er simulert kan sees i Tabell 14.

Tabell 14: Materialinformasjon til glass. Hentet fra beregning i Ubakus [42].

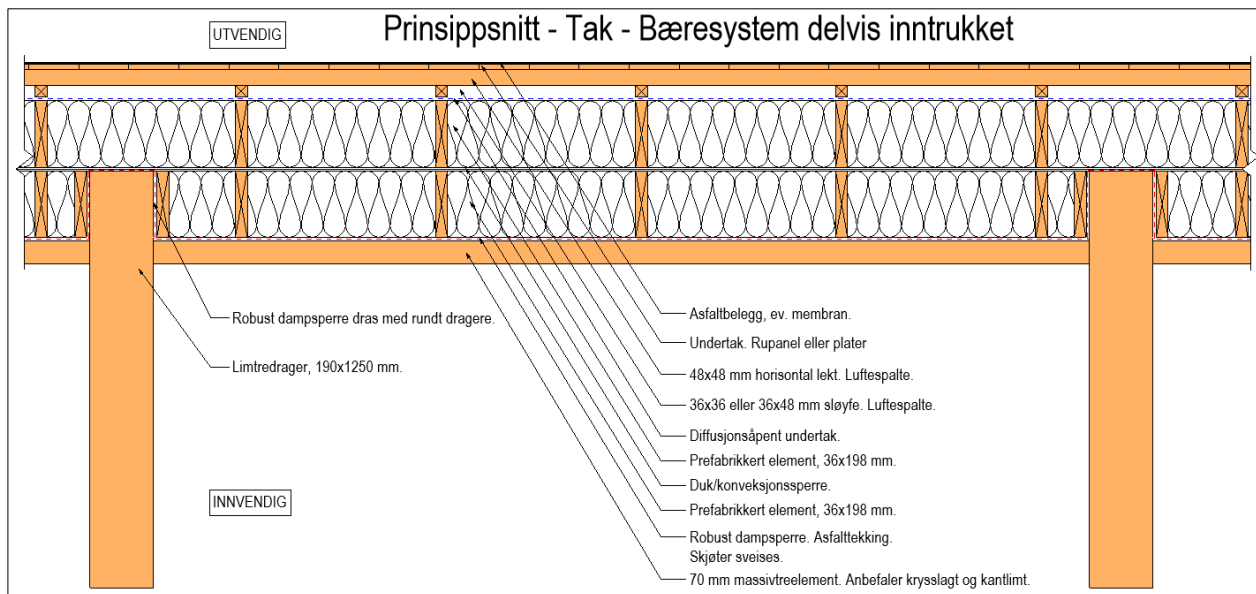
Parameter	Inndata
Varmemotstand	0,029 W/mK
Emissivitet av langbølget stråling	0,94
Vanddampmotstand (Sd-verdi)	1000
Densitet	838 kg/m ³
Varmekapasitet	840 J/kgK
Total tykkelse	36 mm

3.4.3 Oversikt og inndata - Tak mot friluft

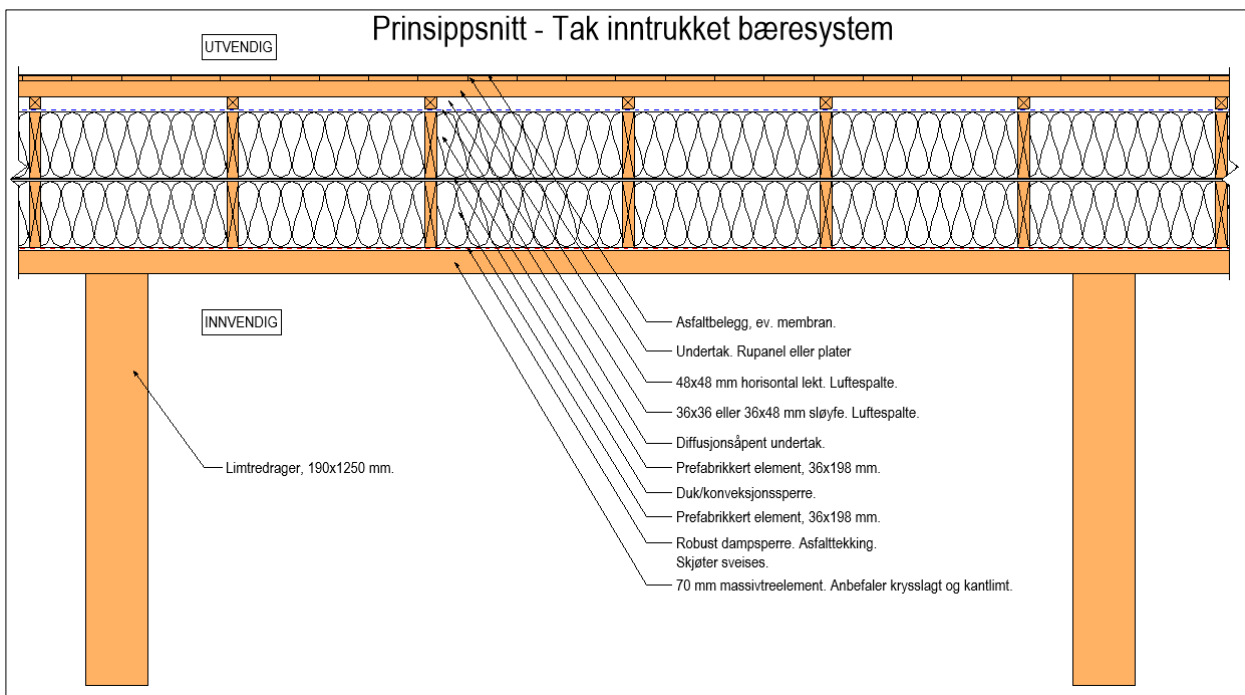
Det er sett på tre ulike varianter av plassering av bæresystemet; plassert i klimaskall (case Y.1) delvis inntrukket (case Y.2) og inntrukket (case Y.3). De ulike kan sees i Figur 28, Figur 29 og Figur 30.



Figur 28: Prinsippnitt - Yttertak - Bæresystem i klimaskall (case Y.1). Tegnet i Revit.

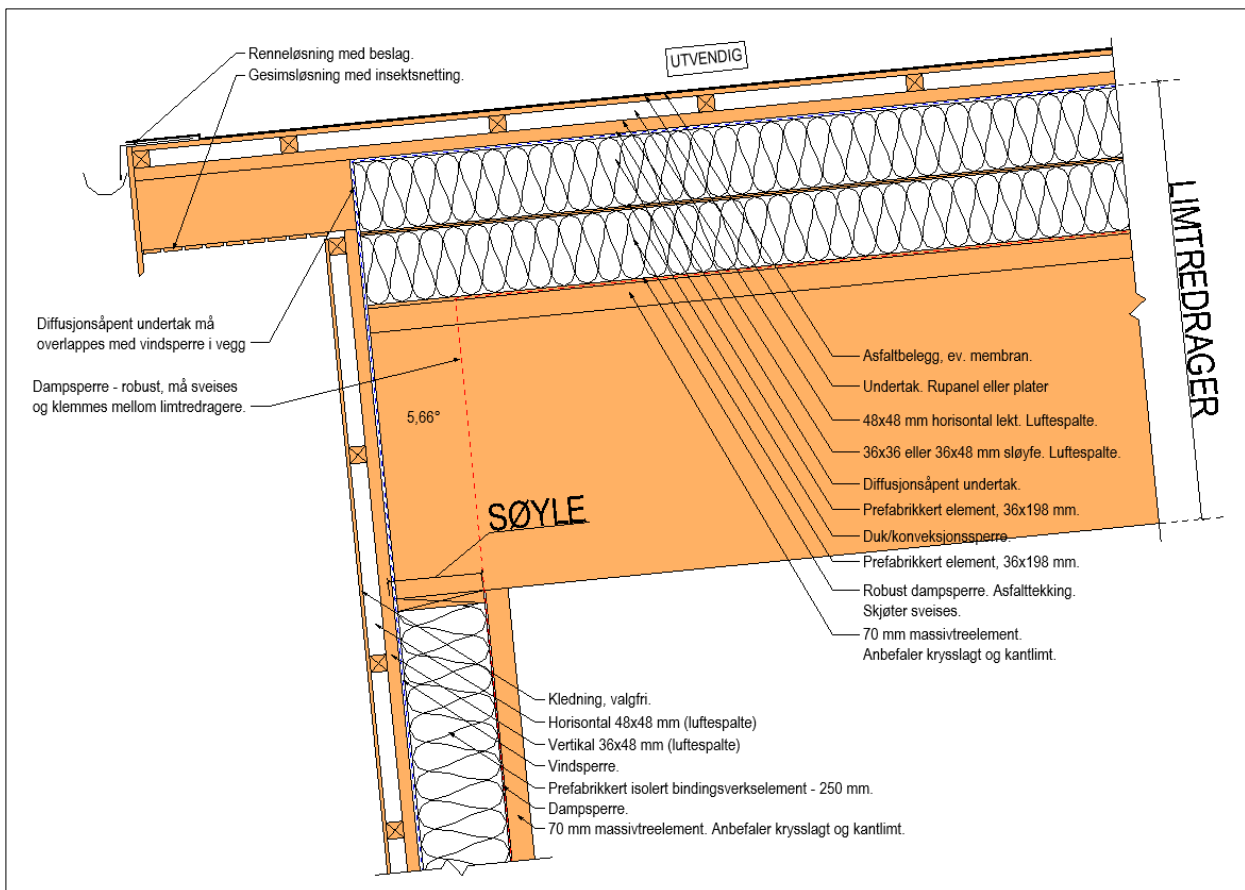


Figur 29: Prinsippnitt - Yttertak - Delvis inntrukket bæresystem (case Y.2). Tegnet i Revit.

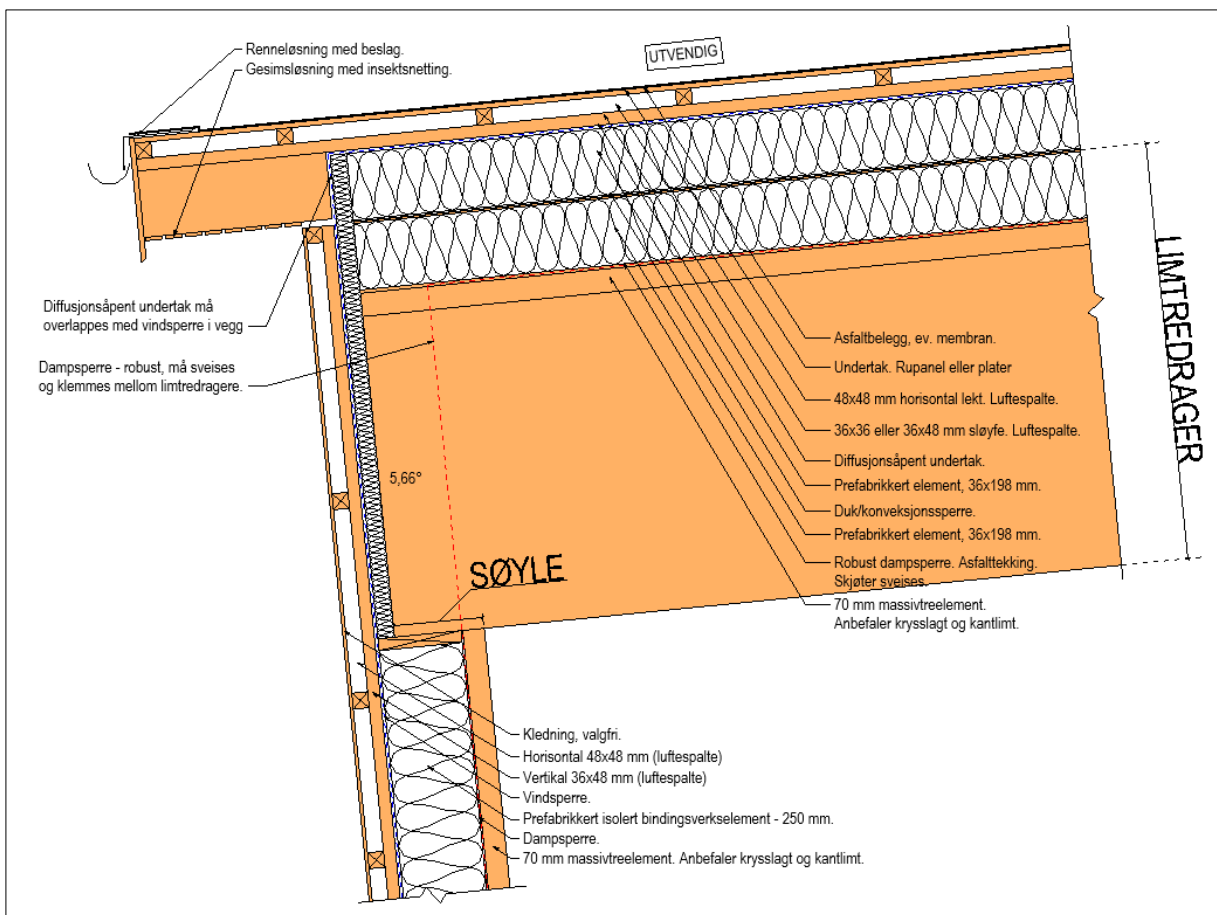


Figur 30: Prinsippsnitt - Yttertak - Inntrukket bæresystem (case Y.3). Tegnet i Revit.

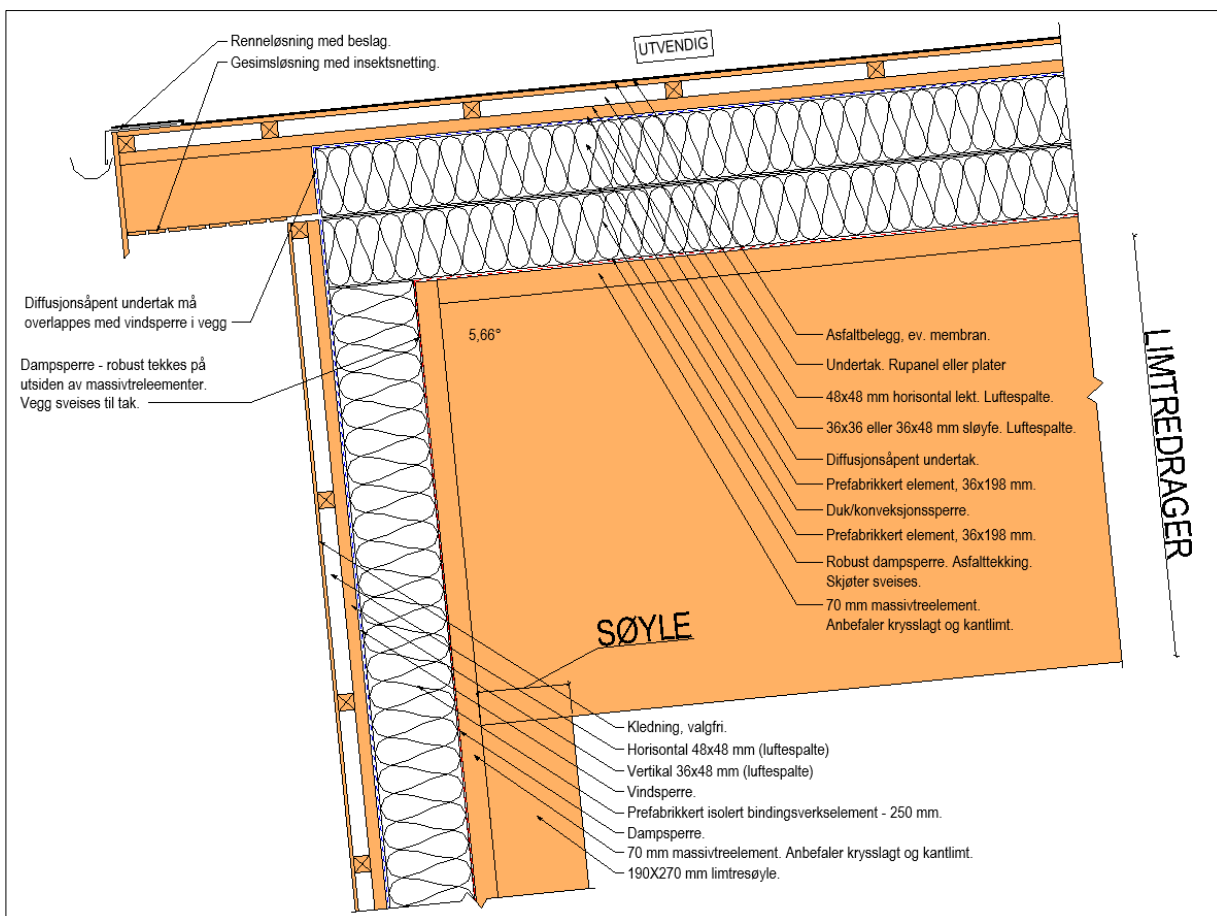
Overganger mot yttervegger blir prinsipielt som vist Figur 31, Figur 32 og Figur 33.



Figur 31: Prinsippsnitt - Overgang vegg/tak - Bæresystem i klimaskall (case S.1 og Y.1). Tegnet i Revit.



Figur 32: Prinsippsnitt - Overgang vegg/tak - Bæresystem delvis i klimaskall (case S.2 og Y.2). Tegnet i Revit.



Figur 33: Prinsippsnitt - Overgang vegg/tak - Inntrukket bæresystem (case S.3 og Y.3). Tegnet i Revit.

De tre ulike takvariantene er simulert statistisk i Flixo med dimensjonerende utetemperatur på -25 °C. Inndata til simuleringer kan sees i Tabell 15 og i vedlegg C.

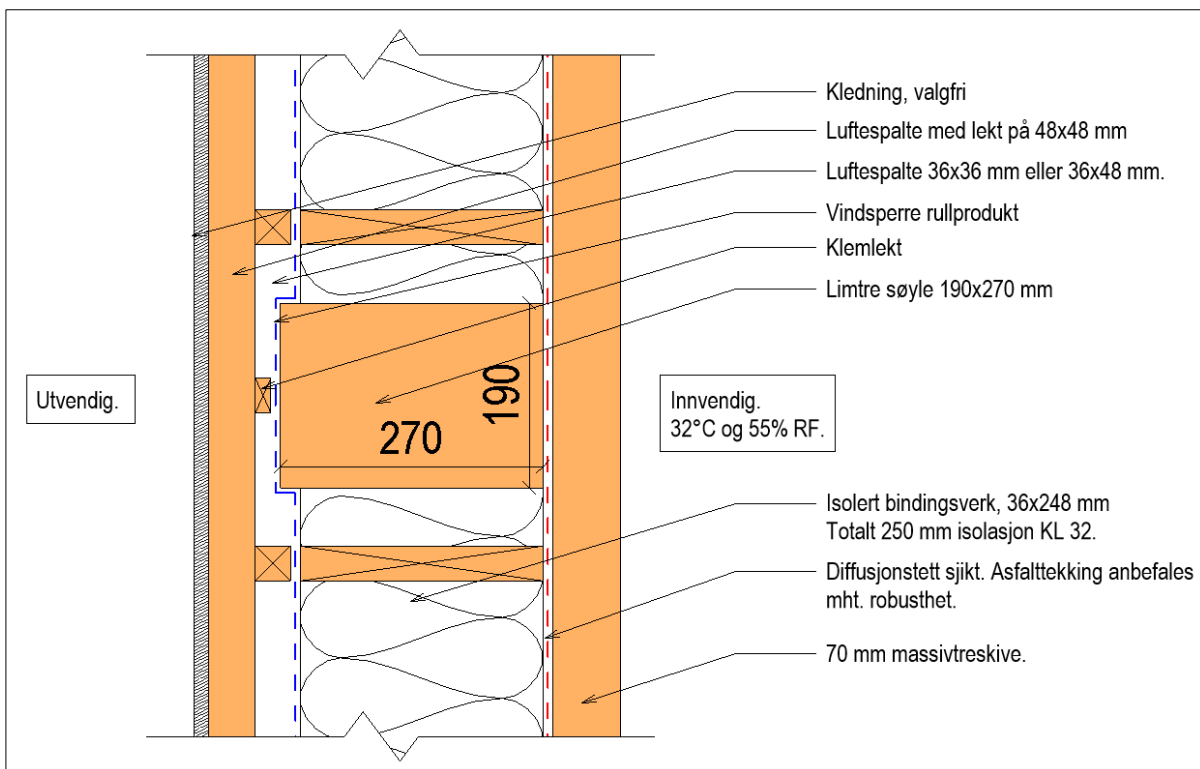
Tabell 15: Mest relevant materialdata som er benyttet i Flixo for yttertak.

Materiale	Varmekonduktivitet[W/mK]
Limtre- og massivtrekonstruksjoner	0,13
Isolert bindingsverkselement (blandet sjikt, 22%)	0,056

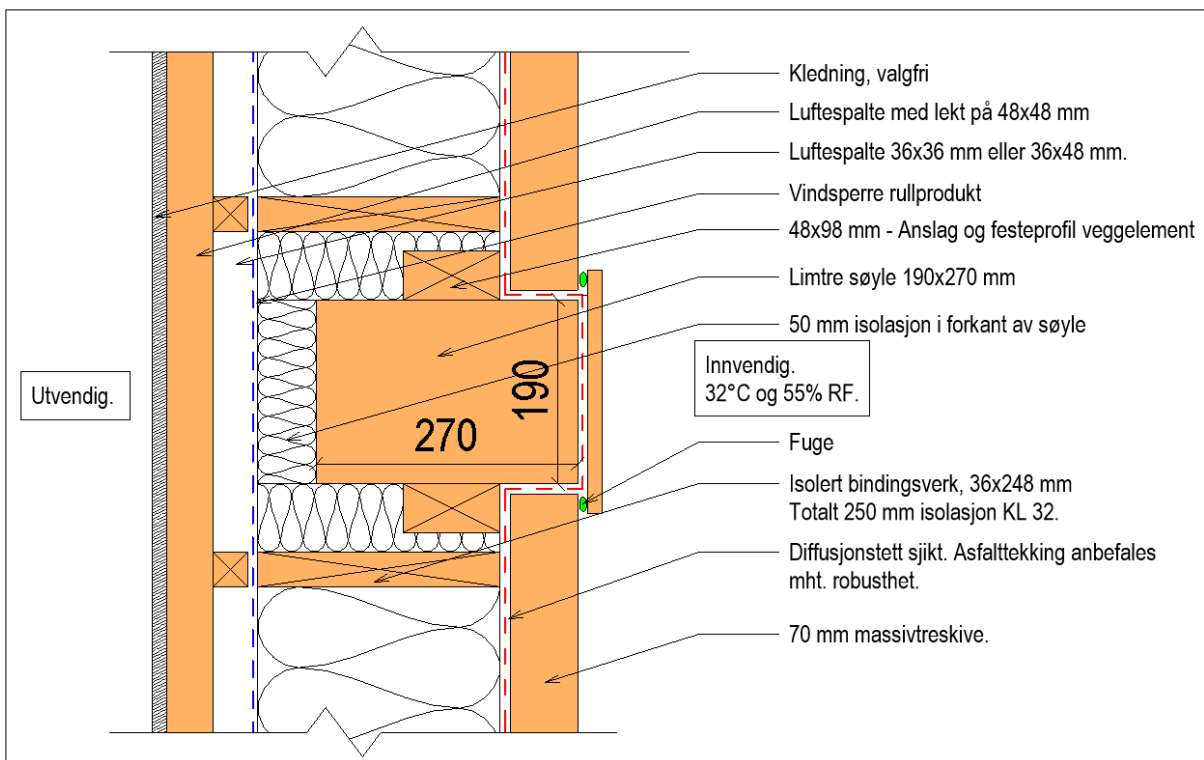
Det analyserte taket har kun 6° fall og har med dette fall under anbefalinger til luftet tak. Dette er beskrevet ytterligere som en usikkerhet i kapittel 3.5.

3.4.4 Oversikt og inndata - Tresøyle i yttervegger

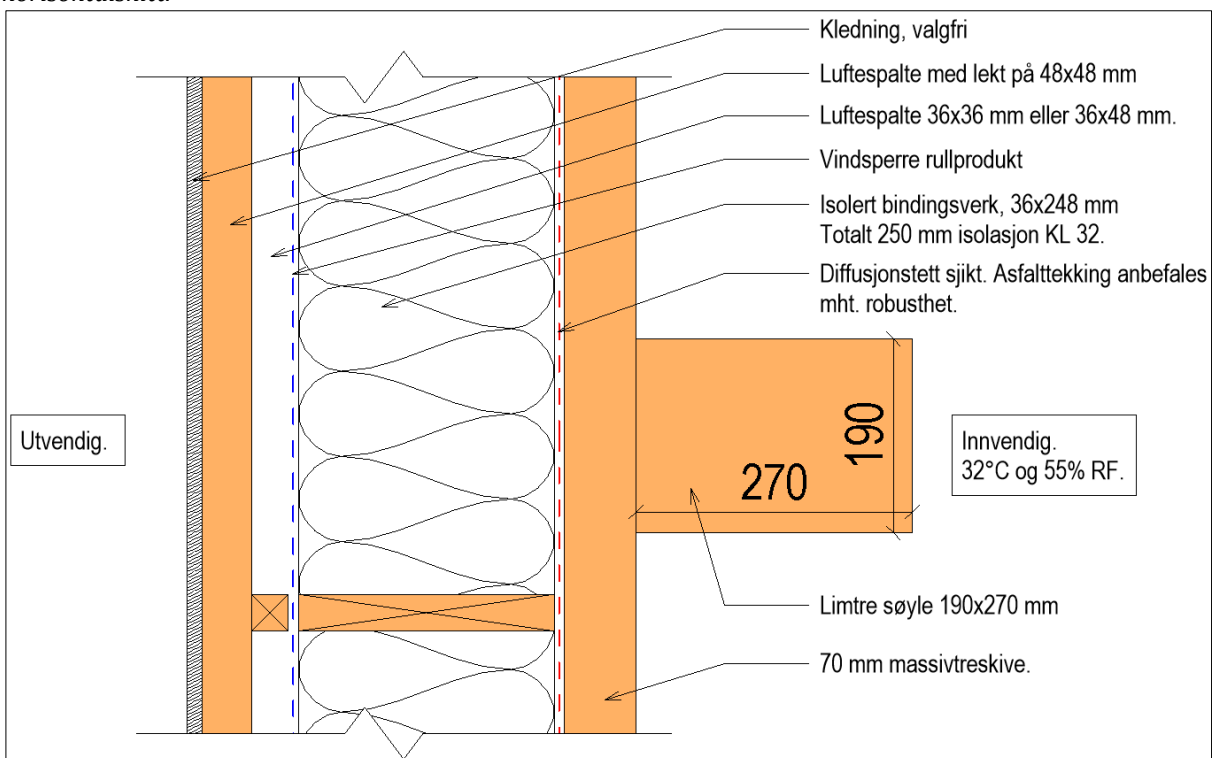
Det er sett på 3 ulike alternativer for plassering av tresøyler (190x270 mm) i yttervegger. Utklipp av de ulike variantene kan sees i Figur 34, Figur 35 og Figur 36.



Figur 34: Søyle på utsiden av massivtreelement, men uten isolasjon utenfor søyle på kald siden (case S.1). Tegnet i Revit, horisontalsnitt.



Figur 35: Søyle mellom massivtreelement og 50 mm isolasjon i forkant av søyle (case S.2). Tegnet i Revit, horisontalsnitt.



Figur 36: Søyle inntrukket innenfor klimaskall (case S.3). Tegnet i Revit, horisontalsnitt.

Simuleringer er utført for å kontrollere kondens- og/eller muggvekstrisiko. Den tradisjonelle anbefalingen for plassering av bæresystem er inntrukket bæresystem som vist i case S.3. Denne søyleplasseringen vil sørge for reduserte kuldebroer og et stabilt klima i kritisk punkt (mellom dampsperrsjikt og massivtreelement). Den vil også sikre et kontinuerlig dampsperrsjikt med færre overganger.

Bakgrunnen for at case 2 med 50 mm isolasjon utenfor søyle er inntrukket mellom massivtreelementer er at dette er den foretrukne metoden med hensyn til elementlengder og skjøting for prinsippet for bygningen. Dette vil medføre redusert material- og tidsbruk, samt kostnader.

Det er gjort simuleringer i Flixo for å kontrollere overflatetemperaturen under statiske forhold i utvalgt kritisk punkt mellom dampspærre og massivtreelement. Det er gjort simuleringer for dimensjonerende utetemperatur på -25°. For de statiske simuleringene er det simulert to ulike varianter for løsningen som er uten isolasjon foran søyle og med 50 mm i forkant. En simulering der treverk er fordelt utover hele isolasjonssjiktet ved å øke lambdaverdien til et homogent sjikt, og en simulering der det er inndelt med separate sjikt for treverk og isolasjon. Dette er gjort for sammenligning og mest reelt resultat.

Inndata for Flixo simuleringene av søyler kan sees i Tabell 18.

Tabell 16: Mest relevant materialdata som er benyttet i Flixo for søyler.

