

Luftstrømning i skrå tretak

Ekperimentelle undersøkelser og
numeriske beregninger

Espen Hansen

Bygg- og miljøteknikk (2-årig)

Innlevert: mai 2016

Hovedveileder: Tore Kvande, BAT

Medveileder: Lars Gullbrekken, BAT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg, anlegg og transport



Oppgavens tittel: Luftstrømning i skrå tretak – eksperimentelle undersøkelser og numeriske beregninger	Dato: 23.05.2016		
	Antall sider (inkl. bilag): 181		
	Masteroppgave	X	Prosjektoppgave
Navn: Espen Hansen			
Faglærer/veileder: Tore Kvande			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere: Lars Gullbrekken, NTNU			

Ekstrakt:

Luftede skrå tretak er i dag en utbredt konstruksjon for både småhus og større næringsbygg i Norge. Utført etter de retningslinjene som er gitt i Byggforskserien, er skrå tretak å anse som en robust konstruksjonsmetode. Dagens retningslinjer for lufting av skrå tretak er på sin side for lite konkretiserte og nyanserte, spesielt for skrå tretak med lave vinkler og med bygningsintegrerte solceller. Denne oppgaven tjener med hensikt å danne økt faglig forståelse og kunnskap vedrørende luftstrømning, samt fukt- og temperaturforhold i skrå tretak.

Det fremgår av oppgavens eksperimentelle undersøkelser, at dersom spaltehøyden økes fremfor å øke steinlektenes høyde, oppnås et mindre trykktap over steinlektene, som i sin tur medfører mindre motstand mot luftstrømning. Videre fremgår det at raft-alternativet med lufting bak takrenna, medfører en økning i støttapskoeffisienten for raftekassen tilsvarende 230 %, sammenlignet med raftekassen med lufting gjennom spalter i raftets underside.

Fra respektive parameterstudier i denne oppgaven, fremgår luftespaltens høyde, som parameteren av størst betydning for ventilasjonens kapasitet. Lufthastigheten i spalten er på sin side avgjørende for ventilasjonens størrelse. Fuktforholdene i luftespalten vil preges i størst grad av lufthastigheten i spalten, samt spaltehøyden. Lufthastighet i luftespalten forstås videre som den mest betydningsfulle parameteren med hensyn på underkjøling og potensialet for kondens i et skrått tretak, etterfulgt av takhelning, spaltehøyde og isolasjonstykkelse.

Fremtidens tretak med bygningsintegrerte solceller krever mer nyanserte retningslinjer for lufting av skrå tretak, som blant annet hensyntar effekten av en endret takteking i skrå tretak. Et stadig fuktigere klima, vil sammen med en stadig kaldere vindspærre i skrå tretak, ytre et behov for å studere effekten av økt fuktbelastning for luftespaltens omsluttende flater. Videre forskning er nødvendig for å danne tilstrekkelig kunnskapsgrunnlag, for en fremtidig revidering av dagens retningslinjer for lufting av skrå tretak.

Stikkord:

1. Skrå tretak
2. Luftstrømning
3. Støttapskoeffisienter
4. COMSOL

Espen Hansen

FORORD

Denne masteroppgaven er skrevet ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, våren 2016. Oppgaven er skrevet ved Institutt for bygg, anlegg og transport, innenfor hovedprofilen bygnings- og materialteknikk. Masteroppgaven bygger videre på en prosjektoppgave, utført ved NTNU høsten 2015.

Norges forskningsråd annonserte i november 2014 opprettelsen av 17 nye sentre for forskningsdrevet innovasjon, hvorav Klima 2050 er et av disse. Klima 2050 ledes gjennom et samarbeid mellom vertsinstitusjonen SINTEF og NTNU. Formålet med SFI Klima 2050 vil blant annet være å utvikle teknologier og robuste løsninger for tilpasning av eksisterende og fremtidig byggverk i et klima i endring. Klima 2050 er delt inn i ulike arbeidspakker, blant annet; WP 1 – Klimaeksponering og fuktbestandige bygninger. Denne masteroppgaven og et pågående doktorarbeid; Klimatilpasning av tretak, er en del av WP 1.4.

Først og fremst ønsker jeg å takke veileder Tore Kvande for konstruktive tilbakemeldinger og oppfølging våren 2016. Det rettes også en takk til Sivert Uvsløkk og Stig Geving, som på hver sin måte har bidratt med faglige innspill underveis våren 2016. Sluttvis ønsker jeg å rette en stor takk til PhD-kandidat Lars Gullbrekken, som har en essensiell lagspiller under deler av både det praktiske og teoretiske arbeidet i oppgaven.

Trondheim 23.05.2016

Espen Hansen

SAMMENDRAG

Luftede skrå tretak er i dag en utbredt konstruksjon for både småhus og større næringsbygg i Norge. Utført etter de retningslinjene som er gitt i Byggforskserien, er skrå tretak å anse som en robust konstruksjonsmetode. Dagens retningslinjer for lufting av skrå tretak er på sin side for lite konkretiserte og nyanserte, spesielt for skrå tretak med lave vinkler og med bygningsintegrerte solceller. Denne oppgaven tjener med hensikt å danne økt faglig forståelse og kunnskap vedrørende luftstrømning, samt fukt- og temperaturforhold i skrå tretak. Økt forståelse og