Materiale	Varmekonduktivitet[W/mK]
Limtre- og massivtrekonstruksjoner, samt bindingsverk	0,13
Isolert bindingsverkselement (blandet sjikt, 22%)	0,056
Isolasjonssjikt - alene	0,032

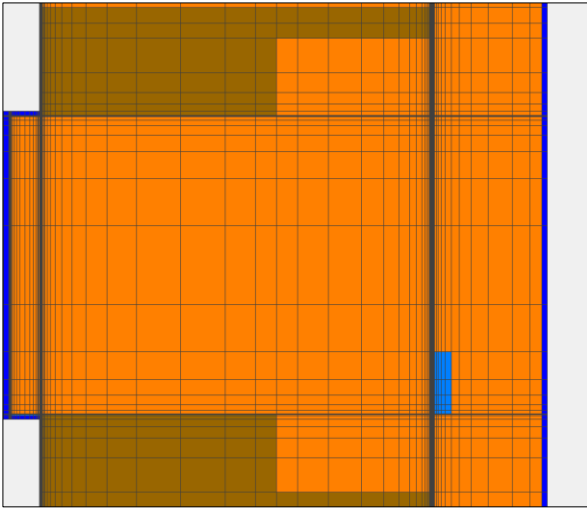
Det er også gjort dynamiske todimensjonale simuleringer i Wufi 2D for å kontrollere kondens- og muggvekstrisiko for de ulike søyleplasseringene med ulike klimafilere. Simuleringer i Wufi 2D er gjort over 5 års perspektiv med tre ulike MDRY klimafilere; Oslo, Bergen og Karasjok.

Materialdataene som er lagt inn i Wufi simuleringene er skandinavisk gran mot tverrgående fiberretning for limtre- og massivtrekonstruksjoner, en dampspærre med S_d -verdi lik 100 meter, vanlig mineralull og et rullprodukt til vindsperre. De mest relevante materialdataene som er lagt inn for de ulike materialene kan sees i Tabell 17.

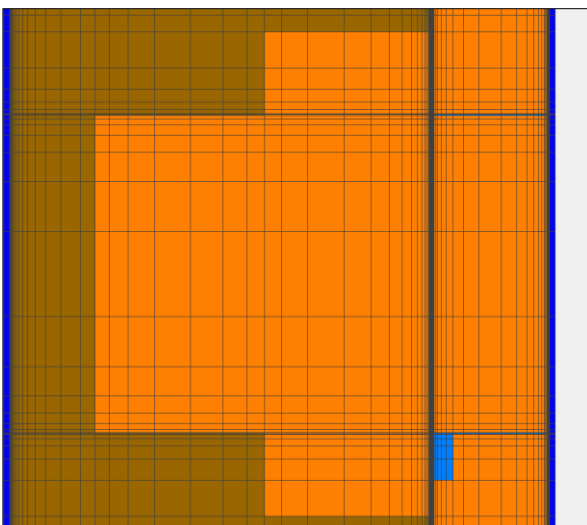
Tabell 17: Mest relevant materialdata som er benyttet i Wufi 2D simuleringer.

Materiale	Densitet [kg/m ³]	Varmekonduktivitet[W/mK]	Vanndampmotstand i s_d -verdi [m]
Limtre- og massivtrekonstruksjoner	420	0,13	0,05
Dampspærre	2400	0,5	100
Isolasjon	20	0,034	0,0013
Vindsperre	130	2,3	0,5

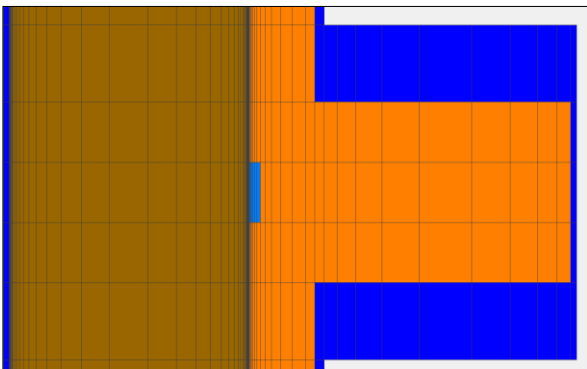
Materialegenskapene til limtre- og massivtrekonstruksjonene som er valgt til simuleringene har en vanndampmotstand som er så lav at den ikke bidrar til å bremse vanndamptransporten utover i veggen. Vanndamp stoppes i stor grad derfor ikke før det treffer dampspærresjikt. Nodene (kritiske punkt) som kontrolleres etter simuleringene i Wufi 2D er derfor satt mellom dampspærresjikt og massivtreelementer og kan sees i Figur 34, Figur 35 og Figur 36.



Figur 37: Utklipp fra valg av punkter/ruter for uthenting av informasjon i Wufi 2D for simulering av søyle uten isolasjon på kald side.



Figur 38: Utklipp fra valg av punkter/ruter for uthenting av informasjon i Wufi 2D for simulering av søyle med 50 mm isolasjon på kald side.



Figur 39: Utklipp fra valg av punkter/ruter for uthenting av informasjon i Wufi 2D for simulering av inntrukket søyle.

Resultatene fra simulering i Wufi 2D er tatt ut i form av temperatur og relativ luftfuktighet (RF) for valgte noder og deretter konvertert til tekstfiler og lastet inn i Wufi Mould Index VTT. Muggindeks etter VTT-modell er tilleggsprogram til Wufi der muggvekstindeksen oppgis med en tall fra 0-6. På bakgrunn av at valgt kritisk punkt er inne i konstruksjonen er grenseverdiene for henholdsvis grønt, gult og rødt lys som vist i Tabell 18.

Tabell 18: Grenseverdier for muggvekstindeks som er valgt for konstruksjonen.

Lys	Muggvekstindeks i innvendig konstruksjon
Grønt	≤ 2,0
Gult	≤ 3,0
Rødt	≥ 3,0

Vurderingen av muggvekstindeksen i VTT er avhengig av hvilket materiale som er valgt i nodene. Egenskapene som er lagt inn for massivtreelementet i utvalgte noder kan sees i Tabell 19.

Tabell 19: Materialeegenskapene massivtreelement som er benyttet i simulering for sjekk av muggvekstindeks i VTT.

	Ubehandlet treverk
Sensitivitetsklasse	Sensitiv (tilsvarer høvlet tre, papirbelagte produkter eller trebaserte plater)
Materialklasse	Signifikant nedgang av vekst (tilsvarer ubehandlet treverk)
Type overflate	Ujevn
Type treverk	hardt tre

I tillegg er det gjort ekstra simuleringer for et såkalt «worst-case» materiale som ligger inne som en default i VTT. Egenskapene til «worst-case» materiale kan sees i Tabell 20.

Tabell 20: Materialeegenskapene til «worst-case» som er benyttet i simulering for sjekk av muggvekstindeks i VTT.

	«worst-case» material
Sensitivitetsklasse	Veldig sensitiv (tilsvarer ubehandlet treverk eller materialer som har inkludert næringsstoffer)
Materialklasse	Relativ lav nedgang av vekst (betong, laminert treverk, PUR, mineralfiber)
Type overflate	Skitten
Type treverk	Ikke parameter for dette materialet.

Bakgrunnen for at det også er gjort simuleringer for et «worst-case»-materiale er for å være på sikker side med hensyn til nedgang av muggvekst. Som beskrevet i teorikapittel er det knyttet stor usikkerhet til modellen på grunn av at variasjonen i reduksjonen er veldig avhengig av hvilket materiale som benyttes. I tillegg til effekten av hurtig skiftende RF. Anbefalingen er å benytte en lav reduksjonsfaktor/materialklasse for modellene [33].

For startfukt i materialer er denne satt til standardverdi på 80 % RF og temperatur til 20 °C. Det er et relativt høyt fuktnivå som er vurdert tilstrekkelig konservativt for simuleringene.

Alle materialdata og forutsetninger som er benyttet i beregninger i både Flixo og Wufi 2D kan også sees i vedlegg D.

3.5 Usikkerhet

Beskrivelsene og detaljene som er utarbeidet for de ulike utvalgte konstruksjonene og overgangene i bygningen er gjort med fokus på byggbarhet, robusthet, fuktsikring, samt luft og diffusjonstetthet. Løsningene er i den bygningsfysiske analysen vurdert tilstrekkelig gode for å ivareta akseptable konstruksjoner. Likevel innebærer alle disse løsningene ulik grad av usikkerhet knyttet til utførelsen. I analysen er det vektlagt å tilstrebe byggbare løsninger som ikke medfører dårlig utførelse på grunn av vanskelige overganger og skjøter. Dette gjelder særlig for både plassering og valg av materiale til luft- og diffusjonstetthet. Løsning og usikkerhet rundt dampsperrsjikt er diskutert videre i kapittel 4.6.6.

Takløsningen som er analysert har kun 6° fall. I henhold til Sintef Byggforsk er et taket definert som skrått dersom takvinkelen er $\geq 6^\circ$. Taket er akkurat innenfor anbefaling, men likevel har taket svært lite fall. Selv med svært godt isolert tak (400 mm isolert bindingsverk) er det viktig at det sikres tilstrekkelig luftespalte. Det er også usikkert om det finnes heller diffusjonsåpne undertak som har teknisk godkjenning for å ligge med mindre fall enn 10°, men forutsatt at det tekkes med asfalttekking som ytterste sjikt er det heller ikke noe krav at funksjonen til vindsperrsjiktet, også må være diffusjonsåpent undertak.

Alle simuleringene innebærer usikkerhet knyttet til programvare og menneskelig feil. Valg av klimafilere, samt materialer til simuleringene er basert på materialdatabasene til de ulike programmene og forskjeller fra faktiske materialer vil forekomme.

For simuleringene som er gjort i Ubakus og Flixo så er disse statiske og er gjort med en dimensjonerende utetemperatur på -25 °C, samt ulike forutsetninger for innnetemperatur og relativ luftfuktighet (RF). Det innebærer at dersom disse forutsetningene endres vil også resultatene av simuleringene endres.

Simuleringene som er gjort i Wufi 2D inkluderer ikke fukttransport som følge av luftlekkasjer (konveksjon). Det vil si at det kun er fukttransport ved diffusjon som er tatt høyde for i simuleringene. For vanddampmotstanden til limtre- og massivtrekonstruksjonene som er benyttet, så er denne satt så lav at massivtreelementene ikke bidrar til noe merkbar bremseeffekt for vanddamptransporten utover i konstruksjonen, vil dette være en konservativ vurdering med hensyn til at vanddamp fra innelufta ikke stanses før den når dampsperrsjiktet utenfor massivtreelementene.

Likevel vil denne forutsetningen kunne være liberal dersom limtre- og/eller massivtrekonstruksjonene skulle bli innebygget med svært høyt fuktinnhold. Simuleringene som er utført er kjørt med startfukt på 80 % RF, som kan ansees som et normalt høyt fuktnivå. Dersom elementene skulle bygges inn med svært høyt fuktnivå vil den lave S_d -verdien i konstruksjonen medføre at konstruksjonen lettere kan tørke ut innover. Til motsetning vil element med høyere S_d -verdi, også som følge av limet i elementene være mer konservativt med hensyn til uttørking av byggfukt.

Alle massivtreelementene har en tykkelse på 70 mm. Dersom tykkelsen øker vil dette medføre at temperaturen ved dampsperrsjikt synker, og risikoen for utfelling av kondens øker.

Simuleringene av muggvekstindeks i Wufi Mould Index VTT bygger på VTT-modellen presentert i 1999. VTT-modellen indikerer muggvekstrisiko basert på materialtype, temperatur og RF. Det er stor usikkerhet til modellen på bakgrunn av valg av materiale og variasjonen i reduksjonen av muggvekst. Dette er bakgrunnen for at muggvekstindeks også er simulert for et «worst-case»-materiale.

4 Resultater og diskusjon

Kapitlene under presenterer resultatene for de ulike beregningene og simuleringene som er utført i forbindelse med case-bygningen. Det er gjort simuleringer av varmetapstall, temperaturprofil i yttervegg-snitt, beregning av kondensrisiko og overflatetemperatur for glassoverflater, samt simuleringer både for statiske og dynamiske forhold av utvalgte konstruksjoner og kuldebroer.

4.1 Avgrensninger

Det er gjort flere avgrensninger i oppgaven på bakgrunn av prioritering og tid. En ikke uttømmende liste over emner som er avgrenset kan sees under.

- **Energibruk:** Arbeidet for energibruk begrenser seg til å kun se på U-verdier og varmetapstall for å sikre en akseptabel konstruksjon, og ser ikke på energibruken i kWh/m² eller annen enhet. Energibruk i svømmehaller er svært avhengig av de interne prosessene og det er lite hensiktsmessig å beregne en svømmehall med normerte internlaster opp mot krav i TEK17 i henhold til idrettsbygning.
- **Inneklima og ventilasjon:** Dette er en stor del av prosjekteringen av svømmehaller, men det er ikke med vurderinger knyttet til ventilasjon og inneklima i denne oppgaven, foruten noe innledende teori og anbefalinger i forbindelse med minste dimensjonerende utetemperatur for å sløyfe bestrykning av vindusflater.
- **Dagslys:** Avgrenses, ingen arbeid på dette foruten om plassering av vinduer blir 0,8 meter over gulv/lysgrav. Svømmehall bygget i massivtre vil ikke ha noen ulemper utover en vanlig svømmehall med tanke på dagslysfaktor. Påvirkning her er i stor grad vinduer, LT, skjerming fra bygninger og refleksjonsfaktorer, samt utforming av rom. Alt dette (foruten refleksjonsfaktor) kan utføres likt for disse bygningene.
- **Klimagassutslipp:** Det var i utgangspunktet tenkt å utføre klimagassberegninger for bygningen og sammenligne dette med tilsvarende bygning utført i betong/stål, men dette avgrenset med hensyn til omfang og tidsbruk.
- **Kostnader:** Det er ikke gjort vurderinger rundt kostnadene til de ulike løsningene som sees på i oppgaven.
- **Innvendige skillekonstruksjoner:** Det er kun beskrevet at innvendige skillekonstruksjoner må ivaretas som følge av de ulike sonene med hensyn til termisk inneklima og klorider, men ikke beskrevet nødvendig oppbygging for å ivareta tilstrekkelig effektivt klimaskille. Dette vil innebære et luft- og diffusjonstett sjikt, samt noe isolasjon dersom tilstøtende rom kan få temperatur under duggpunktstemperatur som følge av f.eks. nattsinking.

4.2 Mengdeberegning

Svømmehallen har et totalt oppvarmet BRA på ca. 2.000 m² og strekker seg over delvis 3. etasjer (inkl. teknisk rom). Bassengflaten har et areal på ca. 350 m² og bredde x lengde er 15 x 25 meter.

Det er gjort manuell oppmåling ved hjelp av PDF og IFC-modell. Sammendrag av nøkkeltall kan sees i Figur 40.

Dokumentasjon av sentrale inndata (1)		
Beskrivelse	Verdi	Dokumentasjon
Areal yttervegger [m ²]:	923	
Areal tak [m ²]:	1222	
Areal gulv [m ²]:	791	
Areal vinduer og ytterdører [m ²]:	192	
Oppvarmet bruksareal (BRA) [m ²]:	1970	
Oppvarmet luftvolum [m ³]:	8746	

Figur 40: Oppsummering av sentrale inndata fra manuell mengdeberegning. Presentert med utklipp fra tabell i Simien.

4.3 Byggeteknisk inndata for klimaskall

Bygningen skal tilstrebe passivhusnivå og det må benyttes godt isolerte konstruksjoner, samt legges stort fokus på tetthet for å sikre at bygningen ivaretar et godt varmetapstall.

Forutsetninger for konstruksjonene i klimaskallet er basert på dette, samt med fokus på byggbarhet og kostnader. En oversikt over klimaskallet som er forutsatt for bygningen kan sees i Tabell 21. Alle U-verdier som er beregnet kan sees i vedlegg E.

Tabell 21: Forutsetninger for konstruksjoner i klimaskall.

Enkeltkomponenter	Inndata, utgangspunkt	Verdi	Kommentar
Gulv på grunn *1.	200 mm betong med 250 mm EPS KL 36.	0,14 W/m ² K 0,11 W/m ² K *1.	U-verdi er beregnet.
Gulv mot fri (plan 2)	100 mm massivtre med 198 mm isolert bjelkelag og 50 mm trinnlydsplate. Forutsatt KL 32 for isolert bjelkelag og KL 40 for trinnlydplater.	0,14 W/m ² K	U-verdi er beregnet. Treandel for bjelkelag er beregnet til 6% forutsatt c/c 600 mm.
Yttervegger	70mm massivtre-element og isolert veggelement med 36x248 mm stendere. Totalt 250 mm isolasjon KL 32.	0,16 W/m ² K	U-verdi er beregnet. Det er forutsatt 20% treandel, ref. stort næringsbygg med 5,5 m/m ² iht. BKS: 471.401.
Yttertak	36x198+198 mm isolert takelement (sperretak), 400 mm isolasjon. Forutsatt KL 34.	0,11 W/m ² K	U-verdi er hentet fra BKS: 471.013.
Vindu/dør/port	Gjennomsnittlig samlet verdi.	0,80 W/m ² K	Forutsatt. Minstekrav i henhold til passivhus.
Lekkasjetall		0,20 oms/h	Minstekrav iht. passivhus er 0,60 oms/h, men 0,20 oms/h er fullt oppnåelig for bygninger med stort volum slik som svømmehall. Det er også kritisk mht. tetthet for sikkerhet mot luftlekkasjer ut i konstruksjoner med påfølgende risiko for kondens. Lekkasjetall må dokumenteres med trykktesting iht. NS-EN 9972:2015 av entreprenør i utførelsesfase.
Normalisert kuldebroverdi (NKV)	For plan 1 er det forutsatt 0,09 W/m ² K på grunn av betongsokkel og gulv på grunn. Dette tilsvarer i henhold til NS3031:2014 betong og 100 mm	0,06 W/m ² K	Minstekrav i henhold til passivhus er 0,03 W/m ² K. Det finnes ingen standardverdi for dette i NS3031:2014 så dokumentasjon på 0,03 W/m ² K må manuelt beregnes. Det er ikke utført beregning av normalisert kuldebroverdi for bygningen i denne oppgaven. Det

	<p>kuldebryter. For resterende plan er det forutsatt $0,05 \text{ W/m}^2\text{K}$ som er standardverdi for bygning med bæresystem i treverk. NKV som er benyttet er en arealvektet middelvei.</p>		<p>tilstrebes minimum 150 mm kuldebryter i sokkel, men vil være mindre utenfor søyler og dekker med hensyn til kostnader og byggbarhet.</p> <p>I Figur 41 er det vist varmetapstall med NKV lik $0,06 \text{ W/m}^2\text{K}$.</p> <p>Om NKV reduseres til $0,03 \text{ W/m}^2\text{K}$ vil også varmetapstallet reduseres med $0,03 \text{ W/m}^2\text{K}$.</p>
--	--	--	--

*1. Ekvivalent U-verdi korrigert med grunnforhold fjell (mest konservativt pga. best varmeledningsevne).

4.4 Varmetapstall

Varmetapstallet for bygningen med normalisert kuldebroverdi lik $0,06 \text{ W/m}^2\text{K}$ blir $0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$. Se Figur 41.

Varmetapsbudsjett	
Beskrivelse	Verdi
Varmetapstall yttervegger	0,08
Varmetapstall tak	0,07
Varmetapstall gulv på grunn/mot det fri	0,05
Varmetapstall glass/vinduer/dører	0,08
Varmetapstall kuldebroer	0,06
Varmetapstall infiltrasjon	0,02
Totalt varmetapstall	0,35
Krav varmetapstall	0,45

Figur 41: Beregnet varmetapstall for bygningen med NKV lik $0,08 \text{ W/m}^2\text{K}$. Utklipp fra figur fra Simien.

Bygningen har fått forutsetninger for et klimaskall som har en god margin til krav for varmetapstall i henhold til passivhuskrav og sørger for et energieffektivt klimaskall. Største bidrag til varmetapstallet er fra yttervegger, vindu/dør/port og kuldebroer. Ytterveggene har kun 250 mm isolert bindingsverk utenfor massivtreelementet på 70 mm, som sammenlignet med tradisjonelle passivhuskonstruksjoner vil være ganske lite. Generelt vil ganske standard passivhus-yttervegger være fra 300-400 mm isolert bindingsverk. Fordelen med 250 mm yttervegger er byggbarheten med hensyn til byggemetoden som benyttes, samt at vi ikke vil få like redusert U-verdi som følge av intern konveksjon slik tykkelser på 300 mm og oppover vil kunne få. For vindu/dør/port er det trolig ikke kostnadseffektivt å forutsette lavere samlet U-verdi enn $0,80 \text{ W/m}^2\text{K}$. Kuldebroene kunne med fordel vært dokumentert med en manuell beregning av kuldebrobudsjett for å redusere samlet verdi, men det vil ikke utføres i denne oppgaven.

Til fordel for bygningen er det et svært godt isolert yttertak og forutsatt svært lavt lekkasjetall. Dette bidrar stort for å sikre et energieffektivt klimaskall.

4.5 Soneinndeling

Det er skissert forslag for soneinndeling for bygningen som er gjort med hensyn til inneklimateperatur og RF), våte/tørre soner og korrosjonssikring. Soneinndelingen må reelt gjøres i samråd med ventilasjon for å sikre at forutsetninger om temperatur og RF, samt korrosjonssikringen samsvarer med soneinndelingen til aggregatene og luftforsyning. Det er ikke gjort vurderinger i forbindelse med ventilasjon i denne oppgaven, så soneinndelingen er gjort etter beste skjønn og evne for å ta hensyn til også prinsipper for ventilering av de ulike arealene.

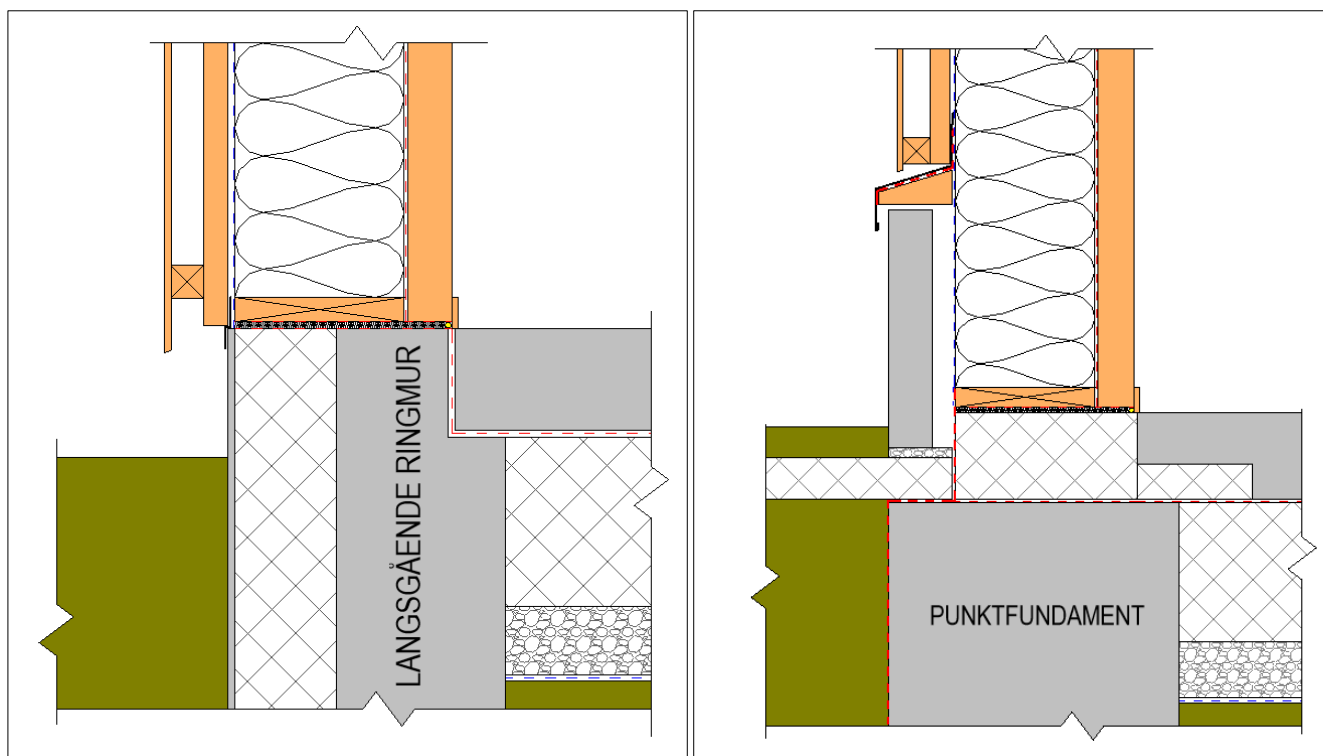
4.6 Utvendig klimaskall

Utvalgte konstruksjoner og overganger i klimaskallet er gjennomgått og detaljert for å sikre byggbare, robust og luft- og diffusjonstette løsninger. Det er også gjort både statiske og dynamiske simuleringer

for å kontrollere risiko for kondens eller muggvekst ved utvalgte konstruksjoner og kuldebroer. Resultatene fra de ulike simuleringene kan sees i delkapitlene under.

Detaljer av ulike utvalgte konstruksjoner og overganger i klimaskallet er tegnet i Revit med fokus på å finne beste løsninger for bygningen.

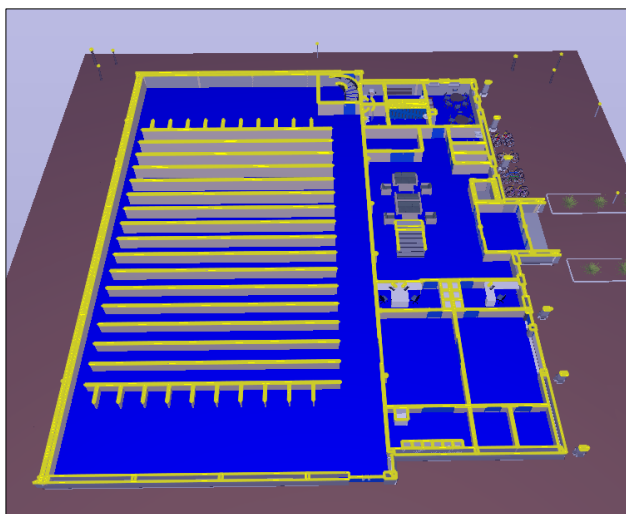
For sokkelløsning er det tradisjonelle prinsippet med ringmursløsning utfordret med en løsning som ikke inneholder ringmur, men prefabrikkerte betongfundamenter (punkter) som limtresøyler monteres i med søylesko. I tillegg innebærer løsningen å etablere en betongbrystning for å sørge for god avstand fra terreng til kledning. Bakgrunnen for løsningen er at dette reduserer byggetid og materialbruk, samt medfører en enklere konstruksjonsmetode. For betongbrystningen sørger dette for en robust og fuktsikker konstruksjonsovergang. Prinsippsnitt ved plassering av isolert veggelement for begge varianter kan sees i Figur 42. Detaljer for tradisjonell sokkelløsning er beskrevet tidligere i kapittel 2.6.3.2, mens utfyllende detaljer om forutsatt løsning kan sees i kapittel 4.6.2.



Figur 42: Prinsippsnitt av de to sokkelløsningene. Venstre er langsgående ringmur, mens høyre er punktfundament med betongbrystning. Tegnet i Revit.

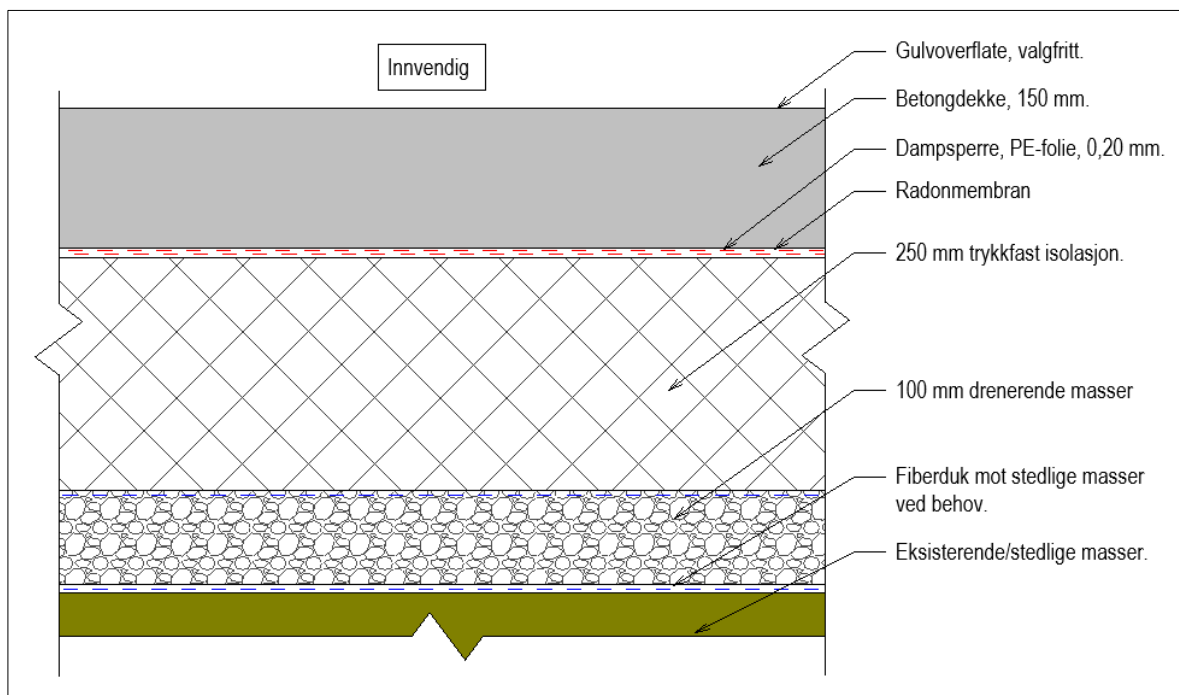
4.6.1 Gulv på grunn

Gulv på grunn utføres som en isolert betongkonstruksjon og gjelder hele dekke i plan 1, oversikt kan sees markert med blått i Figur 43. Gulv på grunn vil ikke være i rom som har svømmehallsklima.



Figur 43: Utklipp fra IFC-modell som viser gulv på grunn.

Betonggulvet isoleres med 250 mm plater av EPS/XPS. Konstruksjonen utføres likt hele veien og er tilsvarende for løsning med bæresystem i klimaskall eller inntrukket bæresystem. Prinsipiell oppbygging av gulvkonstruksjonen mot grunn kan sees i Figur 44.

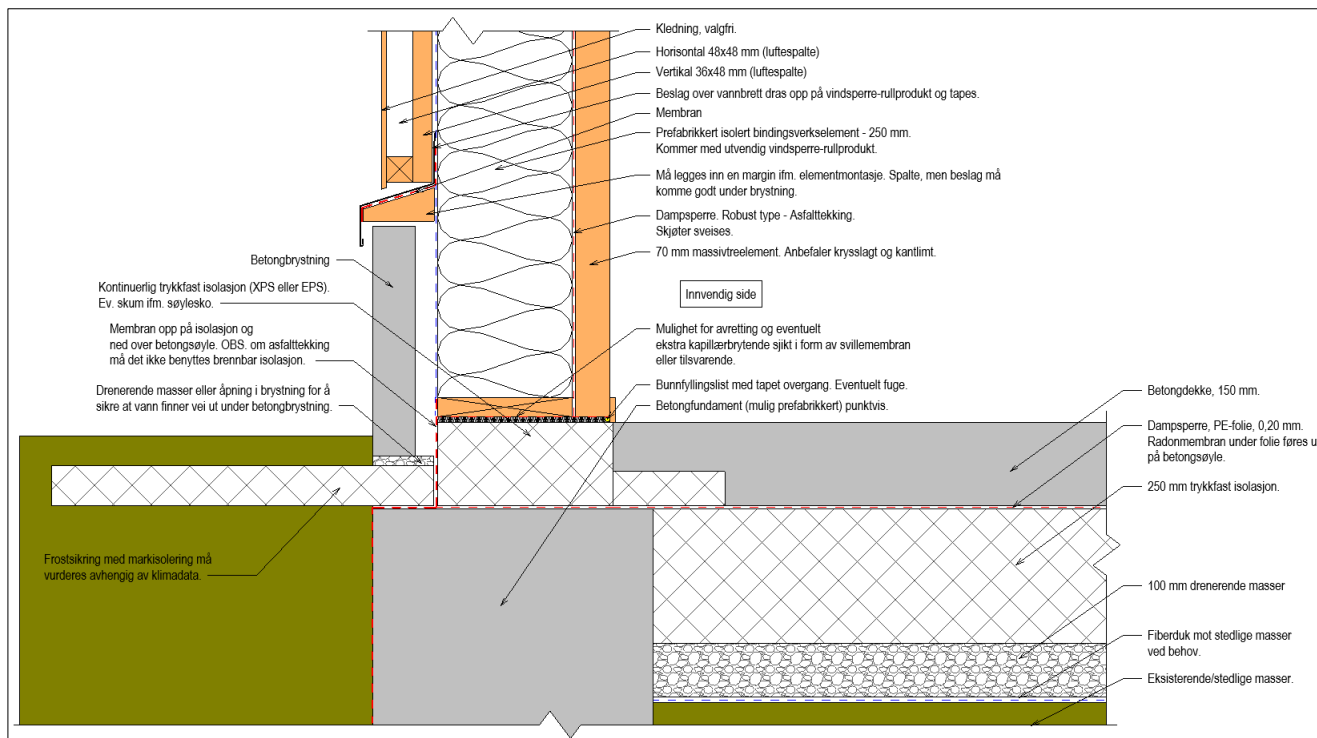


Figur 44: Oppbygging av gulv på grunn. Tegnet i Revit.

4.6.2 Sokkel - Overgang gulv/vegg

En typisk tradisjonell sokkeldetalj er vist i tidligere teorikapittel 2.6.3.2. For å sikre en mer robust løsning og få hevet kledningen slik at den kommer lenger opp fra terrenget er det ønsket å bygge en løsning med en betongbrystning utenfor det prefabrickerte bindingsverkselementet. I tillegg utføres fundamenteringsløsningen ikke med ringmur, men med punktvis betongfundamenter. Tresøylene

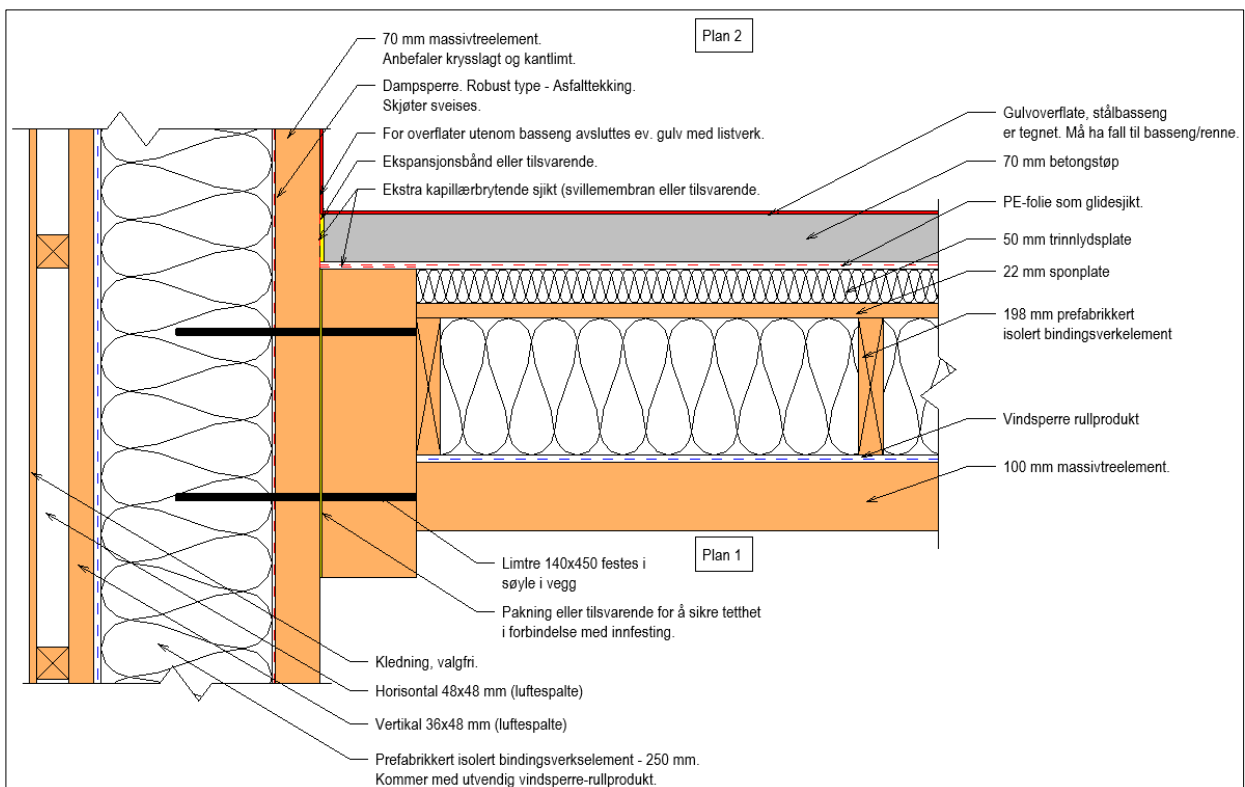
plasseres med søylesko av stål slik at treverket heves fra overkant betonggulv. Med denne løsningen er det mulig å fylle med trykkfast isolasjon hele veien og sikre en kontinuerlig kuldebryter langs hele grunnmuren. Betongbrystningen monteres med spalte mellom isolert bindingsverkelement, men overgang i overkant av brystning utføres med en membran og overliggende beslag for å hindre vann å finne veien ned bak brystning. Eventuelt kondensvann vil renne langs vindsperre og dreneres ut i drenerende masser eller åpning i betongbrystning. En skisse over løsningen kan sees i Figur 45.



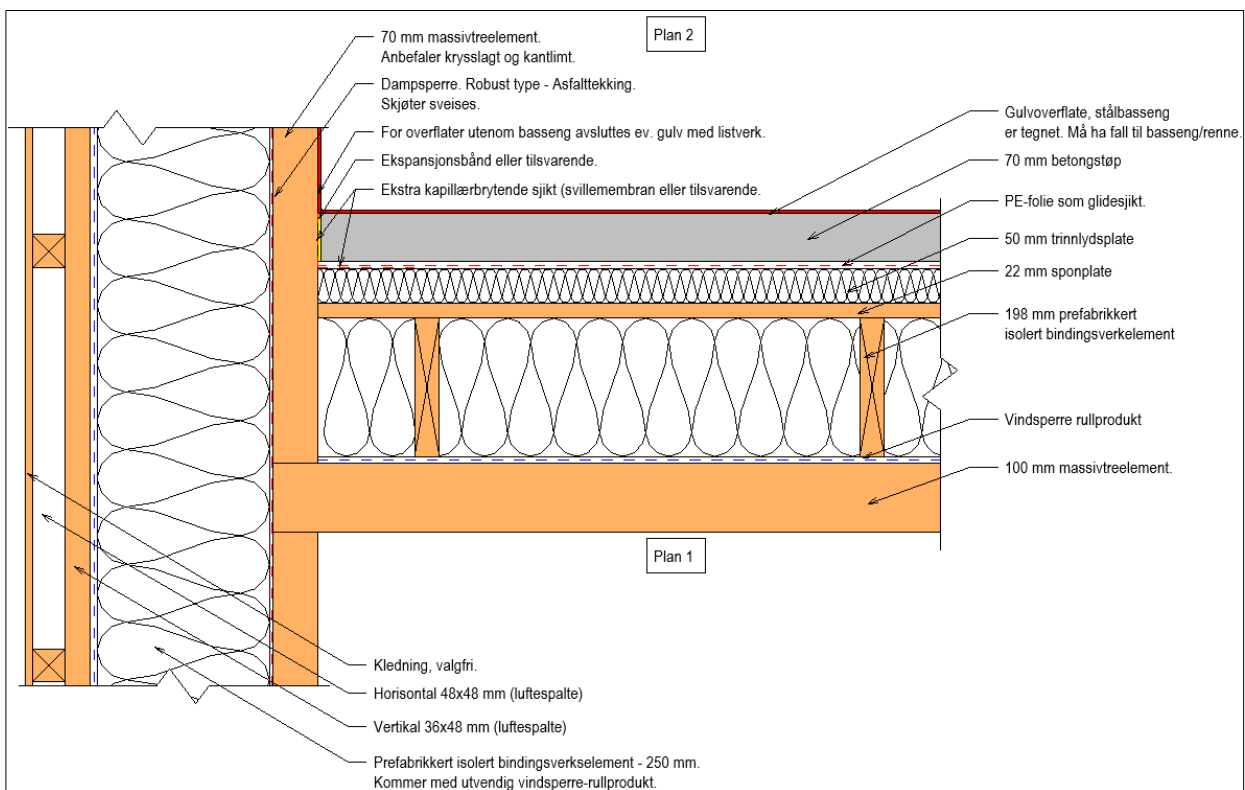
Figur 45: Prinsippsnitt sokkel med luftet betongbrystning og ingen ringmur.

4.6.3 Etasjeskillere og gulv mot friluft

Etasjeskiller mellom plan 1 og 2 bygges med bærende massivtreelement i bunnen av konstruksjonen. Prinsipiell løsning av selve gulvoppbygging og innfesting/overgang inn mot etasjeskiller for bæresystem i klimaskall kan sees i Figur 46 og Figur 47.



Figur 46: Prinsippsnitt - Overgang etasjeskiller/vegg ved bæring.



Figur 47: Prinsippsnitt - Overgang etasjeskiller/vegg uten bæring.

Løsning med inntrukket bæresystem blir helt tilsvarende, men slipper innfesting til søyle gjennom dampspærresjikt på grunn av at søylen vil være innenfor massivtreelementet.

Det er svært viktig med god tetting rundt perforering av dampspærresjiktet. Dette må sees i sammenheng med søylens plassering i klimaskallet. De ulike plasseringene er beskrevet og skissert i kapittel 3.4.4. For løsning der det ikke monteres noe isolasjon utenfor søyle (case S.1) vil innfesting gå gjennom massivtreelement og festes inn i søyle. Med 50 mm isolasjon utenfor søyle (case S.2) vil

innfestingen være direkte i søylen. Sistnevnte vil trolig sikre en enklere utførelse når det kommer til tetthet rundt perforering i forbindelse med innfesting av limtretrager for bæring av etasjeskiller. For å sikre tilstrekkelig tetthet bør det som vist i tegning monteres en form for pakning mellom limtretrager og søyle (eventuelt massivtreelement om ingen isolasjon).

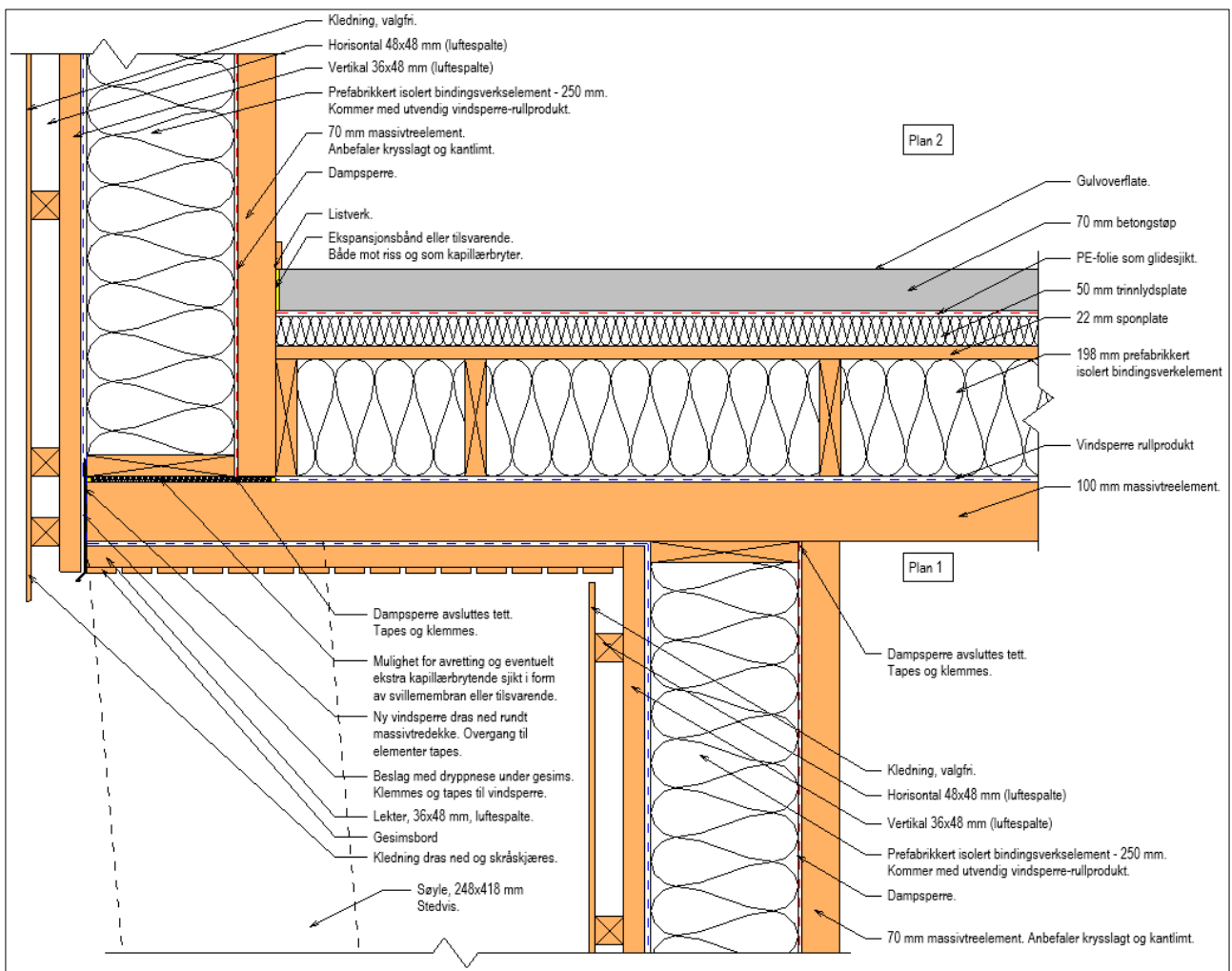
Deler av dekke krager ut til å vende mot friluft i forbindelse med gang- og garderobeareal i plan 2. Plassering kan sees i Figur 48.



Figur 48: Plassering av gulv mot friluft. Utklipp fra IFC-modell.

Det er tenkt at dekket skal krage ut med samme oppbygging som etasjeskiller ellers. Dette vil sikre en effektiv prosess i forbindelse med montering av elementer, samt være en veldig hensiktsmessig måte å bygge på med tanke på kostnader. Løsningen medfører at vi får 100 mm massivtreelement som dras gjennom yttervegg uten noen form for kuldebrobryter. Arealet er som nevnt ikke i forbindelse med svømmehallsklima. Det er gjort en kontrollberegning for konstruksjonen under statiske forhold i Flixo med dimensjonerende utetemperatur lik -25 °C for å kontrollere om innvendig overflate eller dampsperssjikt har kondensrisiko.

Prinsipiell løsning for overgang kan sees i Figur 49.

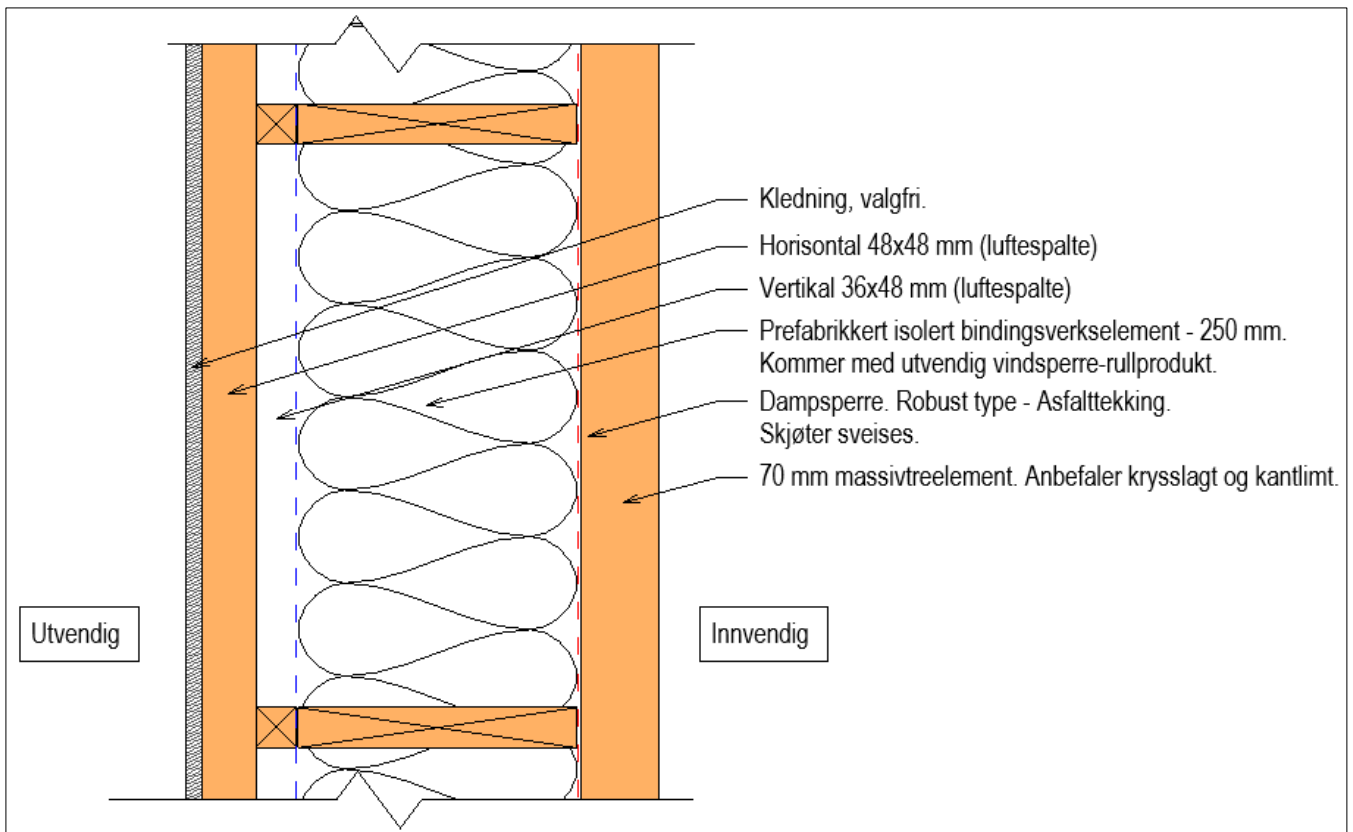


Figur 49: Prinsippsnitt - Overgang etasjeskiller/vegg ved gulv mot friluft.

4.6.4 Yttervegger

Yttervegger mot det fri skal oppføres med massivtrelementer og utenpåliggende prefabrikkert elementer av isolert bindingsverk. Bæresystemet plasseres enten inntrukket innenfor klimaskall eller i klimaskall som tidligere vist i kapittel 3.4.4.

Prinsipiell løsning av standard veggnsnitt for bygningen kan sees i Figur 50.



Figur 50: Prinsippsnitt - Yttervegger mot det fri. Tegnet i Revit, horisontalsnitt.

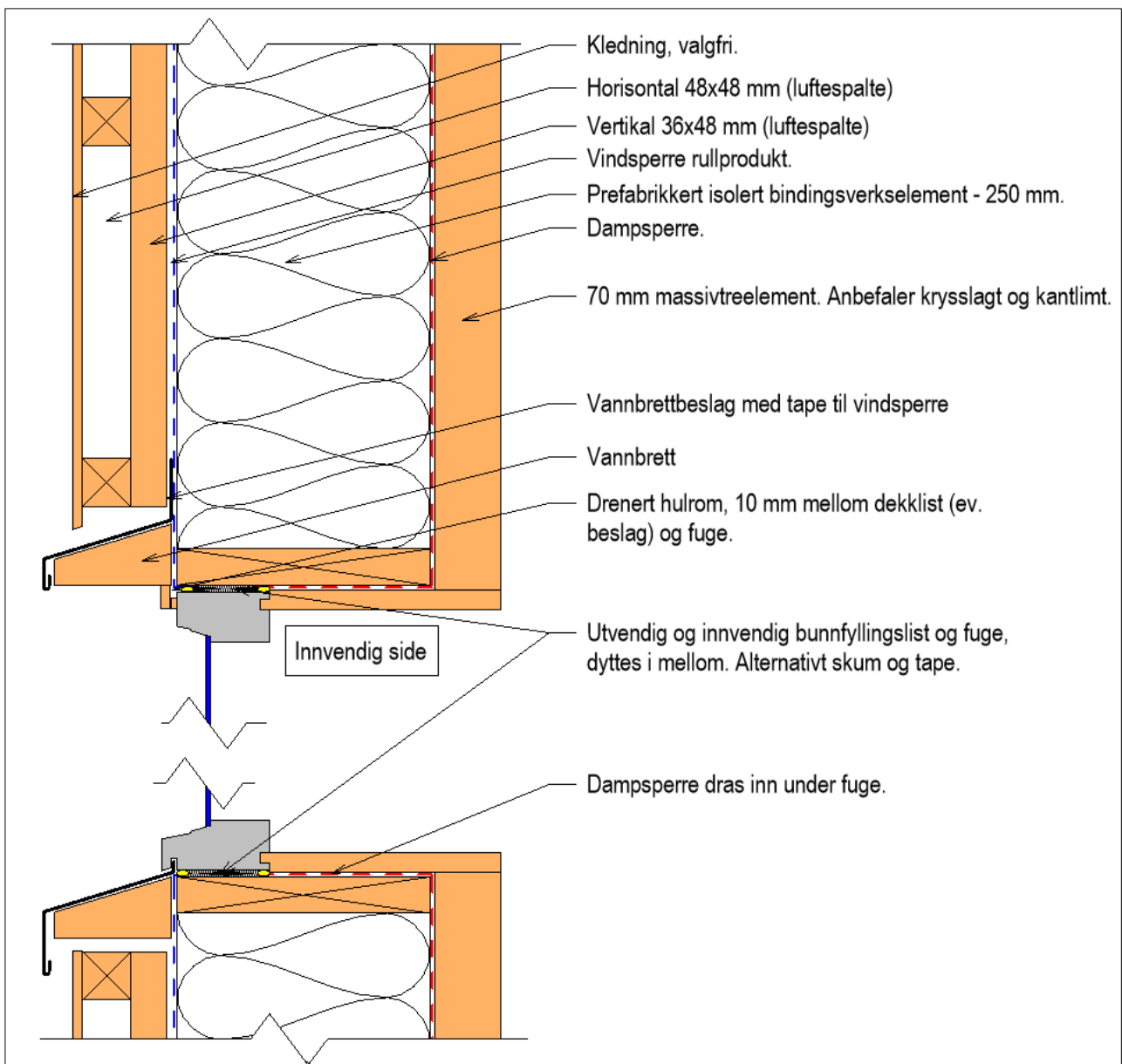
Dampsperre er tenkt utført med asfaltteking og sveisede skjøter. Sjøktet vil ha en S_d -verdi på 100 meter.

I beregning av U-verdi til varmetapstall er det forutsatt en treandel lik 20 %. Dette er i henhold til BKS: 471.401 for stort næringsbygg med 36 mm stendere i ytterveggene. Dette tilsvarer en treandel på 5,5 m^2 . Dette er en konservativ vurdering gitt at stendere plasseres med senteravstand på 1200 mm.

Det er utført en simulering for å kartlegge temperaturprofilen under statiske forhold med dimensjonerende utetemperatur lik $-25\text{ }^\circ\text{C}$ i ytterveggene gitt i prinsippnittet i Figur 50.

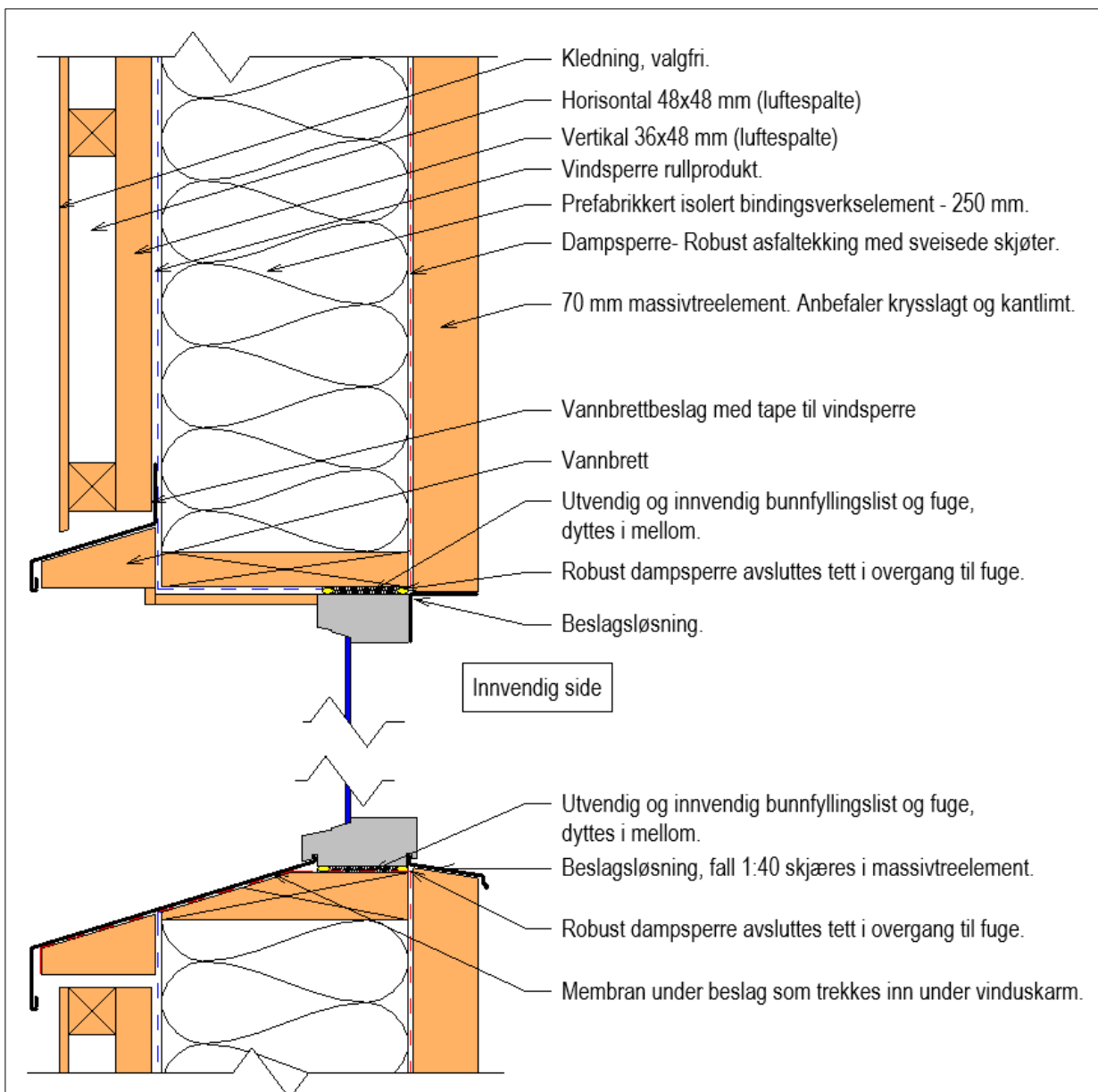
4.6.5 Vinduer

For plassering i rom uten svømmehallsklima bør vinduene av fukttekniske hensyn plasseres slik at spor i bunnkarm er i flukt med vindsperre. Prinsipiell løsning kan sees i Figur 51.



Figur 51: Prinsippskisse vindusinnsetting vanlig rom. Tegnet i Revit.

For vinduer i svømmehallsklima plasseres de slik at de ikke får direkte vannsprut, men trekkes også lenger inn i vegglivet for å unngå kjølige luftlommer i vindusnisjene. Forslag til innvendig side er at massivtreelementet i åpningen skjæres med fall 1:40 og utføres med beslag opp i spor også på innside av karm. Da vil eventuelt kondensvann på innvendig glassoverflate finne veien vekk fra massivtreelement. Beslag utføres med en dryppnese som fører vann ned til vanntett gulvoverflate. Prinsipiell løsning kan sees i Figur 52.



Figur 52: Prinsippskisse vindusinnsetting svømmehall. Tegnet i Revit.

4.6.6 Luft- og diffusjonstetthet

Valg av materiale til luft- og diffusjonstetthet i svømmehall er kritisk for å sikre at bygningen ikke får kondensproblemer som følge av vanndamptransport fra diffusjon eller luftlekkasjer. En vanlig polyetylenfolie (PE-folie) vil ha tilstrekkelig diffusjonstetthet selv med tykkelse på 0,15 mm (S_d -verdi = 70 meter), men bruk av PE-folie innebærer klemte og/eller tapede skjøter, samt at dette er et lite robust produkt med hensyn til mekanisk påkjenning under utførelsesperioden.

For alle løsninger til svømmehallen er det forutsatt en asfalttekkning som helsevises til limtre- og massivtreelementer for å sikre et robust dampsperreresjikt med god motstandsdyktighet mot mekaniske påkjenninger. I tillegg vil skjøter sveises som innebærer mindre risiko for utettheter rundt både skjøter og overganger.

Selv om det for alle løsninger er forutsatt en robust dampsperre av asfalttekkning betyr ikke dette at løsningen ikke er mulig å utføre med en vanlig dampsperre av PE-folie, men det er en stor usikkerhet knyttet til tettheten rundt skjøter og overganger, samt robustheten under utførelsesperioden. For luftlekkasjer som er avhengige av både forskjeller i lufttrykk og utettheter i diffusjonssjiktet for at fukttransport skal oppstå er det en god sikring å unngå klemte og/eller tapede skjøter for å sikre tetthet gitt konsekvensene av fukttransport utover i konstruksjonen i en svømmehall.

En annen fordel med asfalttekking utenfor massivtreelementene vil være at det kan være muligheter for å sveise på dette før elementene transporteres ut på plass og monteres. Forutsatt at det på byggeplassen er en taktekker tilgjengelig vil skjøter og overganger kunne sveises fortløpende under monteringen. Dette vil være svært avgjørende for å sikre at elementene fuktes ned under byggeperioden. Alternativt anbefales det at det monteres under tak, men dette er trolig ikke forsvarlig med hensyn til kostnader. Massivtreelementer bør for øvrig monteres under oppholdsvær for å hindre oppfukning.

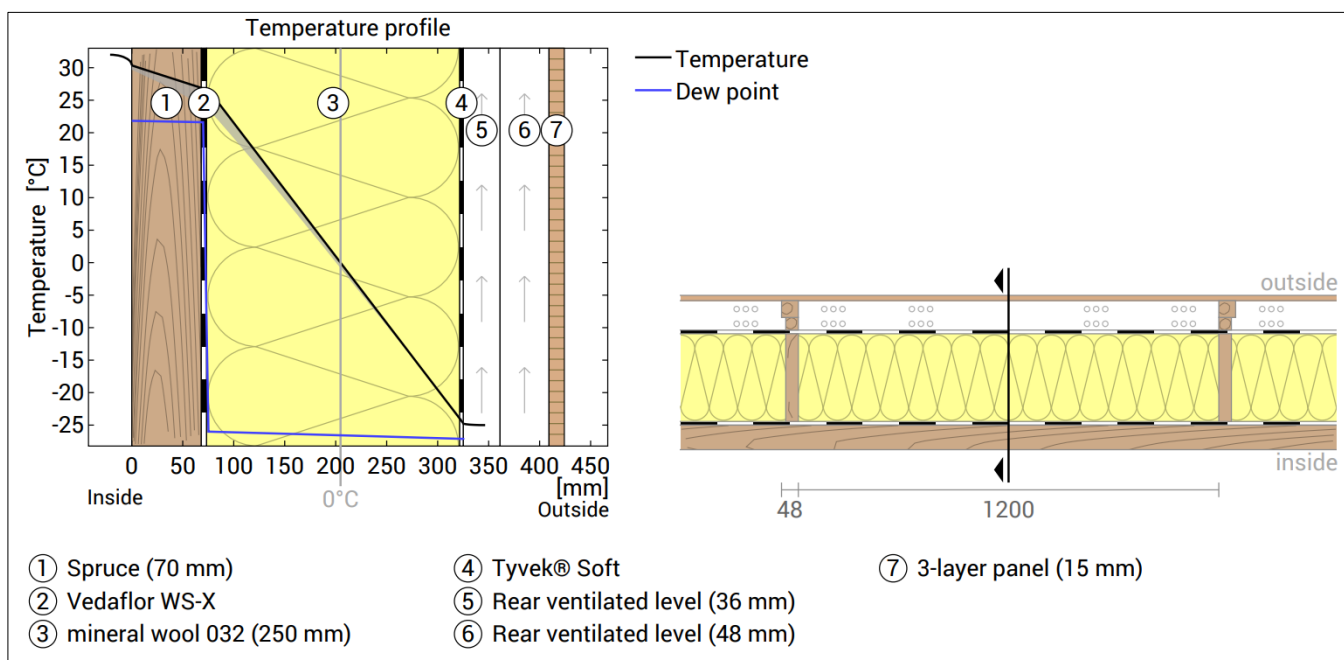
I tillegg til den robuste dampsperra med asfalttekking anbefales det krysslagte og kantlimte massivtreelementer for best tetthet også i elementsjiktet. Dette vil redusere oppsprekking i elementene.

Alle løsninger forutsetter bruk av en robust dampsperre med sveisede skjøter for å ivareta god luft- og diffusjonstetting. Likevel så vil løsninger med bæresystem plassert i klimaskall medføre mer kompliserte og krevende overganger for å sikre et 100 % tett dampsperrsjikt. Det er gjort flere forutsetninger i forbindelse med sveising av membran, fuging og pakninger for å sørge for tetthet for disse løsningene, men løsning med inntrukket bæresystem vil uansett være den beste løsningen for å sikre et kontinuerlig og tett dampsperrsjikt.

For alle løsninger så anbefales det i tillegg til robust membran at det benyttes krysslagte og kantlimte massivtreelementer for best tetthet også i elementsjiktet. Dette vil kunne halvere luftlekkasjene [7] som finner veien inn til dampsperrsjikt.

4.6.7 Temperaturprofil i yttervegg

Temperaturprofilen over ytterveggen ved forutsatt svømmehallsklima (32 °C og 55 % RF) og forutsatt dimensjonerende utetemperatur på -25 °C kan sees i Figur 53.



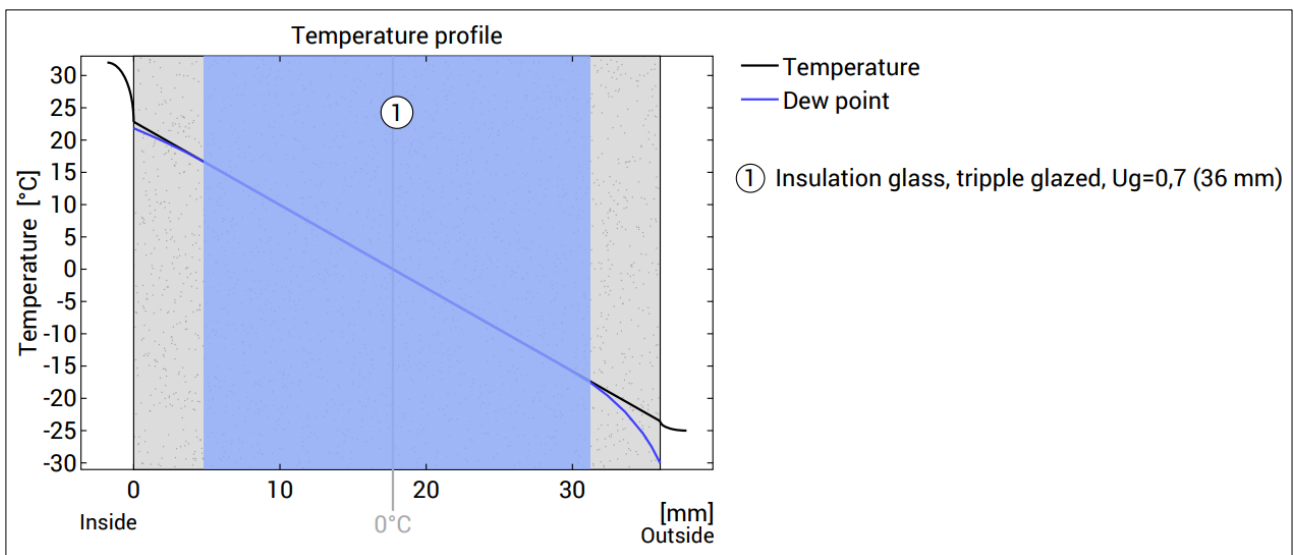
Figur 53: Temperaturprofil i yttervegg ved standard snitt. Beregnet i Ubakus [29].

Konstruksjonen ingen risiko for utfelling av kondens gitt de statiske forholdene. Overflatetemperaturen ble i Ubakus beregnet til 29,7 °C på innvendig overflate.

4.6.8 Kondensrisiko for glassoverflater

Forutsatt at RF ikke overstiger 55 % er det ikke behov for bestrykning før temperaturen ute kommer under -30 °C. Ved dimensjonerende utetemperatur lik -25 °C felles det ikke ut kondens før RF er på 58%.

Temperaturfordeling over glasset ved dimensjonerende verdier: inneluft 32 °C og RF 55 %, uteluft -25 °C kan sees i Figur 54.

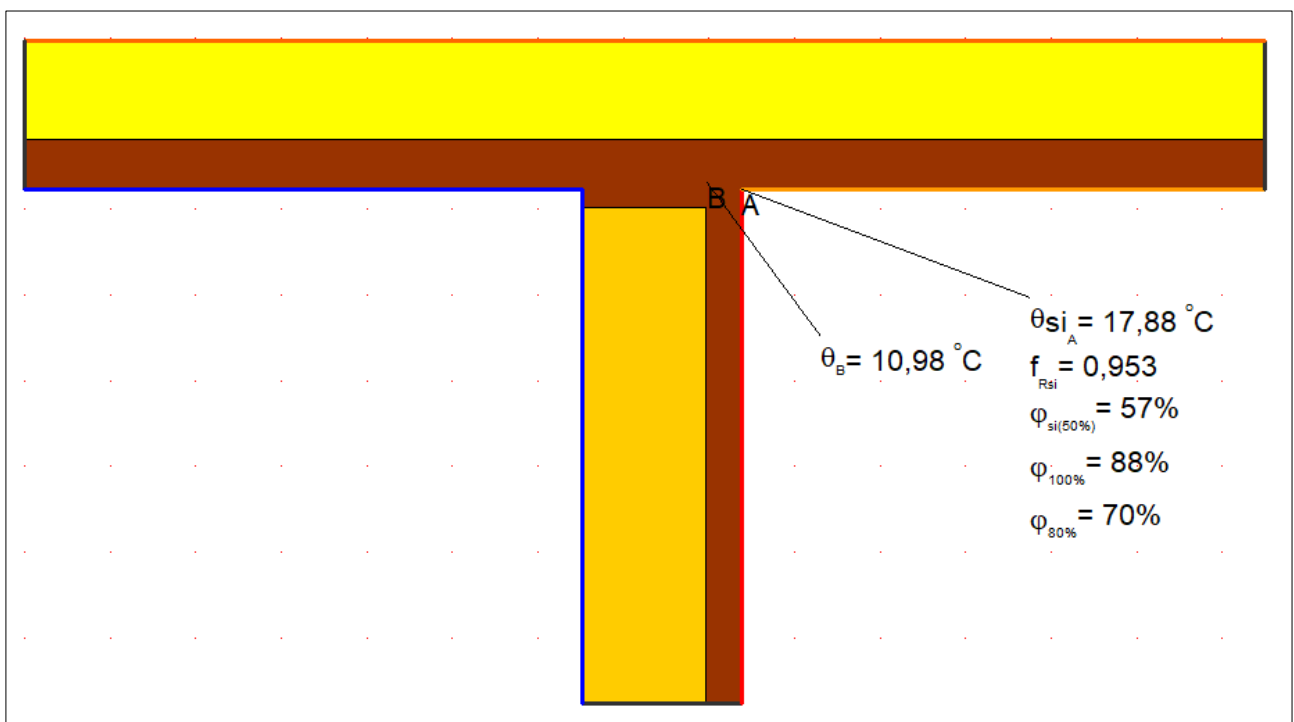


Figur 54: Temperaturfordeling over glass. Utklipp fra simulering i Ubakus.

Det er kun tenkt glass-/aluminiumsvinduer for å begrense risiko for skader. Bestrykning må ivaretas med ventilasjon (varm, tørr luft) dersom bygningen plasseres på sted som har laveste tredøgnsmiddeltemperatur under -30 °C.

4.6.9 Gulv mot friluft - Resultat beregninger

Gulv mot friluft ved vanlig oppvarmet rom er simulert under statiske forhold i Flixo med dimensjonerende utetemperatur på -25 °C. Resultat fra simulering viser overflatetemperatur på $17,88$ °C på innvendig overflate og 11 °C ved dampsperresjikt. Se utklipp fra simulering i Figur 55.

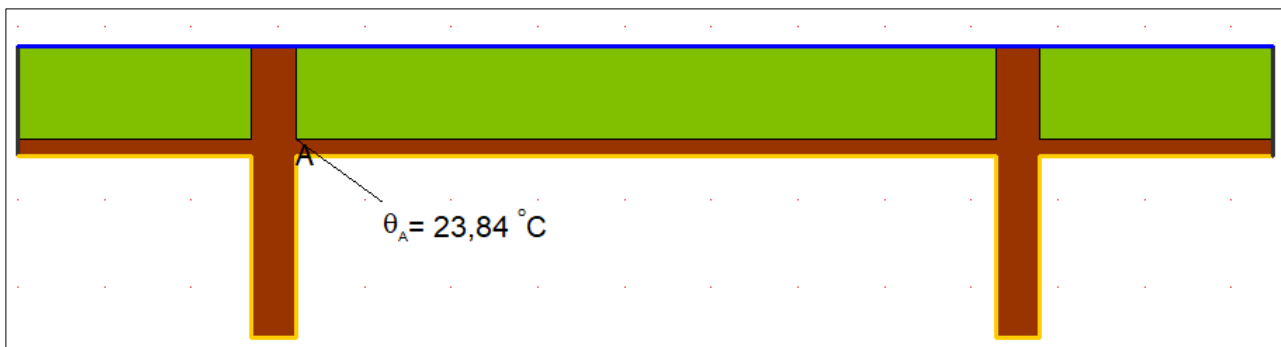


Figur 55: Utklipp fra Flixo simulering av gulv mot friluft og dimensjonerende utetemperatur på -25 °C.

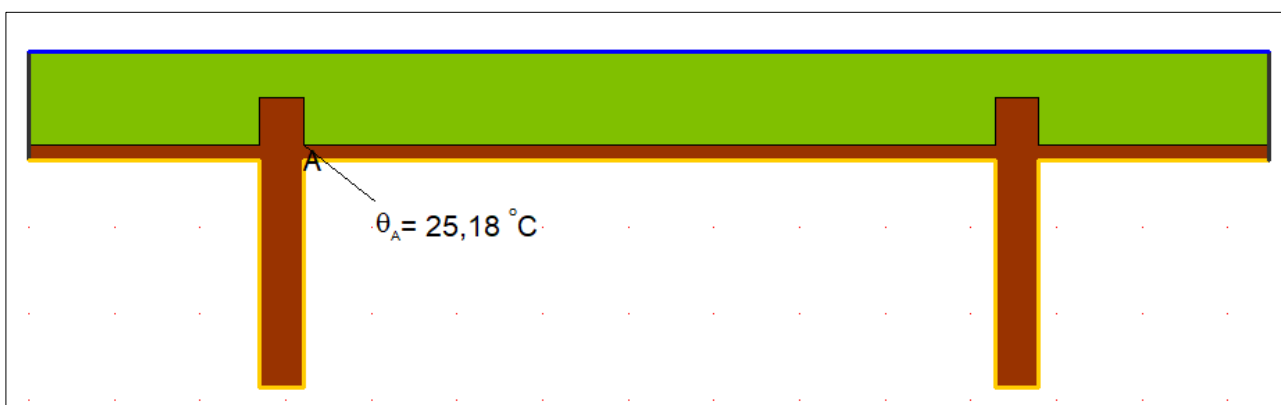
Konstruksjonen har ikke risiko for utfelling av kondens på vinterstid forutsatt temperatur på 22 °C og RF på $25-30$ %. Duggpunktstemperaturen her vil som nevnt være $1,1$ °C til $3,6$ °C.

4.6.10 Yttertak - Resultat beregninger

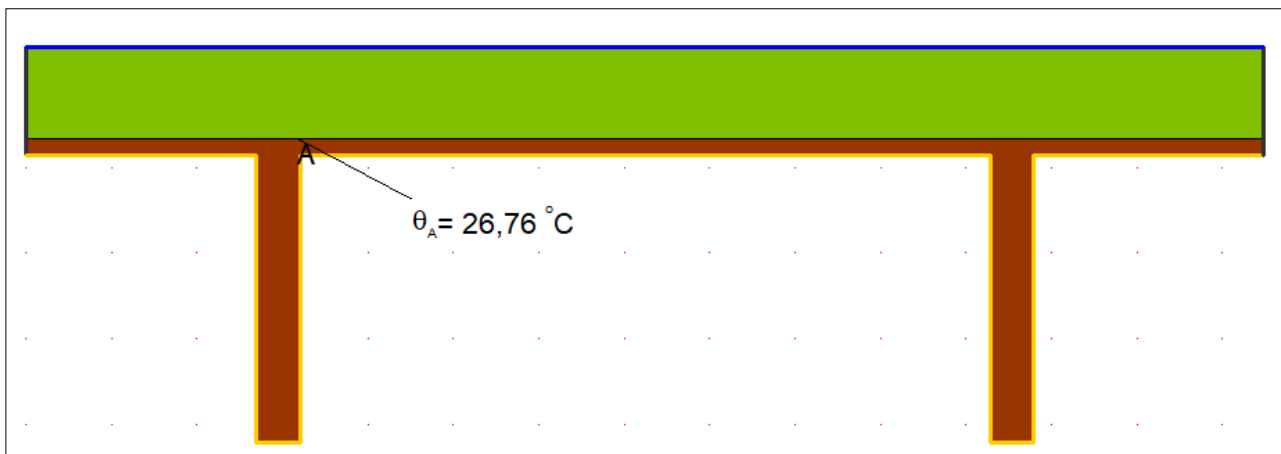
Resultat for de tre ulike takvariantene i svømmehallsklima (32 °C og 55 % RF) for statiske simuleringer i Flixo med dimensjonerende utetemperatur -25 °C kan sees i Figur 56, Figur 57 og Figur 58. Alle simuleringer har isolert bindingsverksjikt fordelt utover som et homogent sjikt.



Figur 56: Simulering for yttertak med takdragere plassert likt med ytterkant isolasjon.



Figur 57: Simulering for yttertak med takdragere delvis inntrukket (200 mm).



Figur 58: Simulering for yttertak med takdragere helt inntrukket.

Ingen av de ulike alternativene har temperatur under duggpunktstemperatur i kritisk punkt (varm side av robust dampsperre). Det er ikke gjort simuleringer i Wufi for yttertaksløsningene på bakgrunn av at disse kom vesentlig bedre ut i Flixo simuleringer på grunn av økt størrelse på de prefabrickerte isolerte bindingsverkselementer. Elementene sørger for en fortrenningseffekt og øker temperaturen ved kritisk punkt. I tillegg er det ikke hensiktsmessig for utførelsen og benytte alternativ 1 som ikke har noe isolasjon på kald side.

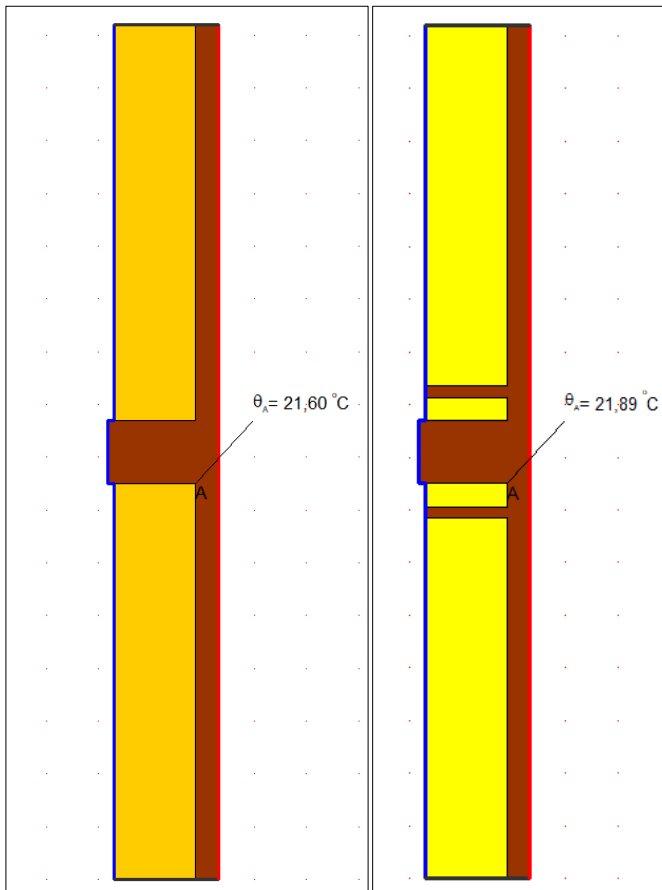
4.6.11 Søyler i yttervegger - Resultat beregninger

4.6.11.1 Flixo - Statistiske simuleringer

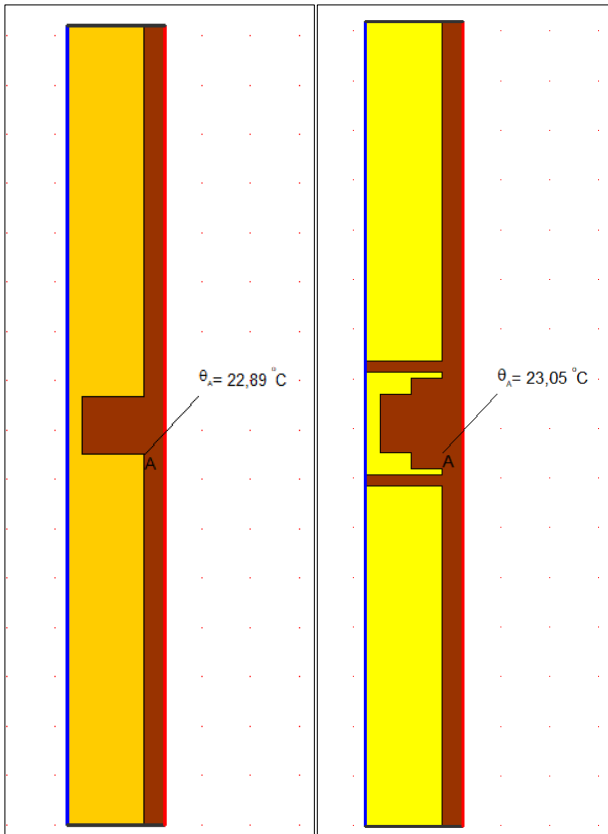
Gitt dimensjonerende utetemperatur lik 25 °C havner simulering av søyle uten isolasjon på kald side under duggpunktstemperatur (21,80 °C) for kritisk punkt ved simulering med trevirke fordelt utover blandet sjikt, og har derfor utfelling av kondens under forutsatte forhold. For simuleringen med separate sjikt er temperatur akkurat over duggpunktstemperatur.

For både simulering med 50 mm isolasjon i forkant av søyle og med inntrukket bæresystem havner overflatetemperatur ved kritisk punkt over duggpunktstemperatur.

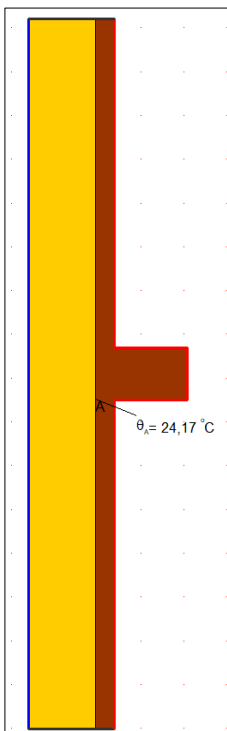
Oppsummering kan sees i Figur 59, Figur 60 og Figur 61.



Figur 59: Utklipp fra resultater fra simulering for søyle uten isolasjon på kald side og -25 °C utetemperatur. Venstre viser simulering med homogent sjikt (blandet trevirke og isolasjon), mens simulering til høyre viser separate sjikt.



Figur 60: Utklipp fra resultater fra simulering for søyle med 50 mm isolasjon på kald side og -25°C utetemperatur. Venstre viser simulering med homogent sjikt (blandet trevirke og isolasjon), mens simulering til høyre viser separate sjikt.



Figur 61: Utklipp fra resultater fra simulering for søyle med inntrukket bæresystem. Kun simulering med homogent sjikt (blandet trevirke og isolasjon).

4.6.11.2 Wufi 2D - Dynamiske simuleringer

De dynamiske simuleringene viser at høyeste relative luftfuktighet oppnås for den uisolert søylen (case S.1) med klimadata fra Karasjok, og denne er på underkant av 83 % RF. Denne konstruksjonen pendler med ganske store svingninger fra rundt 70-83 % RF. Gitt at de vanligste muggsoppene innendørs krever

over 80-85 % RF ansees dette som en risikokonstruksjon i dette klimaet. Med hensyn til temperaturen på samme tidspunkt ligger denne rundt 19 °C er også denne temperaturen under duggpunkttemperaturen til inneluften i bassengområde, som vil si at luftlekkasjer via utettheter i massivtreelementet fra innvendig rom som treffer overflaten på 19 °C vil kondensere. Muggvekst er som nevnt i teorikapittel også avhengig av at fukt- og temperaturforholdene er gunstige over tid, så selv om både temperatur og RF overstiger anbefalte verdier og ansees som en risikokonstruksjon gitt den dynamiske simuleringen i Wufi 2D er det også gjort simuleringer for samme punkt i Wufi Mould Index VTT som å se om muggvekstindeksen med hensyn til plassering i vegglivet og materialtype fortsatt tilsier at konstruksjonen har muggvekstrisiko. Resultatene fra simuleringene her kan sees i kapittel 4.6.11.3.

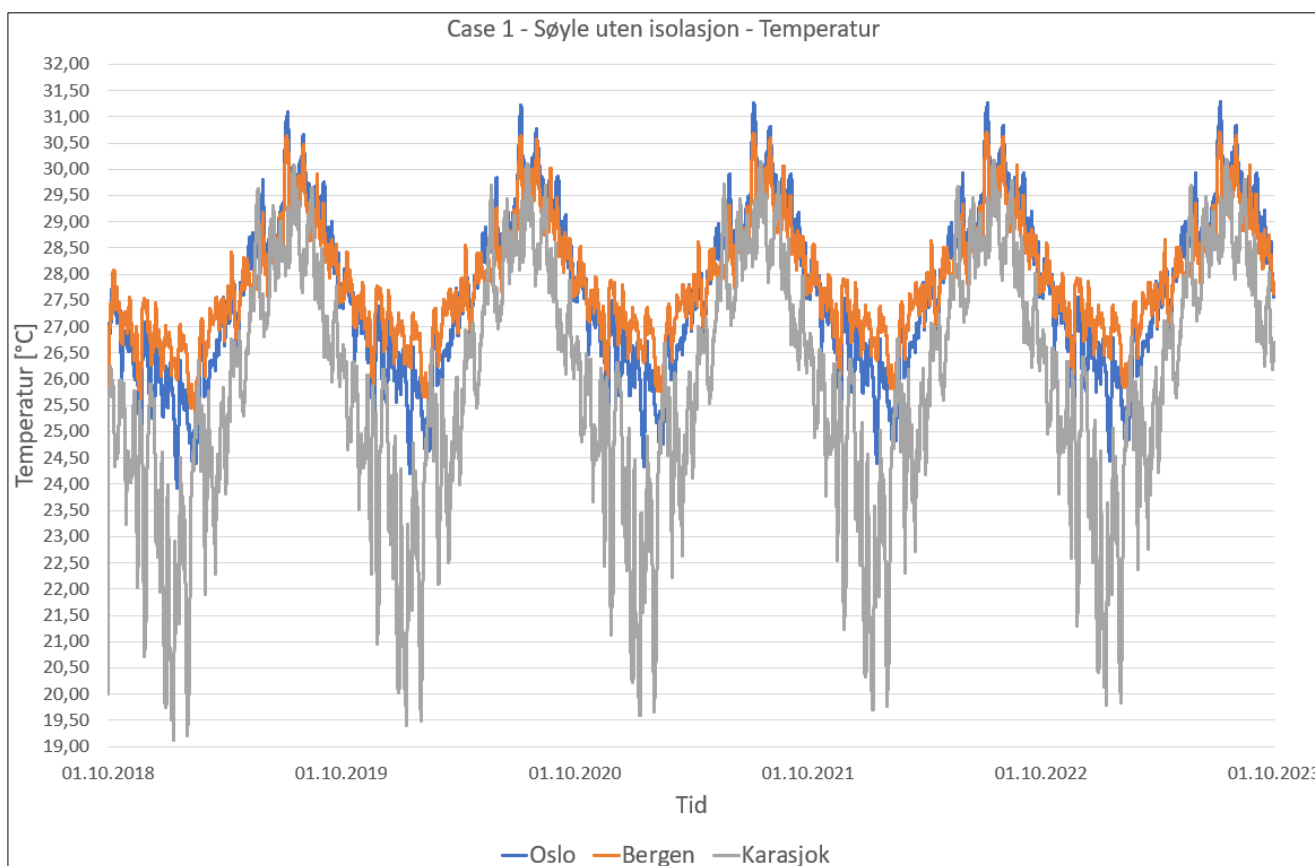
For de resterende klimafilene (Oslo og Bergen) har søyle i yttervegg uten noe isolasjon på kald side (case S.1) vesentlig lavere RF og holder høyere temperatur. Bergen kommer best ut med RF mellom 65-73 % og temperatur fra 25,5 °C til 30,5 °C. Oslo svinger fra 63,5-75,5 % RF og fra 24 °C til 31 °C. Selv om konstruksjonen i de mildere klimaene kommer bedre ut på verste dag har også kritisk punkt for simuleringene til disse klimafilene store svingninger og et relativt ustabilt klima.

Dette er noe som merkes godt med en gang søylen får 50 mm isolasjon på kald side (case S.2). Da vil svingningene i RF og temperatur for henholdsvis Karasjok, Oslo og Bergen være fra 64,5-76,5 %, 61-69 % og 62-68% RF og 22,5-30,5 °C, 26-31,5 °C og 27-31 °C. Konstruksjonen er vesentlig mer stabil og har ikke for noen klimafilene temperatur under duggpunktstemperatur eller RF over 80%.

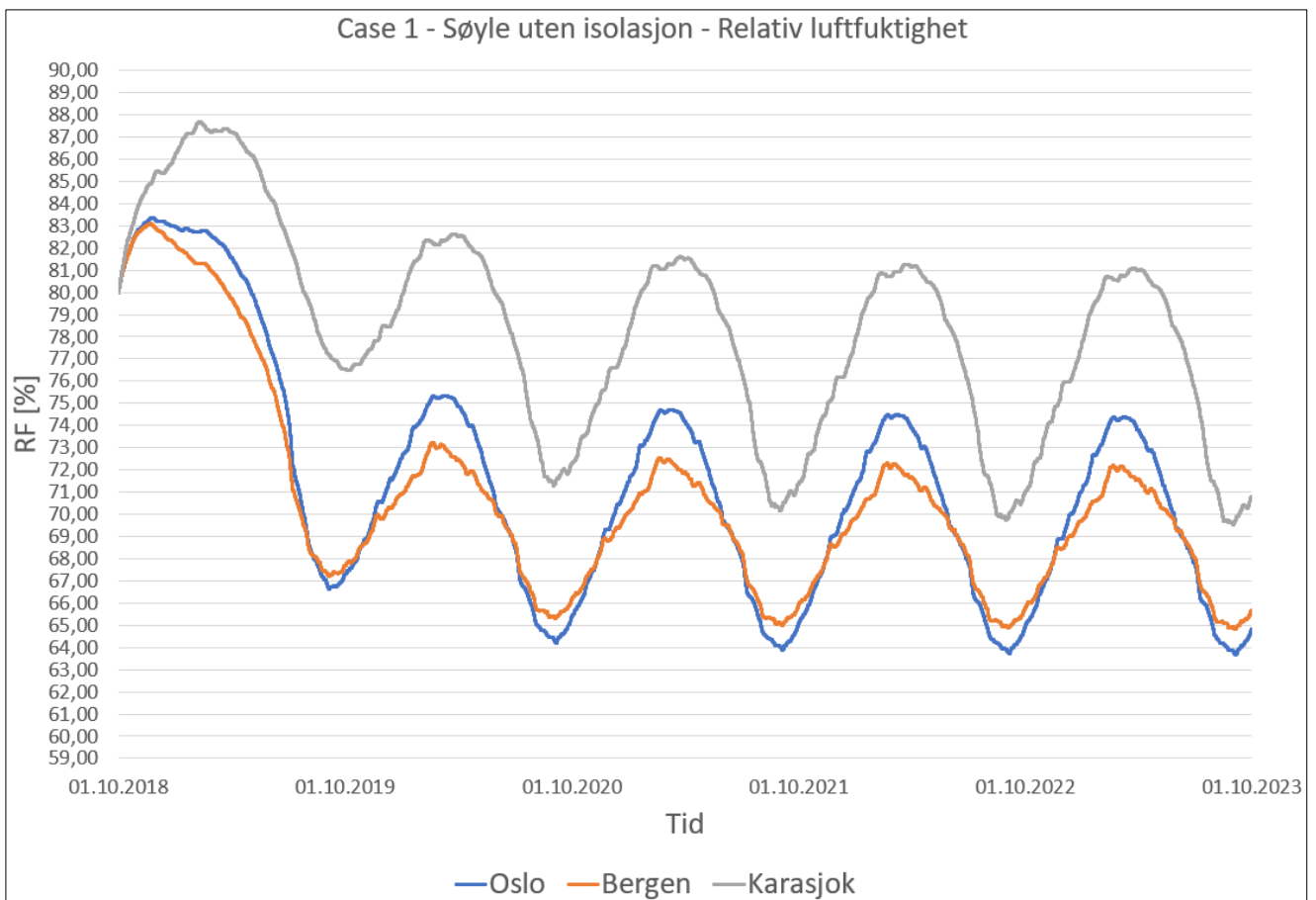
For siste case med inntrukket bæresystem (case S.3) er forholdene ved kritisk punkt svært stabile og konstruksjonen styres mer av innvendig klima enn av de utvendige variasjonene. RF for henholdsvis Karasjok, Oslo og Bergen vil med inntrukket klimaskall være fra 61-65,5 %, 59-62 % og 60-61,5% RF og temperaturen 26,5-31,5 °C, 28,5-32 °C og 29-31,5 °C.

Resultatene for temperatur [°C] og RF [%] for de tre ulike casene i for de tre ulike klimaene (Oslo, Bergen, Karasjok) er presentert med ulike linjediagram utarbeidet i Excel under. Fullstendige resultater for alle simuleringer i Wufi 2D kan sees i vedlegg F.

Sammenstilte resultater for Case S.1 - Uisolert søyle kan sees i Figur 62 og Figur 63.

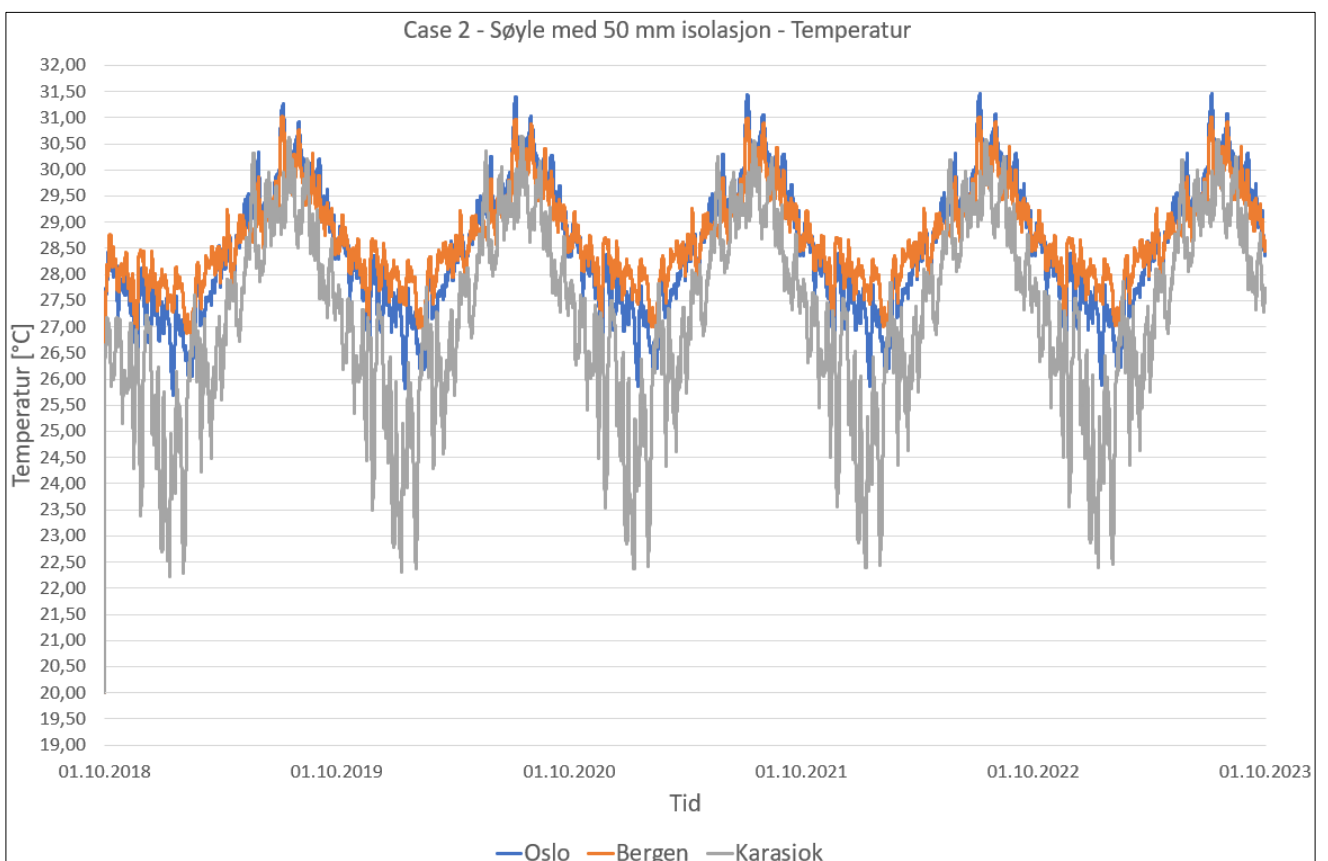


Figur 62: Sammenstilte linjediagram for temperatur i kritisk punkt for case S.1 - Uisolert søyle.

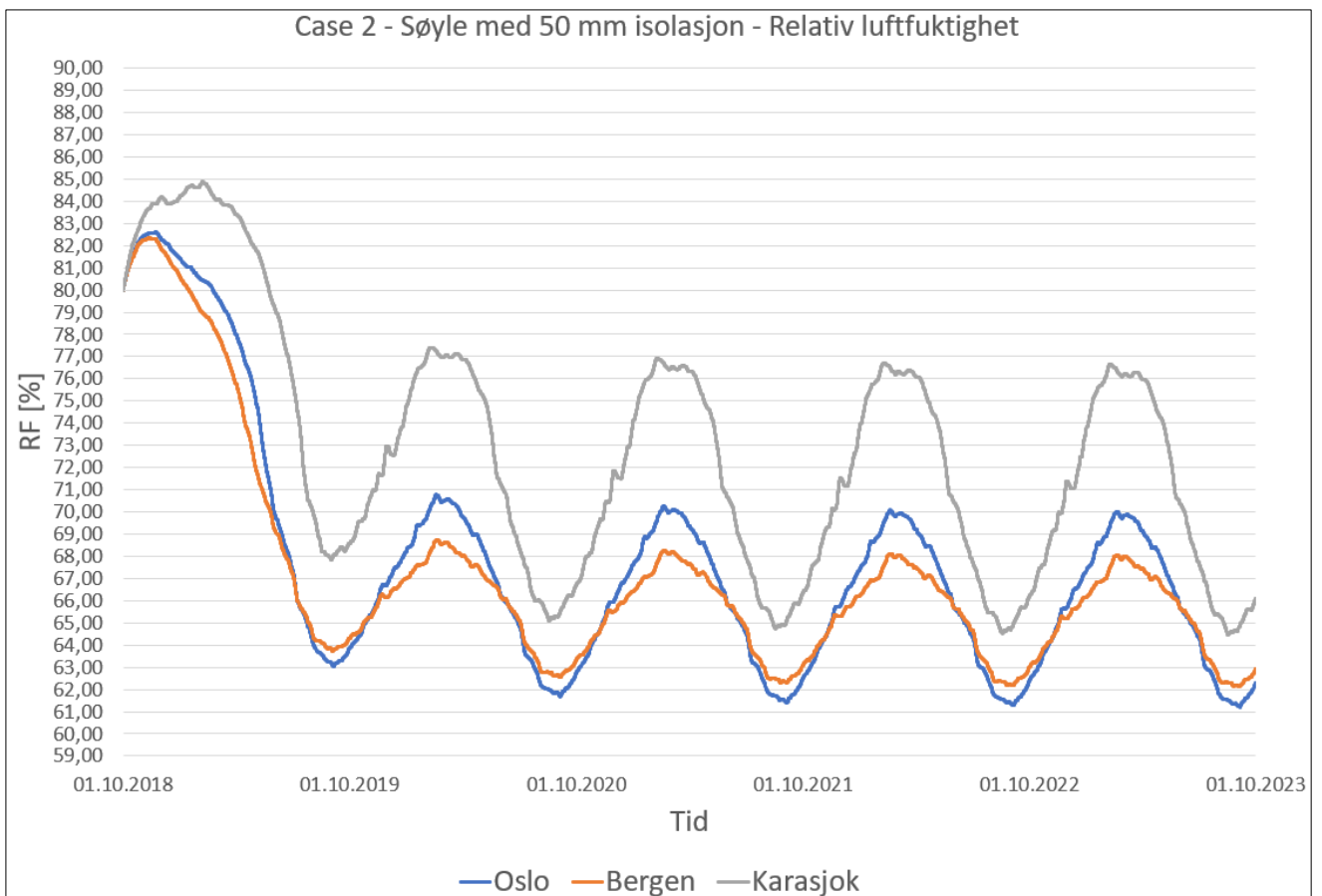


Figur 63: Sammenstilt linjediagram for relativ luftfuktighet i kritisk punkt for case S.1 - Uisolert søyle.

Sammenstilte resultater for Case S.2 - Søyلة med 50 mm isolasjon kan sees i Figur 66 og Figur 67.

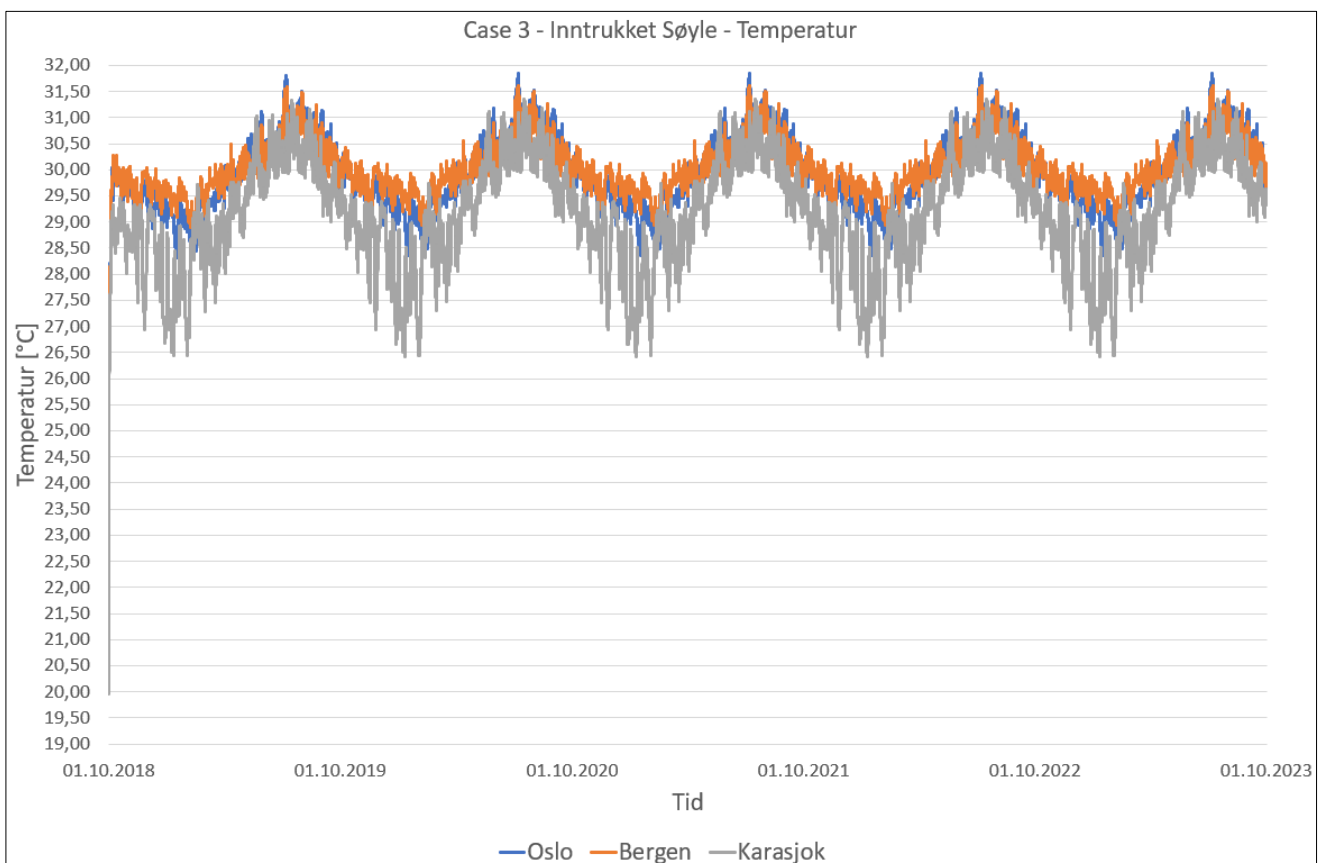


Figur 64: Sammenstilt linjediagram for temperatur i kritisk punkt for case S.2 - 50 mm isolasjon.

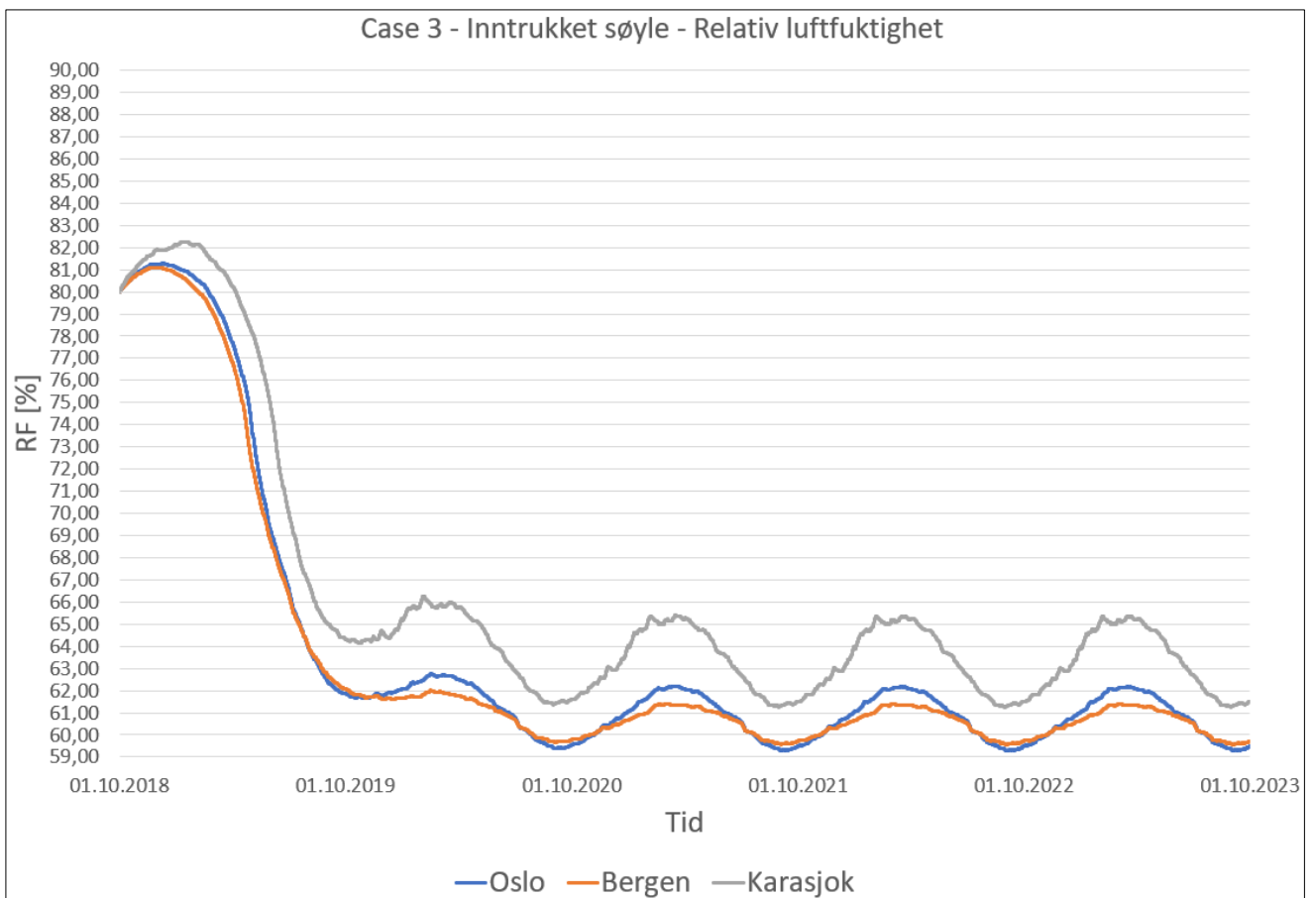


Figur 65: Sammenstilt linjediagram for relativ luftfuktighet i kritisk punkt for case S.2 - 50 mm isolasjon.

Sammenstilte resultater for Case S.3 - Inntrukket søyle kan sees i Figur 66 og Figur 67.



Figur 66: Sammenstilt linjediagram for temperatur i kritisk punkt for case S.3 - Inntrukket søyle.

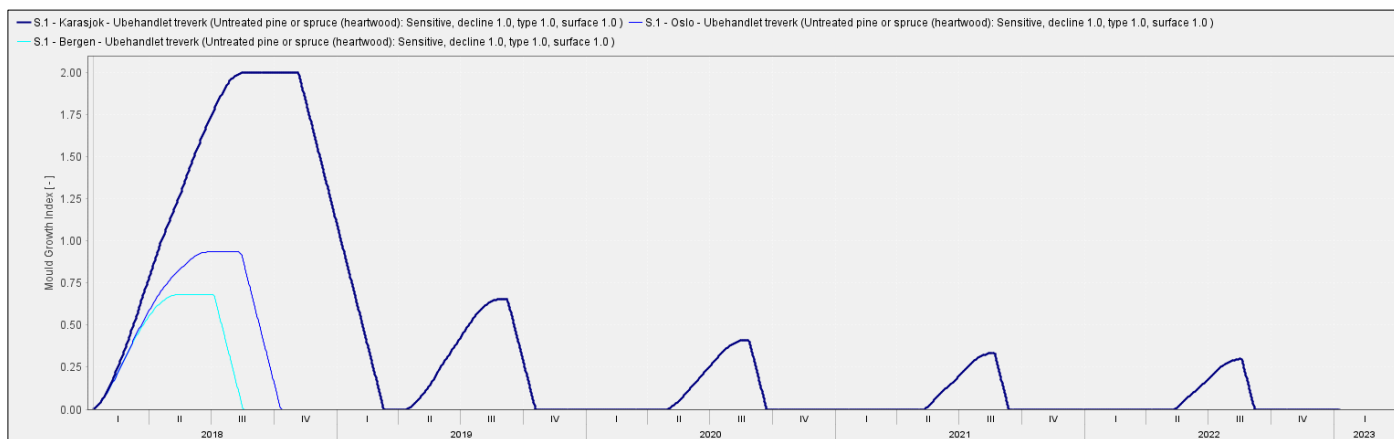


Figur 67: Sammenstilt linjediagram for relativ luftfuktighet i kritisk punkt for case S.3 - Inntrukket søyle.

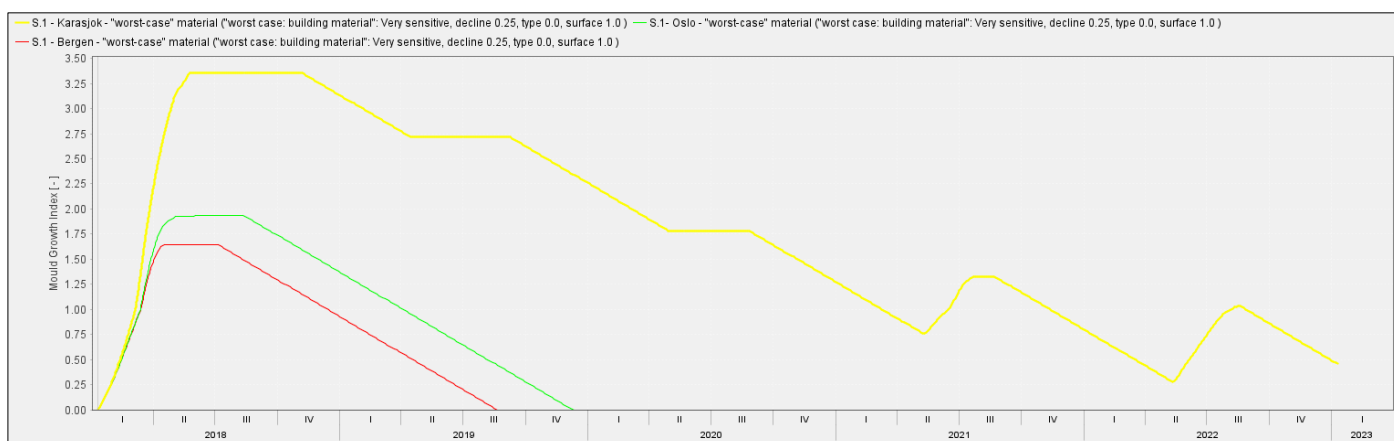
4.6.11.3 Wufi Mould Index VTT

Rådata for temperatur og relativ luftfuktighet (RF) er hentet ut fra utvalgte noder (kritiske) punkt og lastet inn som klimafilere i tilleggsprogrammet Wufi Mould Index VTT for å kontrollere muggvekstrisikoen for de ulike klimafilene (Oslo, Bergen og Karasjok) og to ulike materialegenskaper, både massivtreelement (satt som ubehandlet treverk) og et «worst-case»-materiale.

Resultatene for både massivtreelementer og «worst-case» materiale for **case S.1** ved de tre ulike klimafilene kan sees i Figur 68 og Figur 69.



Figur 68: Resultater fra S.1 - Massivtreelementer. Utklipp fra Wufi Mould Index VTT. Blå er Oslo, lyseblå er Bergen og mørkeblå er Karasjok.



Figur 69: Resultater fra S.1 - «worst-case» materiale. Utklipp fra Wufi Mould Index VTT. Grønn er Oslo, rød er Bergen og gul er Karasjok.

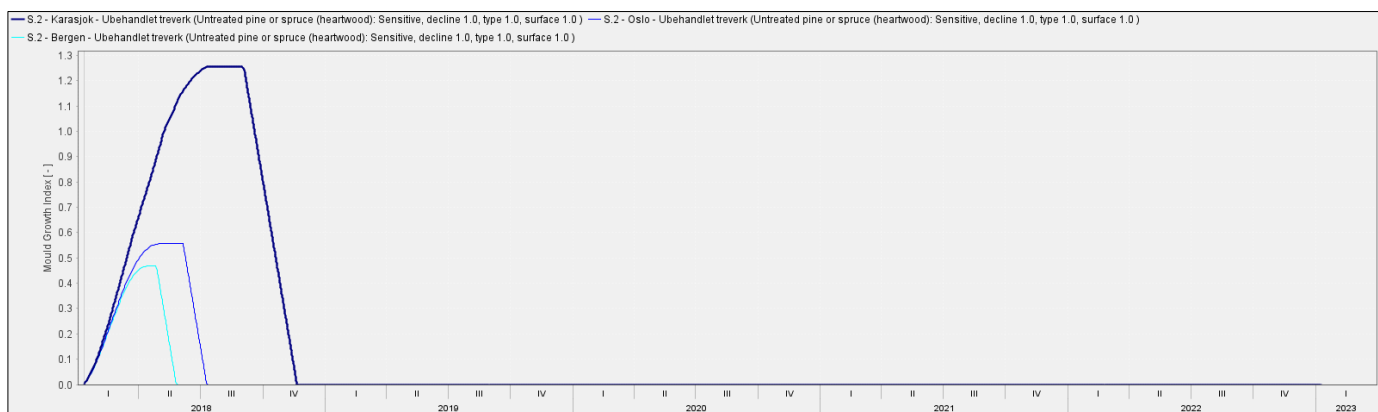
For Oslo-klima er muggvekstindeks rundt 1,0 ila. av det første året for massivtreelement (materiale som ubehandlet treverk), mens for «worst-case» materiale er muggvekstindeksen nærmere 2,0 det første året. I tillegg kan man se at for «worst-case» materiale som har relativt lav nedgang av vekst at denne muggvekstindeksen avtar svært mye treigere. Indeksen går ned til 0 etter rundt 2 år. Bergen har opp mot 0,75 i muggvekstindeks for massivtreelement det første halvåret, mens nærmere 1,75 for «worst-case» materiale i samme tid, men med svært mye dårligere nedgang.

For simuleringer av uisolert søyle i Karasjok-klima er dette en veldig utsatt konstruksjon. For massivtreelement havner muggvekstindeksen rett i nærheten av 2,0. Konstruksjonen har også veldig svingninger i indeks på grunn av de ustabile klimaforholdene i det kritiske punktet. «Worst-case» materiale har muggvekstindeks over 3,25 og får rødt lys. I tillegg har den svært redusert nedgang av vekst.

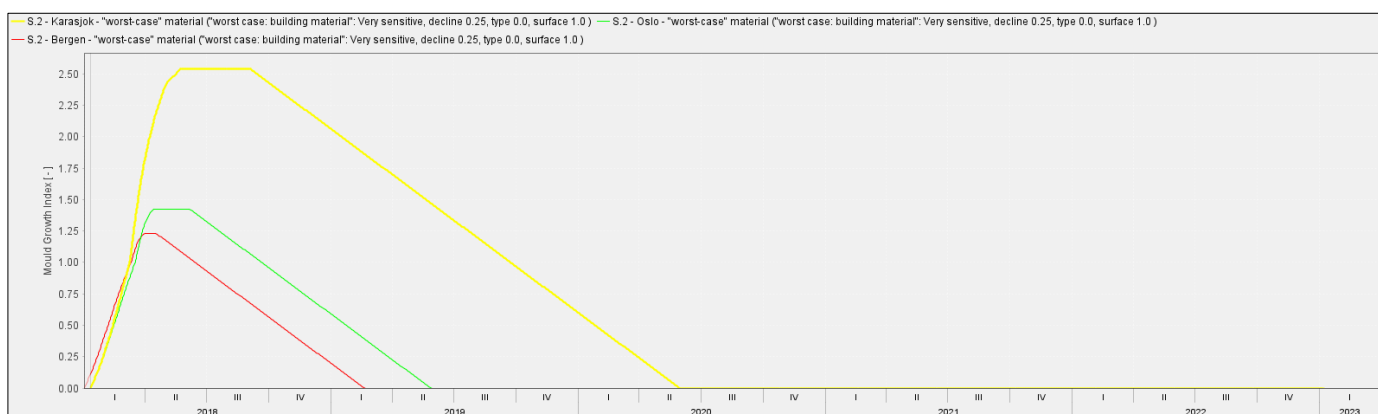
Uisolert søyle er både for Oslo og Bergensklima godt under 3,0 i muggvekstindeks. Ingen av konstruksjonen overstiger heller 2,0, så alle varianter får grønt lys i Wufi Mould Index VTT og er innenfor anbefalte grenseverdier. For Karasjok-klima er massivtreelement når lagt inn som ubehandlet trevirke under anbefaling og overstiger ikke 2,0 i muggvekstindeks, men har ganske ustabil indeks. For

«worst-case» materiale i Karasjok-klima er denne godt over anbefalinger og har uforsvarlig høy muggvekstrisiko.

Case S.2 har 50 mm isolasjon utenfor limtresøyle og resultatene for både massivtreelementer og «worst-case» materiale ved de tre ulike klimafilene kan sees i Figur 70 og Figur 71.



Figur 70: Resultater fra S.2 - Massivtreelementer. Utklipp fra Wufi Mould Index VTT. Blå er Oslo, lyseblå er Bergen og mørkeblå er Karasjok.



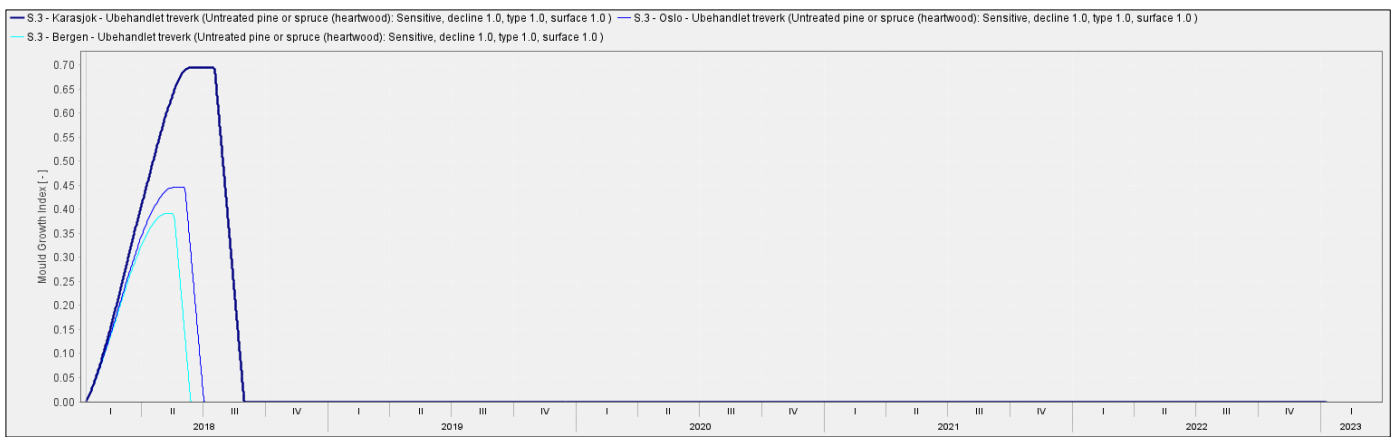
Figur 71: Resultater fra S.2 - «worst-case» materiale. Utklipp fra Wufi Mould Index VTT. Grønn er Oslo, rød er Bergen og gul er Karasjok.

Ved å legge 50 mm isolasjon utenfor søyle får kritisk punkt i ytre del av massivtreelement vesentlig mer stabile forhold, samt lavere muggvekstindeks. For Oslo-klima er muggvekstindeks opp mot 0,6 det første halve året for massivtreelement-materiale, mens den er opp mot 1,50 for «worst-case» materiale. Det er også her lavere reduksjon av muggvekst som følge av inndata. Bergen har indeks under 0,50 og 1,25 i en svært kort periode.

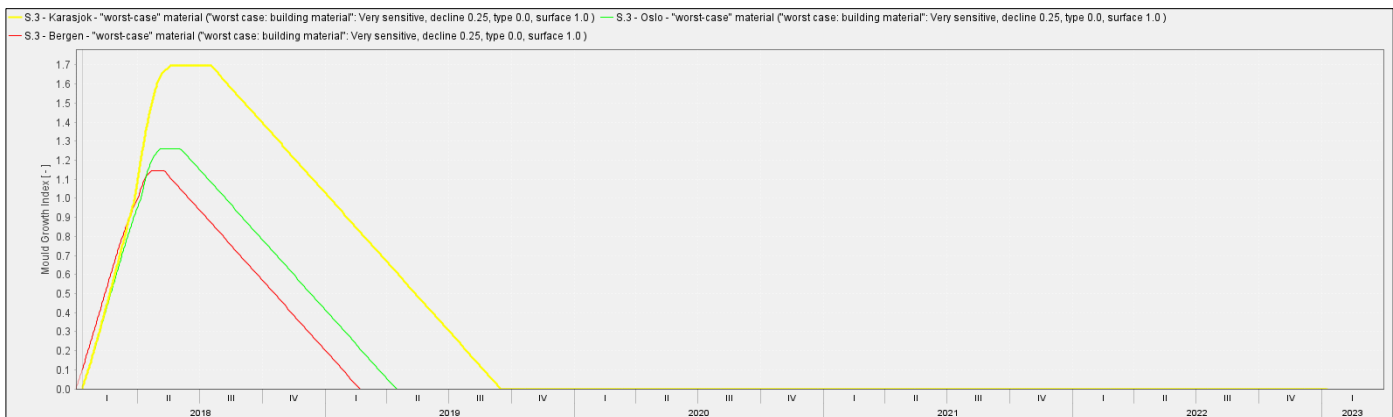
Karasjok går for ubehandlet treverk - massivtreelement opp mot 1,30 i løpet av det første året, men synker også ned til indeks på 0 før 1 år har gått. For «worst-case» materiale i Karasjok-klima stiger muggvekstindeksen til 2,50 i løpet av det første året, og konstruksjonen får dermed gult lys. Som de andre simuleringene har konstruksjonen lav nedgang av muggvekst og konstruksjonen er på grønt lys (< 2,0) etter litt over 1 år.

Ingen av materialtypene for konstruksjon med 50 mm isolasjon på kald side har rødt lys, men «worst-case» materiale for Karasjok-klima er godt over gult lys det første året. Oslo og Bergen har god margin for begge materialtyper og begge er på muggvekstindeks lik 0 i løpet av rundt et halvt år. For massivtreelement - ubehandlet treverk i Karasjok-klima så er konstruksjon på grønt lys også første år (opp mot 1,30) og er allerede på indeks 0 før et år er gått.

Case S.3 har helt inntrukket limtresøyle og har svært stabile forhold i ytre del av massivtreelement som følge av at hele isolasjonssjiktet i yttervegg er lagt på kald side. Resultatene for både massivtreelementer og «worst-case» materiale ved de tre ulike klimafilene kan sees i Figur 72 og Figur 73.



Figur 72: Resultater fra S.3 - Massivtreelementer. Utklipp fra Wufi Mould Index VTT. Blå er Oslo, lyseblå er Bergen og mørkeblå er Karasjok.



Figur 73: Resultater fra S.3 - «worst-case» materiale. Utklipp fra Wufi Mould Index VTT. Grønn er Oslo, rød er Bergen og gul er Karasjok.

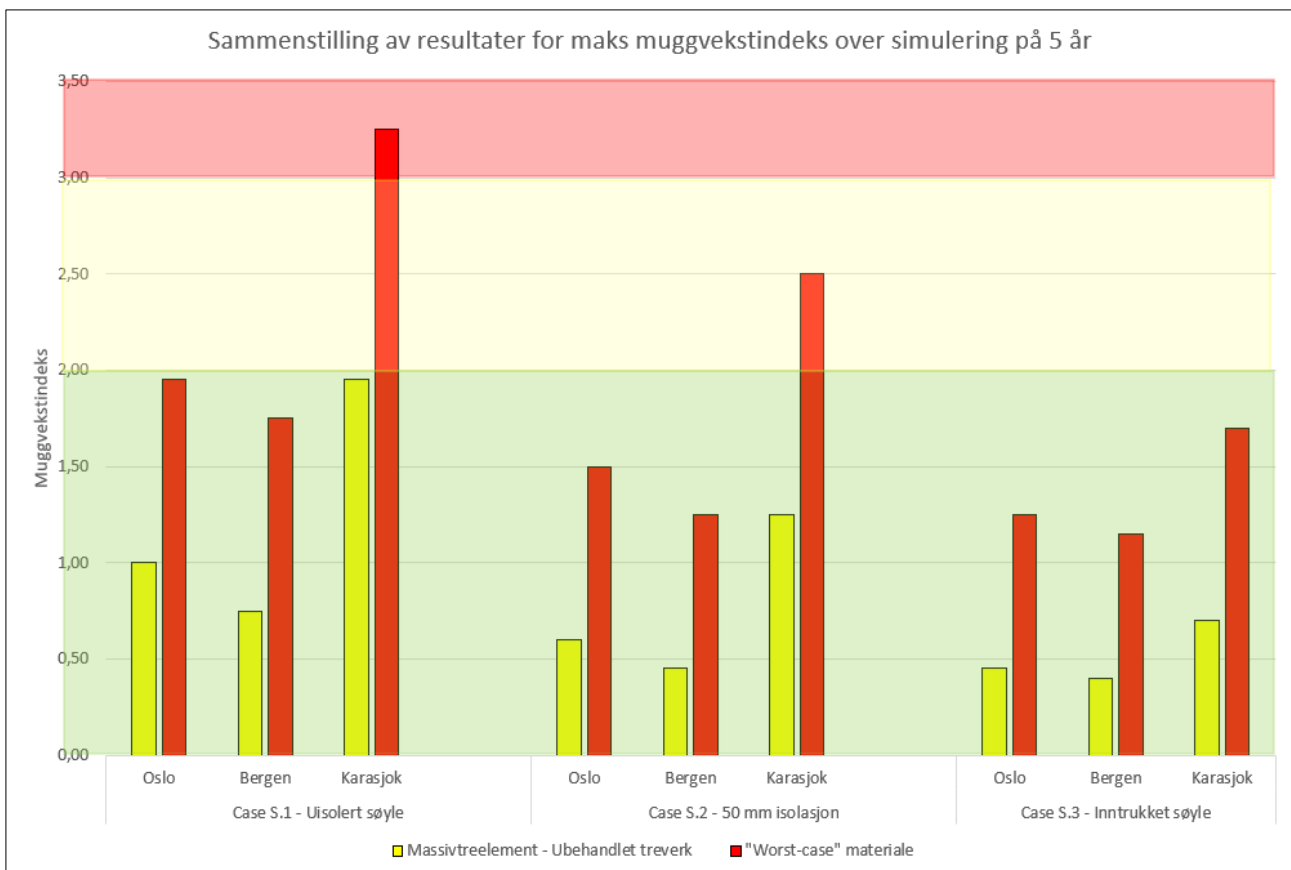
Simuleringer i Oslo-klima viser muggvekstindeks på rundt 0,45 for massivtreelement - ubehandlet treverk og opp mot 1,30 for «worst-case» materiale. Massivtreelement vil være på indeks lik 0 allerede etter rundt et halvår, mens sistnevnte vil være på indeks 0 nærmere 1,5 år.

Bergensklimate kommer bedre ut, men kun en marginal forskjell. For massivtreelement er den opp mot 0,40, mens for «worst-case» er den over 1,10 med lav nedgang (0 etter over et år).

For simuleringer i Karasjok-klima for inntrukket bæresystem er begge konstruksjoner innenfor grønt lys, men «worst-case» materiale er rundt 1,7 og i nærheten av gult lys. Denne konstruksjonen når ikke indeks 0 før etter nesten 2 år. For massivtreelement - ubehandlet treverk materiale er den opp mot 0,70, men tilbake på 0 etter litt over et halvt år.

Alle konstruksjonene for inntrukket bæresystem får grønt lys og muggvekstindeks under 2,0.

For å enklere se forskjellene mellom de ulike konstruksjonene, materialer og klimafilene er det laget et stolpediagram for sammenligning som kan sees i Figur 74.



Figur 74: Sammenstilling av maks muggvekstindeks i løpet av 5 års simulering for de ulike konstruksjonene, materialene og klimadataene. Laget i Excel med resultatfiler fra VTT.

Prosentvis forbedring vil i snitt for konstruksjon med 50 mm isolasjon på kald side (case S.2) være rundt 39 og 25 % bedre enn for uisolert søyle (case S.1) for henholdsvis massivtreelement - ubehandlet treverk og «worst-case» materiale. For helt inntrukket søyle (case S.3) vil denne være rundt 55 og 39 % for tilsvarende, og derfor kun rundt 27 og 19 % bedre enn søyle som isoleres med 50 mm. Oppsummert tas den største endringen ved å isolere 50 mm utenfor søyle.

5 Konklusjon

Studien hadde som formål å dokumentere tilfredsstillende miljø- og bygningsfysiske egenskaper for svømmehall utført i limtre- og massivtrekonstruksjoner med ulike byggemetoder og plassering av bæresystem. De ble formulert tre forskningsspørsmål som er besvart under.

1. Hvilke detaljløsninger sikrer akseptable bygningsfysiske konstruksjoner med hensyn til U-verdi, fuktsikring og kuldebroer?

I studien er det sett på en tradisjonell byggemethode, men også en utradisjonell og forenklet byggemethode for bæresystem og montering av prefabrikkerte elementer. For begge metoder er det utarbeidet beskrivelse og detaljløsninger for de ulike konstruksjonene for å sikre at alle løsninger er akseptable med hensyn til bygghet, robusthet, fuktsikring og luft- og diffusjonstetthet.

Soneinndeling og korrosjonssikring er gjort basert på plantegninger og standarder. Videre er det utført ulike simuleringer for utvalgte konstruksjoner, overganger og kuldebroer. Beregning av varmetapstall i Simen viste at bygningen selv med relativt tynne yttervegger i passivhussammenheng har god margin til krav om varmetapstall som følge av godt isolert tak og svært strenge krav til lekkasjetall.

Detaljene som er skissert i oppgaven er vurdert akseptable med hensyn til U-verdi, fuktsikring og kuldebroer, men løsning med bæresystem i klimaskall medfører mer ustabil klima og økte kuldebroer.

2. Vil noen konstruksjoner eller kuldebroer ved ulike varme- og fuktsimuleringer medføre utfelling eller høy risiko for kondens og/eller muggvekst?

For de statiske varme- og fuktsimuleringene viser disse at for vinduer er det ikke behov for bestrykning før utvendig dimensjonerende temperatur kommer under $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. I tillegg er vindusdetaljerings utført slik at dersom det skulle oppstå kondens på innvendig glassoverflate vil kondensvannet ha mulighet til å renne til vanntett gulv med fall uten å gjøre skade på massivtreelementer.

Temperaturprofilen for standard ytterveggssnitt tilsier at konstruksjonen ikke har noen risiko for utfelling av kondens eller noen muggvekstsrisiko.

Gulv mot friluft som utføres med at massivtreelement går gjennom klimavegg fra vanlig rom og ut til utetemperatur har ingen risiko for utfelling av kondens under statiske dimensjonerende forhold.

De statiske simuleringene av kuldebroer ved takdragere i yttertak (case Y.1, Y.2 og Y.3) og kuldebro i forbindelse med søyler i vegger (case S.1, S.2 og S.3) viser beregninger av tak at fortrenningseffekten fra 400 mm prefabrikkerte isolerte bindingsverkselementer er tilstrekkelig til at temperatur i kritisk punkt i konstruksjonen holdes godt over duggpunktstemperatur gitt dimensjonerende utetemperatur på $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ingen av de tre variantene av yttertak og plassering av takdragere fikk temperaturer under duggpunktstemperatur.

For simuleringene av de tre ulike søyleplasseringene viser statisk beregning av case S.1 - uisolert søyle at temperaturen i kritisk punkt er under duggpunktstemperatur og vil medføre utfelling av kondens. For de statiske simuleringene av case S.2 (50 mm) og S.3 (inntrukket) har begge varianter temperatur over duggpunktstemperatur i kritisk punkt.

På bakgrunn av at søyleplasseringene hadde høyest kondensrisiko ved statiske simuleringer ble det også gjort dynamiske simuleringer i Wufi 2D og etterfølgende simulering i Wufi Mould Index VTT for å kontrollere risiko for kondens og/eller muggvekst for de tre ulike søyleplasseringene. De dynamiske simuleringene i Wufi ble utført med tre svært ulike klimafilere (Oslo, Bergen, Karasjok) og to ulike materialdata i VTT for simulering av muggvekstindeks. Beregninger viste at kun uisolert søyle (case S.1) med klimadata for Karasjok og «worst-case» materiale har uakseptabel risiko (rødt lys) for muggvekst. Simulering med tilsvarende forutsetninger, men materialdata som ubehandlet treverk har akseptabel risiko (gult lys). Alle resterende simuleringer for alle tre caser har akseptabel risiko og «grønt lys» (muggvekstindeks $\leq 2,0$).

3. Hvilken plassering av bæresystem i limtre- og massivtrekonstruksjoner vurderes til å gi mest bygningsfysiske fordeler?

Selv om konstruksjonene med bæresystem plassert i klimaskall er akseptable konstruksjoner med hensyn til kondens og muggvekstrisiko er det dokumentert at det er vesentlig mer ustabil klima i kritisk punkt avhengig av hvor langt ut i klimaskallet bæresystemet plasseres. Den største forbedringen tas ved 50 mm isolasjon på kald side, men fullstendig inntrukket bæresystem er den beste løsningen med hensyn til å sikre et stabilt klima og redusert varmetap som følge av kuldebroer.

Løsning med bæresystem plassert i klimaskallet vil også trolig medføre noe vanskeligere overganger for dampsperrsjiktet, men med en god utførelse vil løsningene være akseptable for å sikre tilstrekkelig lufttetthet. Likevel gir denne byggemetoden andre fordeler i forbindelse med skjøting av elementer og effektivitet på byggeplassen.

5.1 Videre arbeid

Resultatene i denne studien viser at case-bygningen kan oppføres med bæresystem delvis i klimaskall uten risiko for kondens og/eller muggvekst på utvalgte kritiske punkter.

For videre arbeid bør det sees videre på energibruken rundt case-bygningen. Særlig omkring virkningen av kuldebroer i forhold til det totale energibehovet. I tillegg må det gjøres nødvendige beregninger i forbindelse med inneklimate og ventilasjon for å sikre at forutsetningene om inneklimate vil være gjeldende i ferdigstilt bygning. Det må også sees på detaljer i forbindelse med innfesting av stålbaseng.

I tillegg bør det beregnes klimagassutslipp for bygningen og eventuelt sammenligne resultatene mot en mer tradisjonell svømmehall oppført i betong/stål. Dette for å dokumentere miljøfordelene ved å oppføre en svømmehall i limtre- og massivtrekonstruksjoner.

6 Referanser

1. Bøhlerengen, T., et al., *Bade- og svømmeanlegg*. Håndbok (Norges byggforskningsinstitutt : trykt utg.). Vol. 52. 2004, Oslo: Norges byggforskningsinstitutt.
2. Aftenposten. *Svømmehallens storhetstid og (for)fall*. 2020 [cited 2022 02.04]; Available from: <https://www.aftenposteninnsett.no/viten/sv-mmehallens-storhetstid-og-forfall>.
3. (SIAT), S.f.i.o.t. *Energibruk i norske svømmehaller*. 2020 [cited 2022 02.04]; Available from: <https://www.godeidrettsanlegg.no/nyhet/energibruk-i-norske-svømmehaller>.
4. Kampel, W., B. Aas, and A. Bruland, *Energy-use in Norwegian swimming halls*. Energy and buildings, 2013. **59**: p. 181-186.
5. Røkenes, H.D., *Betraktninger rundt svømmehallers energieffektivitet*. 2011: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi, Institutt for bygg, anlegg og transport.
6. SIAT. *Senter for idrettsanlegg og teknologi (SIAT)*. 2022 21.04.2022]; Available from: <https://www.ntnu.no/siat/om-senteret>.
7. Skogstad, H.B., et al., *Massivtre - luftgjennomgang og behov for sperresjikt*. 2011, SINTEF/B: Oslo.
8. (RIF), R.I.F., *Anbefalte ytelser for rådgiver bygningsfysikk*. 2015.
9. Trond Bøhlerengen, I.L.S., *Fukt i bygninger. Teorigrunnlag*. 2005: Byggforsk kunnskapssystemer.
10. Lars-Ivar Aarseth, K.L.F., Berit Time, Sintef Byggforsk, *Materialdata for vanddamprtransport: Byggdetaljblad 573.430*. 2003: Byggforsk kunnskapssystemer.
11. Sivert Uvsløkk, M.D., Jan Chr. Krohn, *Rom med høy fuktbelastning: Byggdetaljblad 527.245*. 1992: Byggforsk kunnskapssystemer.
12. Stig Geving, J.V.T., *Fukt i bygninger - Håndbok 50*. 2002, Norges byggforskningsinstitutt.
13. Stig Geving, B.R., *Kondens på kalde overflater. Årsaker og tiltak: Byggdetaljblad 740.111*. 2007: Byggforsk kunnskapssystemer.
14. Ida Lund Segtnan, B.R., Halvard Høiland-Kaupang, *Kuldebroer. Typer, konsekvenser og bruk av normalisert kuldebroverdi: Byggdetaljblad 472.001*. 2019: Byggforsk kunnskapssystemer.
15. Sivert Uvsløkk, S.H.-H., *Beregning av U-verdier etter NS-EN ISO 6946: Byggdetaljblad 471.008*. 2018: Byggforsk kunnskapssystemer.
16. Norge, S., *NS-EN ISO 6946:2017 Bygningskomponenter og -elementer - Varmemotstand og varmegjennomgangskoeffisient - Beregningsmetoder (ISO 6946:2017)*. 2017.
17. Aarstad, K.J., et al., *Massivtre : egenskaper, byggemetoder, bruksområder, økonomi, ressursbruk*. 2008, TreFokus Norsk treteknisk institutt: Oslo.
18. Kariann Magnussen, B., Johan Mattsson, Mycoteam AS, Lars-Ivar Aarseth, *Muggsopp i bygninger. Forekomst og konsekvenser for innklimaet. Byggdetaljblad 701.401*. 2005: Byggforsk kunnskapssystemer.
19. Norge, S., *NS-EN ISO 12944-2:2017: Maling og lakk - Korrosjonsbeskyttelse av stålkonstruksjoner med beskyttende malingssystemer - Del 2: Klassifisering av miljøet (ISO 12944-2:2017)*. 2017.
20. Kvande et. al., T.K., Kim Robert Lisø, Hans Olav Hygen, Halvard Høiland-Kaupang, *Klimadata for termisk dimensjonering og frostsikring: Byggdetaljblad 451.021*. 2018: Byggforsk kunnskapssystemer og meteorologisk institutt.
21. Kvande et. al., T.K., Kim Robert Lisø, Hans Olav Hygen, Elisabeth Bjaanes, *Klimadata for dimensjonering mot regnpåkjønning*. 2013: Byggforsk kunnskapssystemer og Meteorologisk institutt.
22. Peter Blom, L.-I.A., SINTEF Byggforsk, *Ventilasjon og avfukting i svømmehaller og rom med svømmebasseng: Byggdetaljblad 552.315*. 2003: Byggforsk Kunnskapssystemer.
23. DiBK, D.f.b.-. *Byggteknisk forskrift (TEK 17) med veiledning*. 2017.
24. SINTEF, *Byggforskserien*. 2022.
25. Norge, S., *NS 3031:2014 Beregning av bygningers energiytelse. Metode og data*. . 2014.
26. Norge, S., *NS3701:2012 Kriterier for passivhus og lavenergibygninger. Yrkesbygninger*. . 2012.

27. Jonny Nersveen, A.K., *Beregning av gjennomsnittlig dagslysfaktor og glassareal: Byggetaljblad 421.626*. 2004: Byggforsk kunnskapssystemer.
28. Programbyggerne. *SIMIEN Wiki*. 2022 [cited 2021 19.03.2022]; Available from: <https://www.programbyggerne.no/SIMIEN/doku.php>.
29. Plag, R. *Ubakus*. 2011 28.02.2022]; Available from: <https://www.ubakus.de/u-wert-rechner/>.
30. Flixo. *Programvare for kuldebroberegninger*. 2022 [cited 2022 10.04.2022]; Available from: <https://www.flixo.no/>.
31. Arild Gustavsen, j.V.t., peter blom, arvid dalehaug, and s.g.o.S.U. tormod aurlien, *Prosjektrapport 25 - Kuldebroer – Beregning, kuldebroverdier og innvirkning på energibruk*. 2008: SINTEF Byggforsk.
32. Geving, S. *Introduksjon*. 2016 [cited 2022 12.03]; Available from: <http://www.wufi.no/Introduksjon.php3>.
33. Haandlykken, E.D., *Analyse av muggvekstrisiko i trebjelkelagets kantbjelke*. 2021: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi, Institutt for bygg, anlegg og transport.
34. Holme, S.G.o.J., *Høyisolerte konstruksjoner og fukt. Analyse av fukttekniske konsekvenser av økt isolasjonstykkelse i yttervegger, tak, kryperom og kalde loft*, in *Prosjektrapport (SINTEF Byggforsk);53*. 2010: SINTEF Byggforsk.
35. Künzle, H.M., *Simultaneous heat and moisture transport in building components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters*. 1995: Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
36. WUFI2D. *WUFI 2D*. 2019 [cited 2022 19.03.2022]; Available from: <https://wufi.de/en/software/wufi-2d/>.
37. Hukka, A. and H.A. Viitanen, *A mathematical model of mould growth on wooden material*. *Wood science and technology*, 1999. **33**(6): p. 475-485.
38. Viitanen, H., et al., *Mold Risk Classification Based on Comparative Evaluation of Two Established Growth Models*. *Energy procedia*, 2015. **78**: p. 1425-1430.
39. Aukema, B. *Mollier Diagram*. 2022 10.04.2022]; Available from: <https://www.mollier-diagram.com/>.
40. AS, E.B. *Stålbasseng*. 2022 23.04.2022]; Available from: <https://www.enwa.no/enwa-badeanlegg/produkter/alle-produkter/staalbasseng>.
41. Tom Farstad, M.L., *Betonggulv på grunnen*. *Byggetaljblad 522.111*. 2003: Byggforsk Kunnskapssystemer.
42. Stig Geving, H.J.L., *Yttervegger over terreng. Egenskaper og konstruksjonsprinsipper. Krav og anbefalinger*. *Byggetaljblad 523.002*. 2008: Byggforsk kunnskapssystemer.
43. Silje Asphaug, S.H.-H., *Innsetting av vindu i vegger av bindingsverk*. *Byggetaljblad 523.701*. 2018: Byggforsk kunnskapssystemer.
44. Jørn Emil Gaarder, A.L., *Skrå, luftede tretak med isolerte takflater*. *Byggetaljblad 525.101*. 2021: Byggforsk kunnskapssystemer.
45. Kart, N., *Norges Kart*. 2022.
46. Group, N. *Glassfakta*. 2021 12.02.2022]; Available from: <https://www.pilkington.com/nb-no/no/arkitekter/glassfakta-2021#>.

VEDLEGG

Vedlegg A - Plantegninger

Vedlegg B - Inndata gulv mot friluft

Vedlegg C - Inndata yttertak

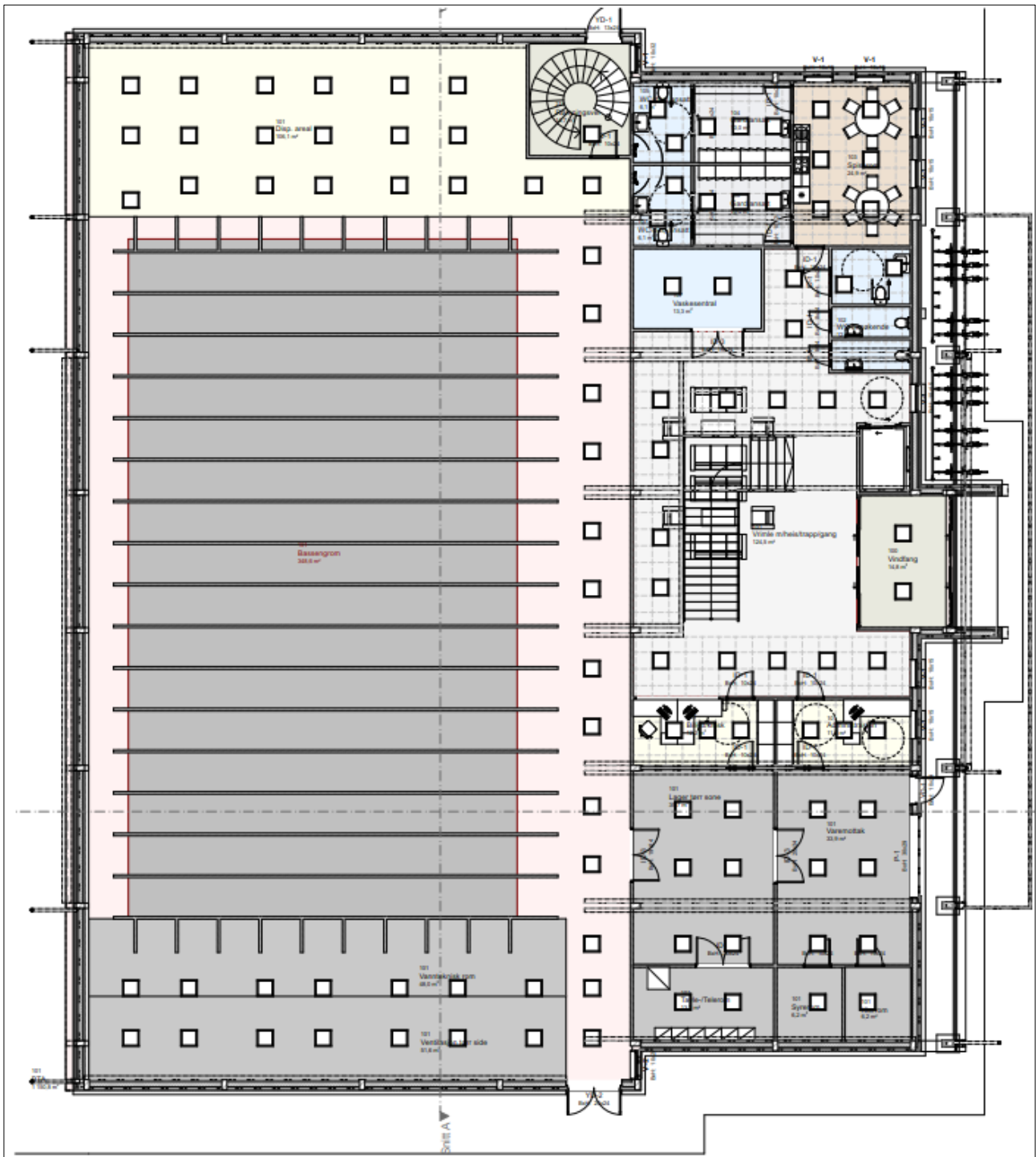
Vedlegg D - Inndata kuldebro søyle

Vedlegg E - U-verdi beregninger

Vedlegg F - Fullstendige resultater kuldebro søyle - dynamiske simuleringer

Vedlegg A - Plantegninger

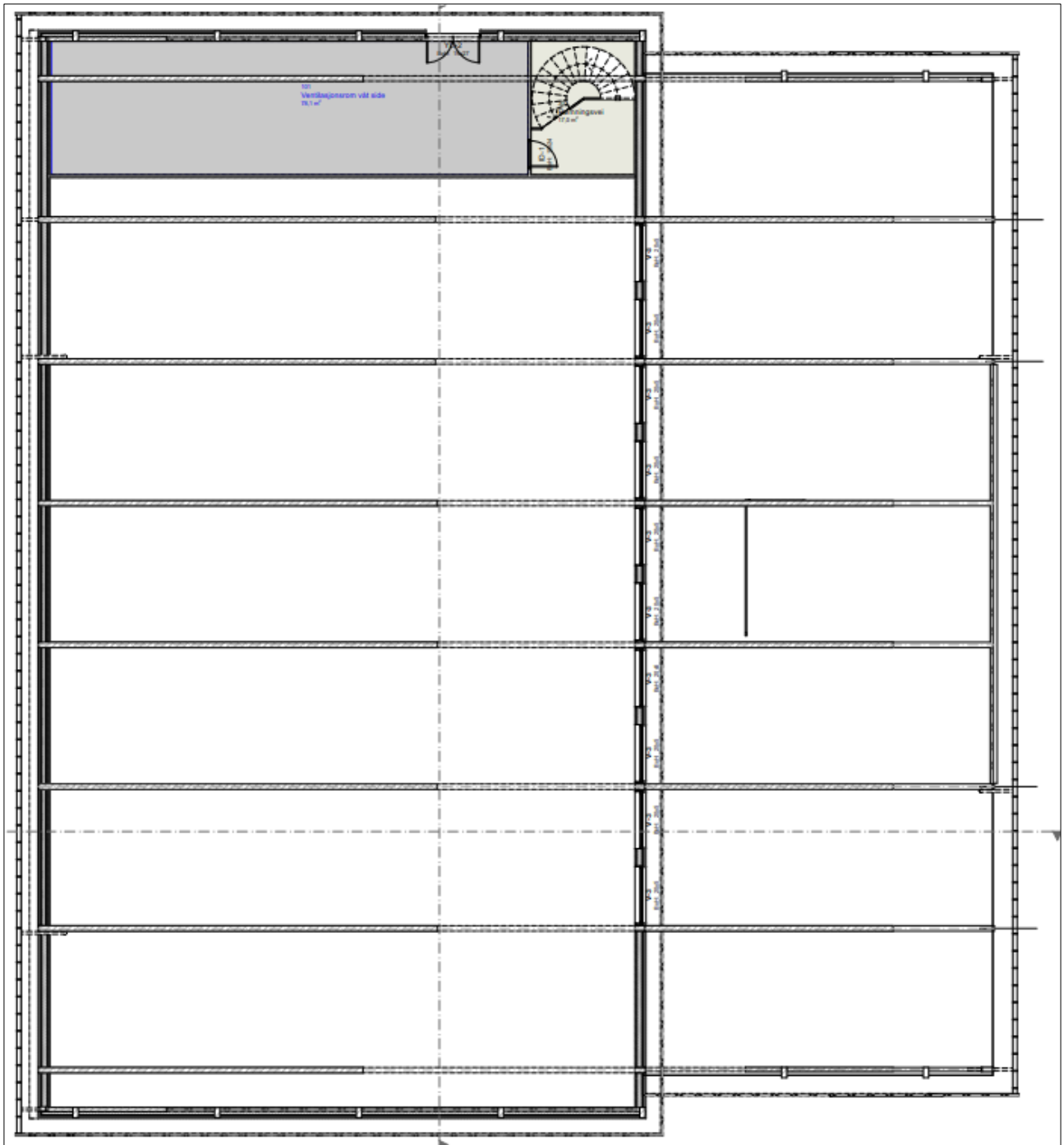
Plantegninger kan sees i Figur 75, Figur 76 og Figur 77.



Figur 75: Plan 1. Utarbeidet av Green Advisers.



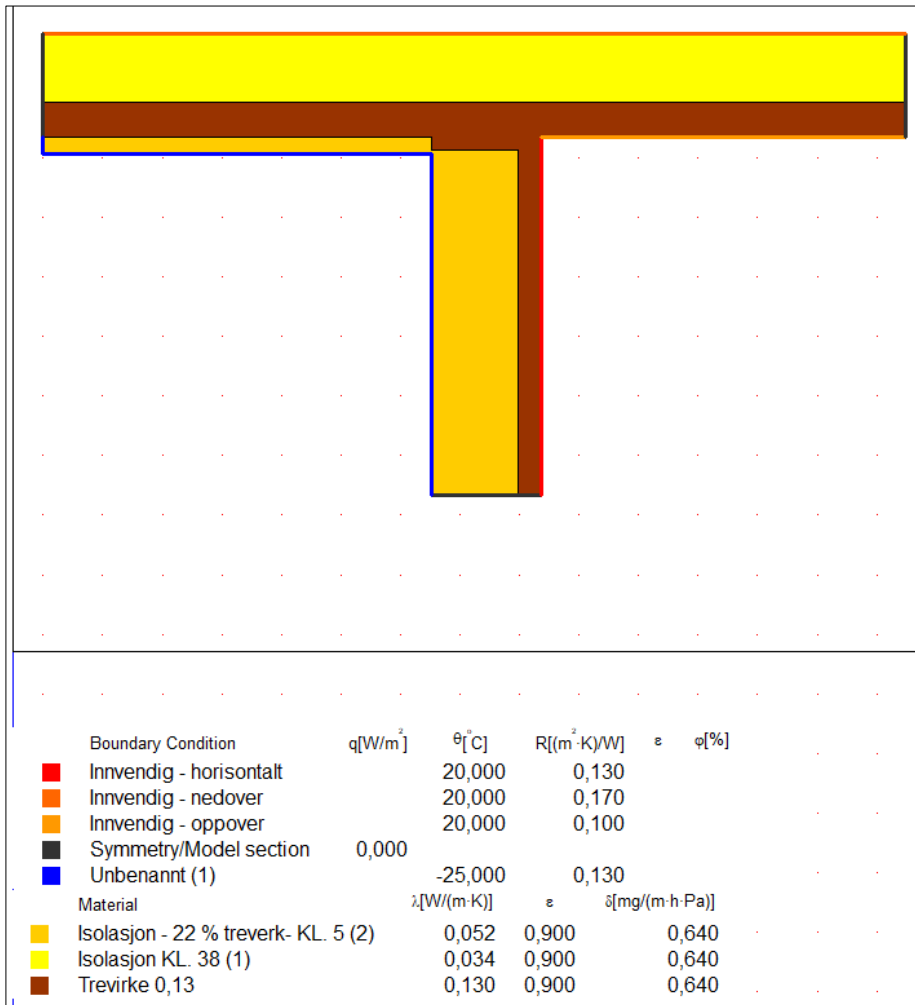
Figur 76: Plan 2. Utarbeidet av Green Advisers.



Figur 77: Plan 3. Utarbeidet av Green Advisers.

Vedlegg B - Inndata gulv mot friluft

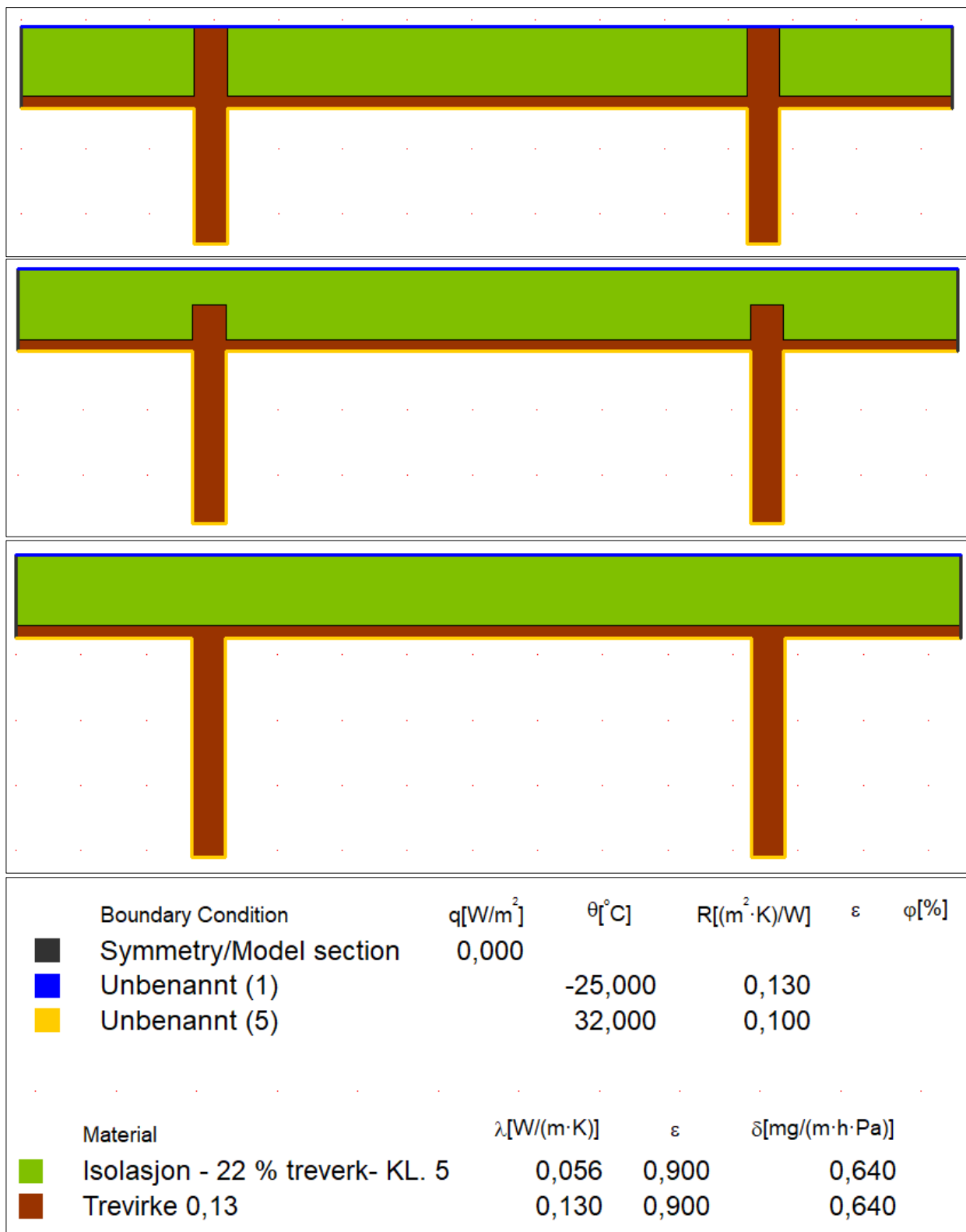
Inndata for Flixo simulering for gulv mot friluft kan sees i Figur 78.



Figur 78: Inndata til Flixo simulering.

Vedlegg C - Inndata yttertak

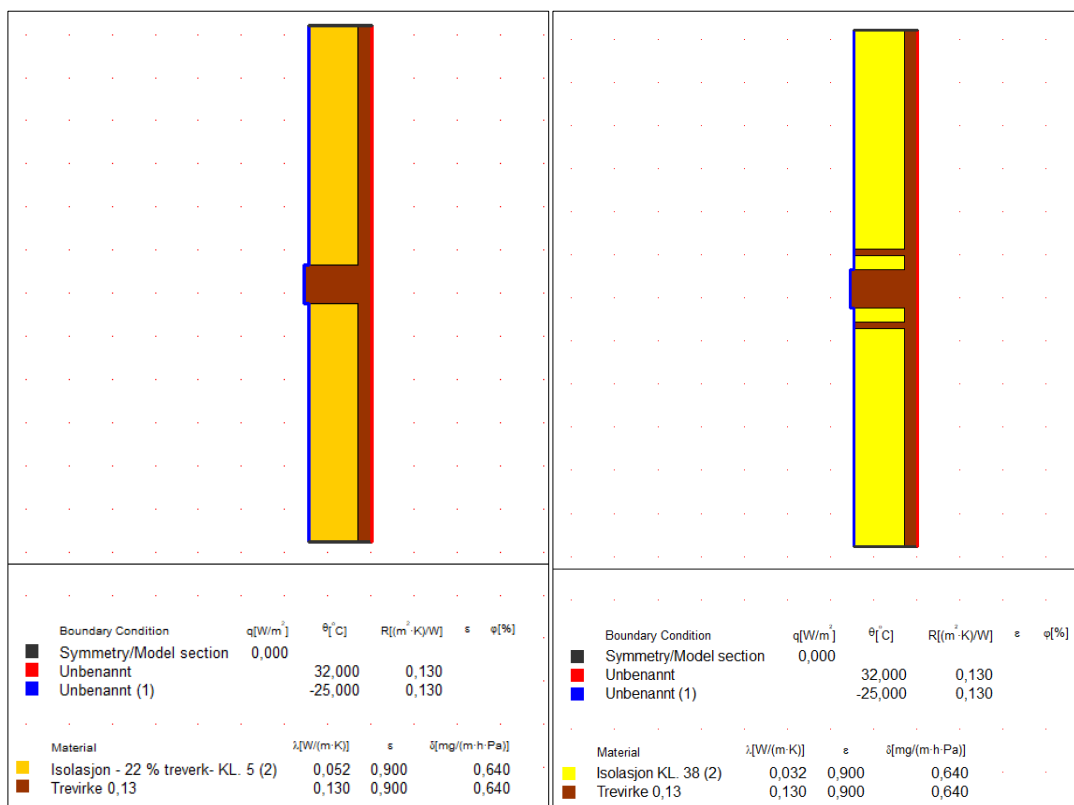
Inndata for Flixo simuleringene av de tre ulike takvariantene og plassering av takdragere kan sees i Figur 79.



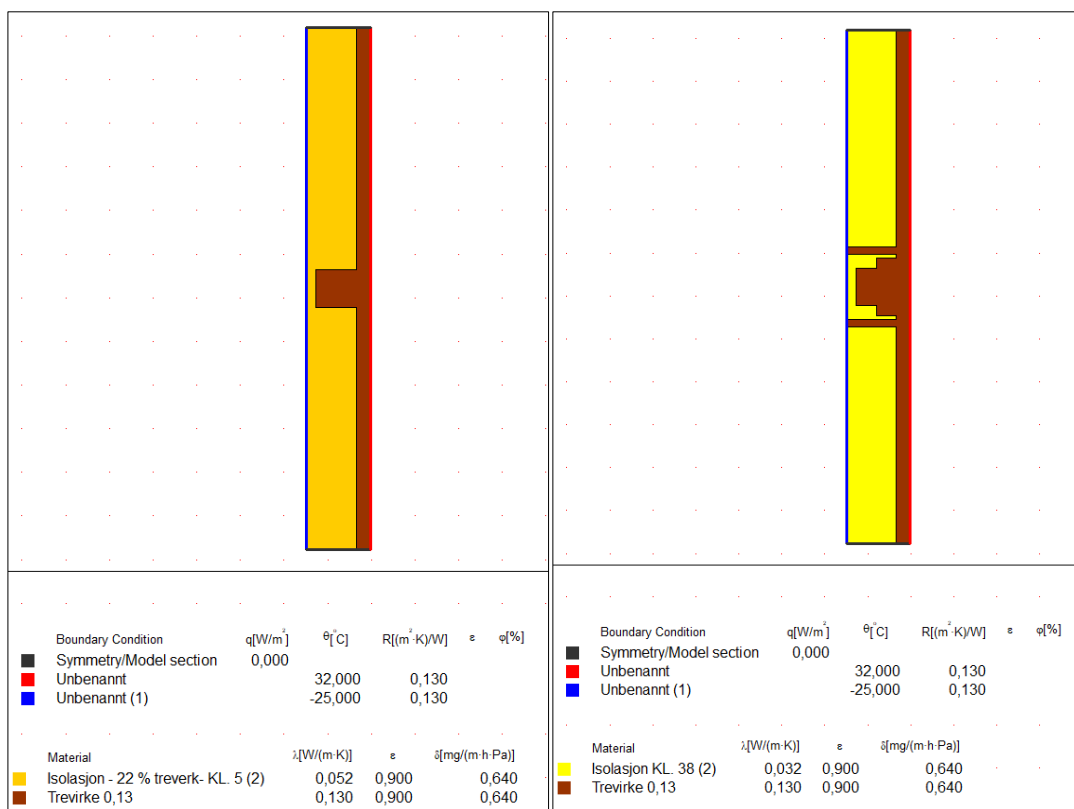
Figur 79: Inndata til statiske simuleringer (Flixo) for alle 3 takvarianter.

Vedlegg D - Inndata kuldebro søyle

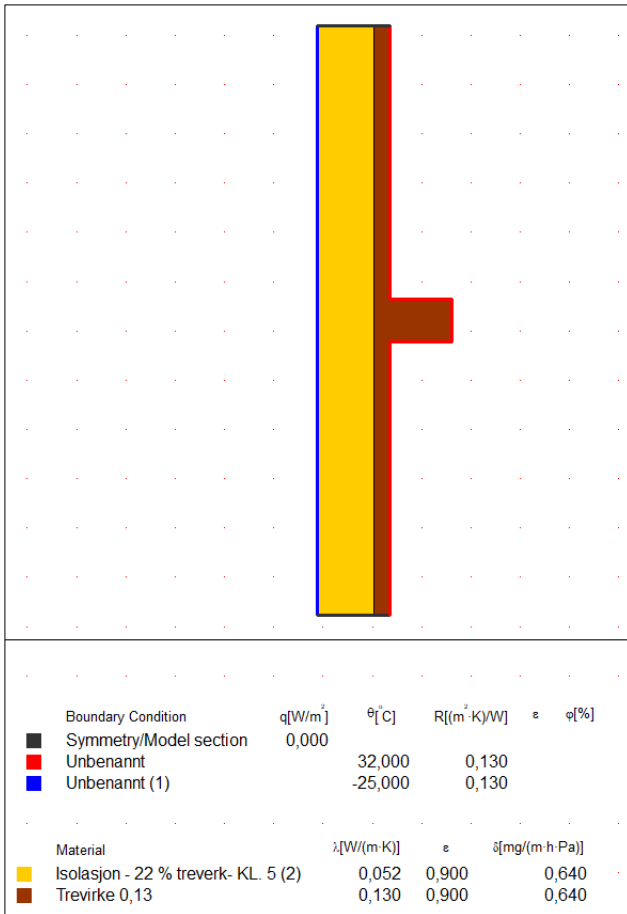
Inndata til Flixo simuleringer av søyle kan sees i Figur 80, Figur 81 og Figur 82.



Figur 80: Inndata til statiske simuleringer (Flixo) uten noe isolasjon utenfor søyle (case S.1).

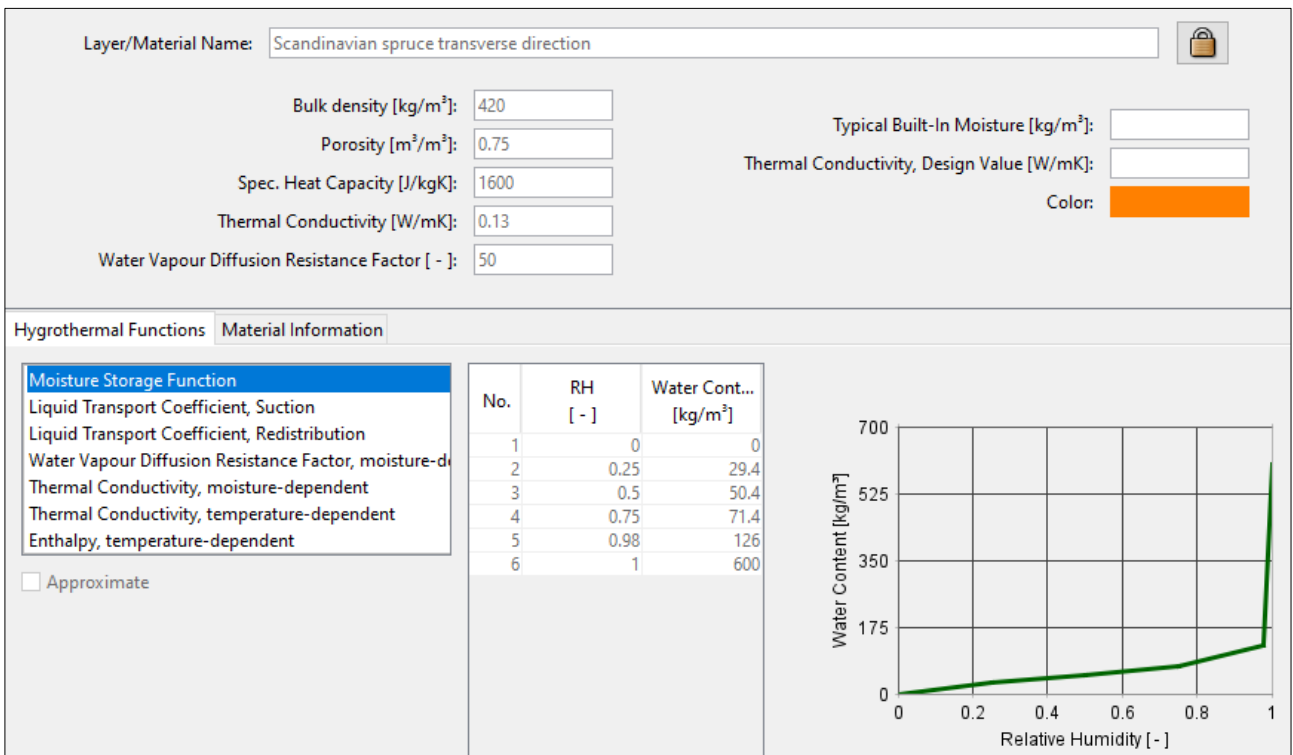


Figur 81: Inndata til statiske simuleringer (Flixo) med 50 mm isolasjon utenfor søyle (case S.2).



Figur 82: Inndata til statiske simuleringer (Flixo) med inntrukket søyle (case S.3).

Inndata til dynamiske simuleringer i WUFI 2D kan sees under. Materialegenskapene til de ulike materialene som er benyttet kan sees i Figur 83, Figur 84, Figur 85 og Figur 86.



Figur 83: Materialegenskapene til limtre- og massivtrekonstruksjonene.

Layer/Material Name:

Bulk density [kg/m³]:

Porosity [m³/m³]:

Spec. Heat Capacity [J/kgK]:

Thermal Conductivity [W/mK]:

Water Vapour Diffusion Resistance Factor [-]:

Typical Built-In Moisture [kg/m³]:

Thermal Conductivity, Design Value [W/mK]:

Color:

Hygrothermal Functions | Material Information

Moisture Storage Function

- Liquid Transport Coefficient, Suction
- Liquid Transport Coefficient, Redistribution
- Water Vapour Diffusion Resistance Factor, moisture-d
- Thermal Conductivity, moisture-dependent
- Thermal Conductivity, temperature-dependent
- Enthalpy, temperature-dependent

Approximate

No.	RH [-]	Water Con... [kg/m ³]
1	0	0
2	0.5	0.000485
3	0.6	0.000724
4	0.7	0.00112
5	0.8	0.00188
6	0.85	0.00262
7	0.9	0.00403
8	0.91	0.00448
9	0.92	0.00503
10	0.93	0.00572
11	0.94	0.0066
12	0.95	0.00777
13	0.96	0.00941
14	0.97	0.0119

Figur 84: Materialegenskapene til vindsperre.

Layer/Material Name:

Bulk density [kg/m³]:

Porosity [m³/m³]:

Spec. Heat Capacity [J/kgK]:

Thermal Conductivity [W/mK]:

Water Vapour Diffusion Resistance Factor [-]:

Typical Built-In Moisture [kg/m³]:

Thermal Conductivity, Design Value [W/mK]:

Color:

Hygrothermal Functions | Material Information

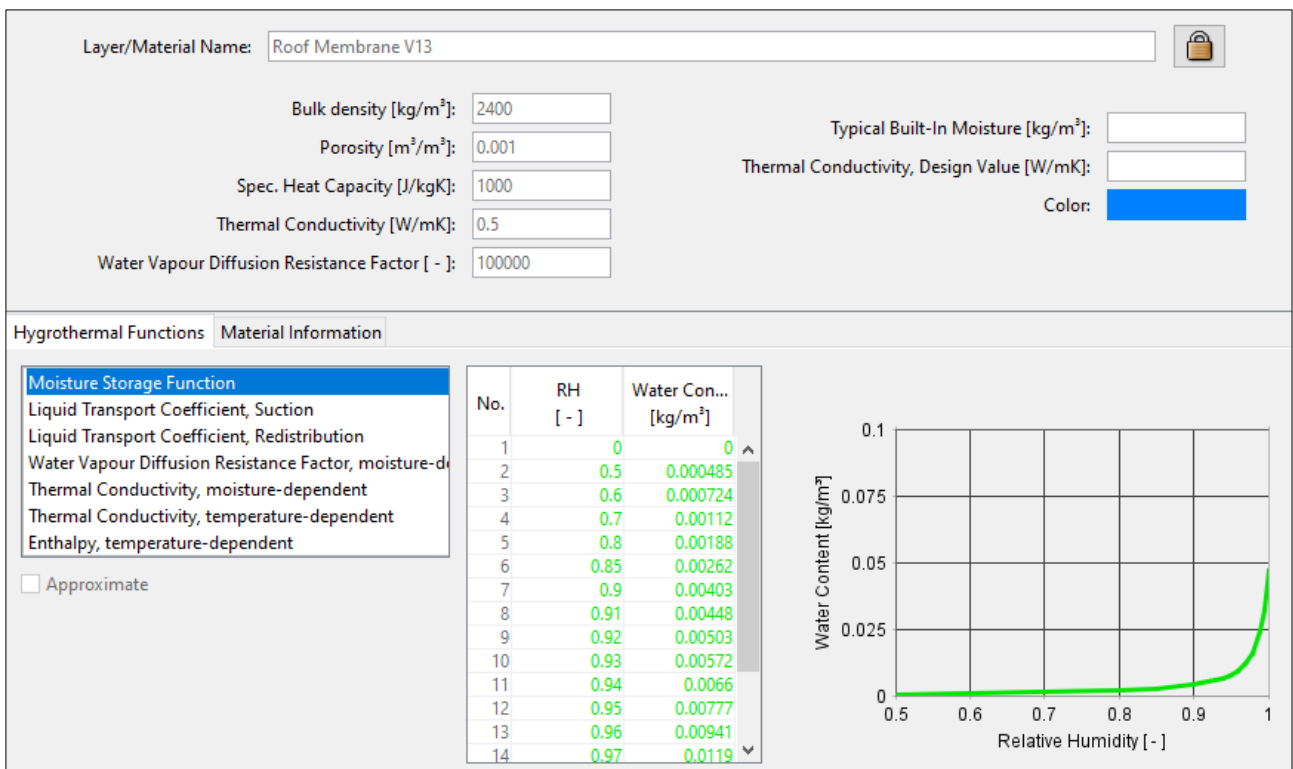
Moisture Storage Function

- Liquid Transport Coefficient, Suction
- Liquid Transport Coefficient, Redistribution
- Water Vapour Diffusion Resistance Factor, moisture-d
- Thermal Conductivity, moisture-dependent
- Thermal Conductivity, temperature-dependent
- Enthalpy, temperature-dependent

Approximate

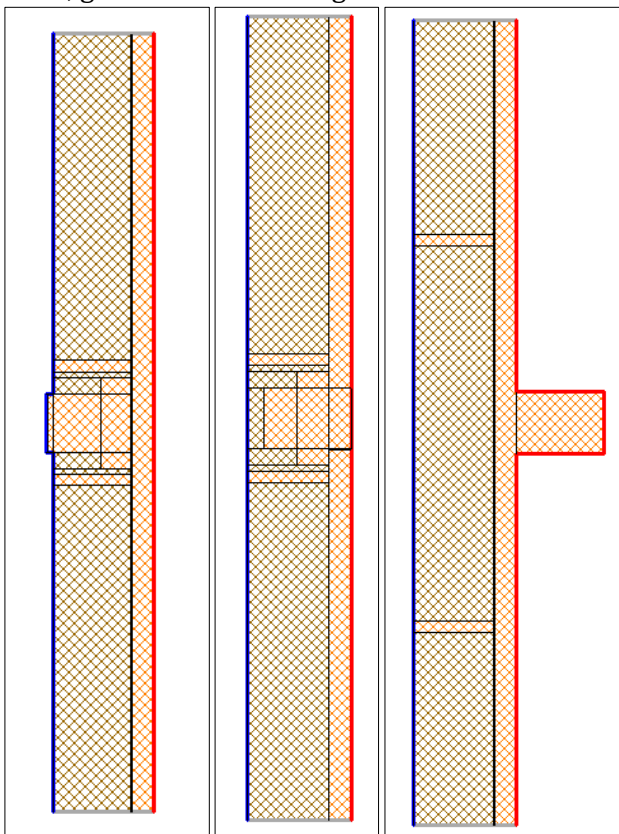
No.	RH [-]	Water Cont... [kg/m ³]
1	0	0
2	0.8	0.7
3	0.93	1.8
4	0.97	3.8
5	0.99	5.6
6	0.995	7.4
7	0.999	13.9
8	0.9995	18.1
9	0.9999	32.9
10	1	372

Figur 85: Materialegenskapene til isolasjonsmateriale.



Figur 86: Materialegenskapene til robust dampsperre.

Plassering av de ulike overflateegenskapene kan sees i Figur 87. Rødt er innvendig klima på 32 °C og 55 % RF, grått er adiabatisk og blått er uteklima for de tre ulike klimafilene.



Figur 87: Oversikt over de ulike overflatene som er satt i simuleringstilene. Venstre er uisolert, midten er 50 mm isolasjon og høyre er inntrukket søyle.

Simuleringer er kjørt over 5 års perspektiv med starttemperatur på 20 °C og 80 % RF for alle varianter.

Vedlegg E - U-verdi beregninger

U-verdi beregninger for gulv på grunn, gulv mot friluft og yttervegger mot friluft kan sees i Figur 88, Figur 89 og Figur 90.

Varmemotstand for gulvet				Kilde		
		t [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]		
Rsi				0,17		
Material		0,2	2,5	0,08		
		0,25	0,036	6,94		
Rse				0,00		
Rf				7,02		
U-verdi for konstruksjonen				0,14		

Figur 88: Beregnet U-verdi for gulvkonstruksjon. Ekvivalent U-verdi er beregnet direkte i Simien mht. grunnforhold fjell (mest konservativt).

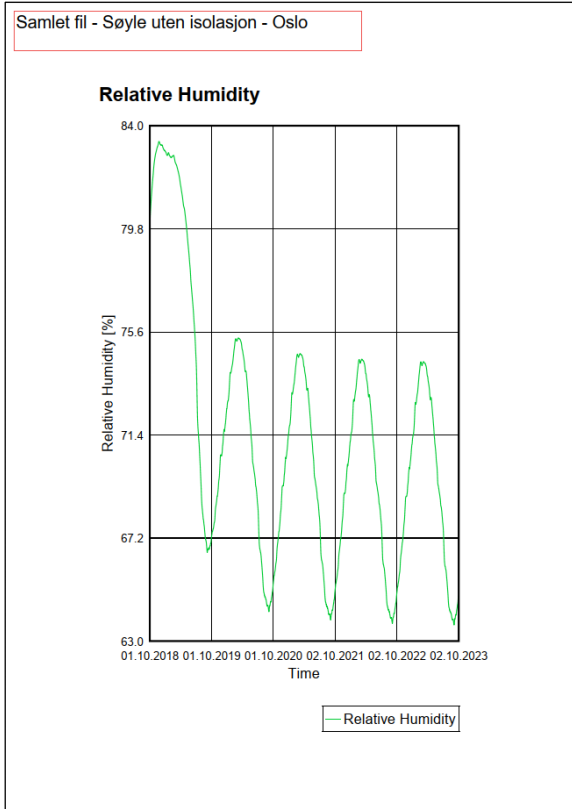
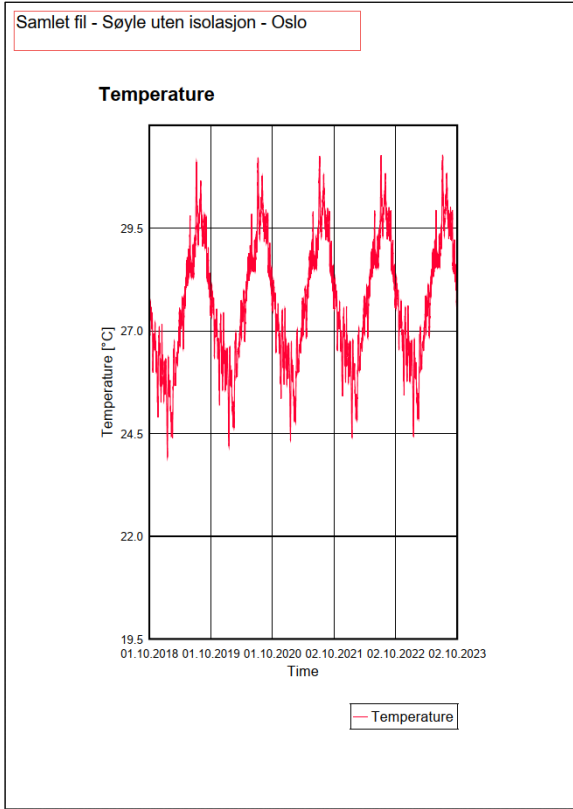
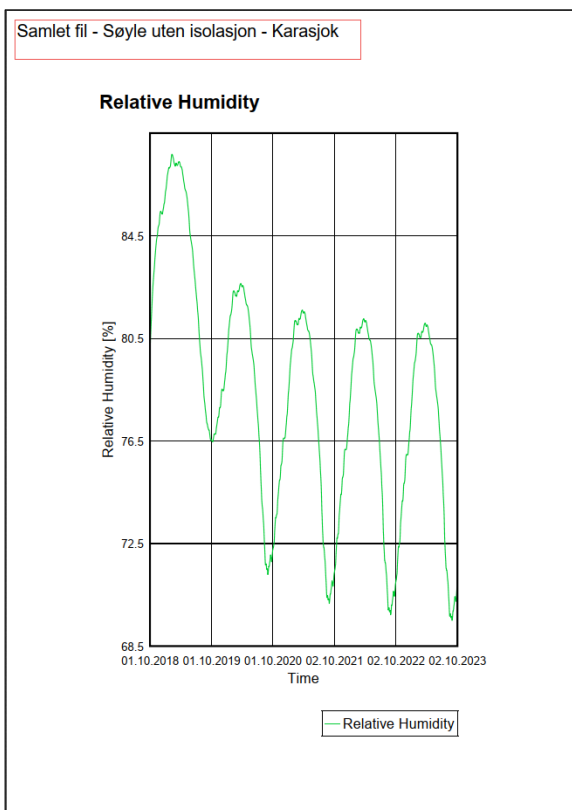
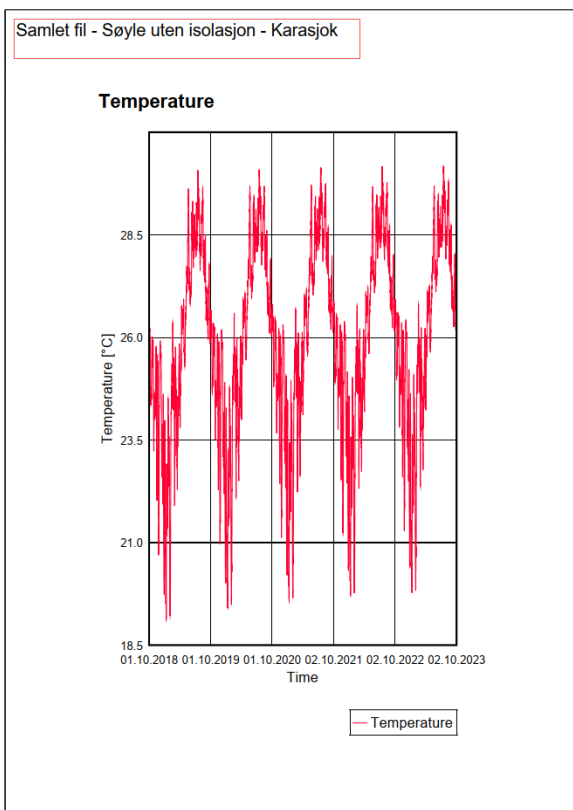
Varmemotstand isolert bindingsverk						
	Tykkelse [m]	Treandel %	λ isolasjon	λ trevirke	R_T m ² K/W	
Bygningssjikt	0,2	6 %	0,032	0,13	5,62	
		6 %	0,032	0,13		
R_T isolert sjikt					5,62	
Varmegjennomgang for øvrig sjikt						
	d [m]	λ	R m ² K/W			
Rsi	-	-	0,17			
Material	0,05	0,04	1,25			
	0,07	0,13	0,54			
Rse			0,04			
R_T øvrige sjikt			2,00			
Korreksjonsfaktor for utilsiktede luftåpninger i isolasjonen ΔU_G						
		$\Delta U''$	R_1	$R_{tot,h}$	ΔU_g	
		0,01	5,28	5,62	0,009	
Korreksjonsfaktor for mekanisk innfesting ΔU_f						
d_0	d_1	α	λ	n	A_f	ΔU_f
		0			5,62	0,000
					5,62	
Korreksjonsfaktor for nedbør på omvendte tak ΔU_r						
		p	f	x	R_1	ΔU_r
					5,28	0,000
					5,62	
U-verdi for yttertaket						0,140 W/m ² K

Figur 89: Beregnet U-verdi for gulv mot friluft.

Varmemotstand isolert bindingsverk									
				Tykkelse [m]	Treandel %	λ isolasjon	λ trevirke	R_i m ² K/W	
Bygningssjikt				0,25	20 %	0,032	0,13	5,74	
					1 %	0,036	0,13		
R_i isolert sjikt				0,25				5,74	
Varmegjennomgang for øvrig sjikt									
						d [m]	λ	R m ² K/W	
R _{si}						-	-	0,13	
Material						0,07	0,13	0,54	
R _{se}								0,13	
R_i øvrige sjikt								0,80	
Korreksjonfaktor for utilsiktede luftåpninger i isolasjonen ΔU_o									
					$\Delta U''$	R_1	$R_{tot,h}$	Δu_g	
					0,01	5,74	5,74	0,010	
Korreksjonsfaktor for mekanisk innfesting ΔU_i									
	d_o	d_i	α	λ	n	A_v	R_1	$R_{tot,h}$	ΔU_i
			0				4,84	5,74	0,000
U-verdi for yttervegg								0,163	W/m ² K

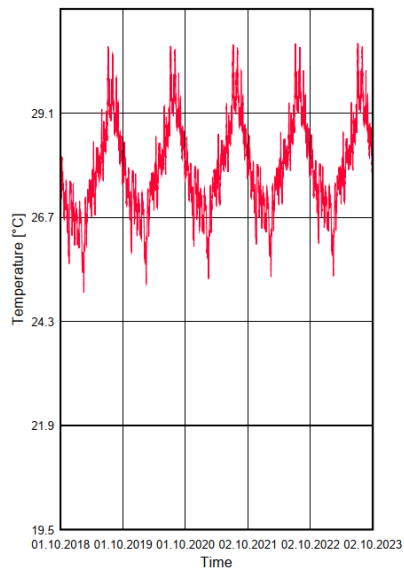
Figur 90: Beregnet U-verdi for yttervegger mot friluft.

Vedlegg F - Fullstendige resultater kuldebro søyle - dynamiske simuleringer



Samlet fil - Søyte uten isolasjon - Bergen

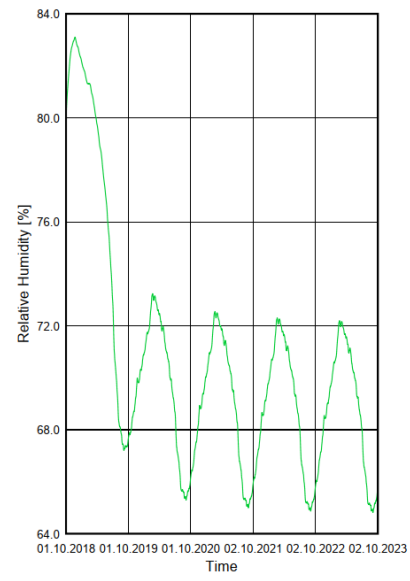
Temperature



— Temperature

Samlet fil - Søyte uten isolasjon - Bergen

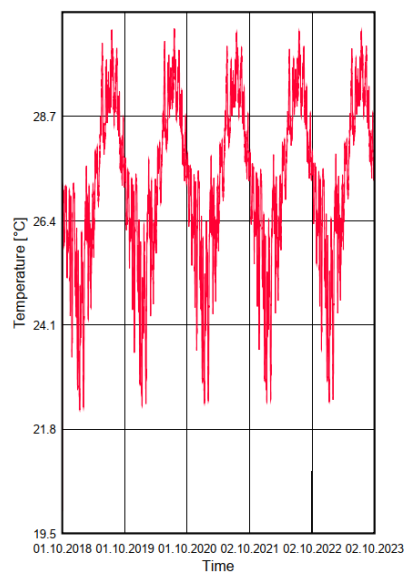
Relative Humidity



— Relative Humidity

Samlet fil - Søyte 50 mm isolasjon - Karasjok

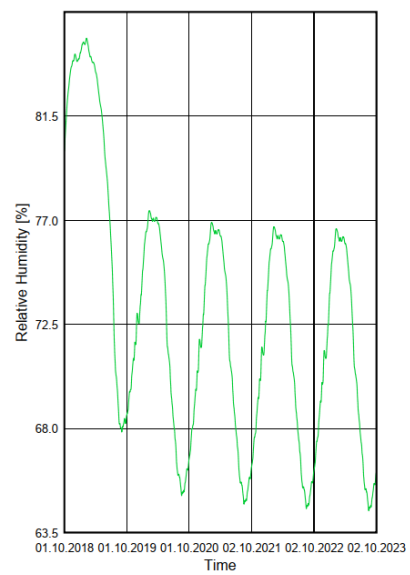
Temperature



— Temperature

Samlet fil - Søyte 50 mm isolasjon - Karasjok

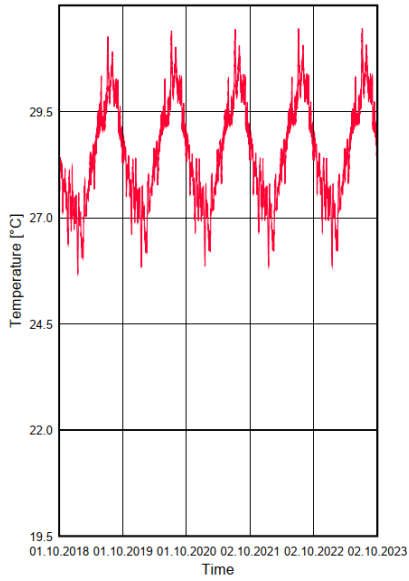
Relative Humidity



— Relative Humidity

Samlet fil - Søyte 50 mm isolasjon - Oslo

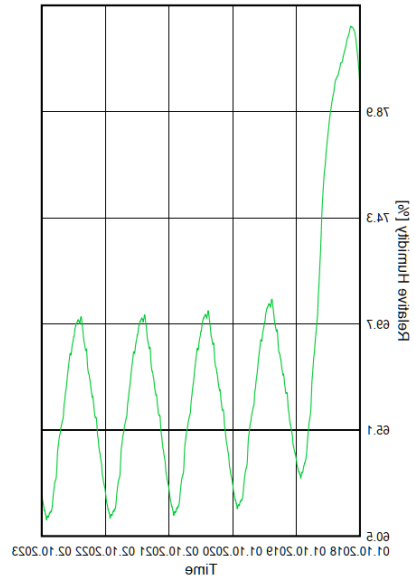
Temperature



— Temperature

Samlet fil - Søyte 50 mm isolasjon - Oslo

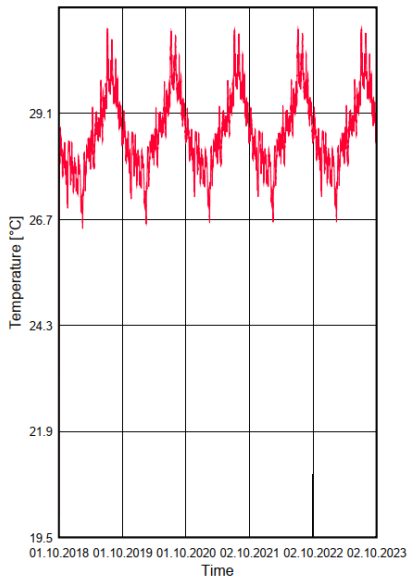
Relative Humidity



— Relative Humidity

Samlet fil - Søyte 50 mm isolasjon - Bergen

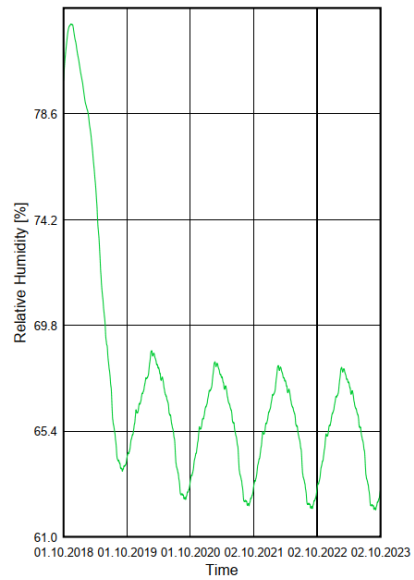
Temperature



— Temperature

Samlet fil - Søyte 50 mm isolasjon - Bergen

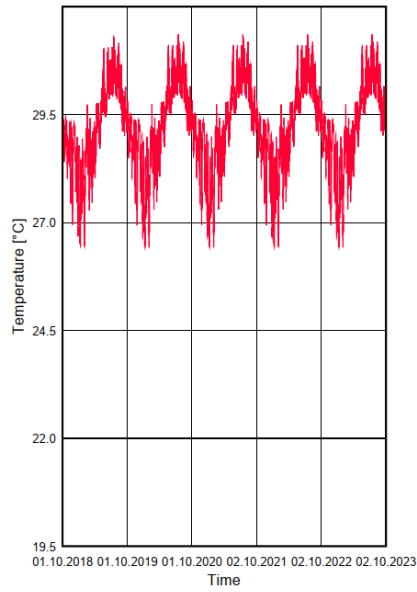
Relative Humidity



— Relative Humidity

Samlet fil - Søyte inntrukket - Karasjok

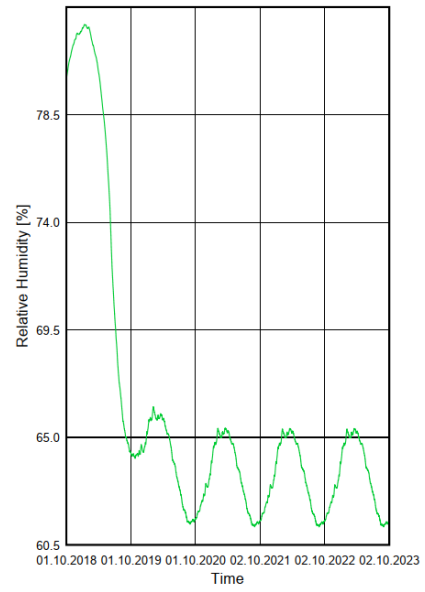
Temperature



Temperature

Samlet fil - Søyte inntrukket - Karasjok

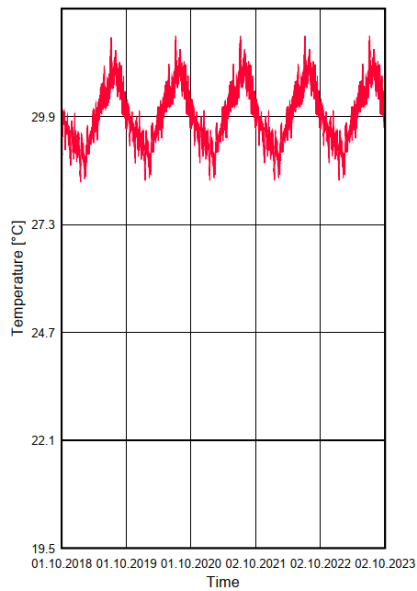
Relative Humidity



Relative Humidity

Samlet fil - Søyte inntrukket - Oslo

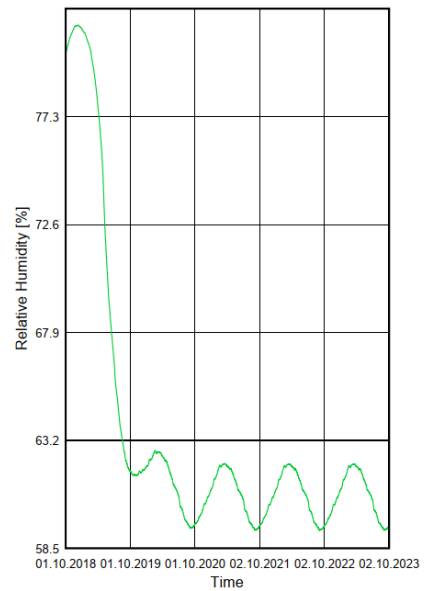
Temperature



Temperature

Samlet fil - Søyte inntrukket - Oslo

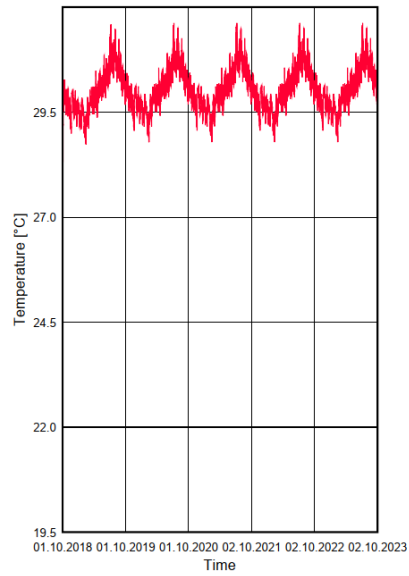
Relative Humidity



Relative Humidity

Samlet fil - Søyle inntrukket - Bergen

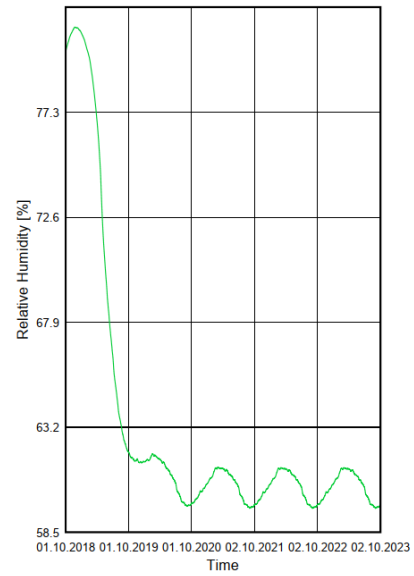
Temperature



— Temperature

Samlet fil - Søyle inntrukket - Bergen

Relative Humidity



— Relative Humidity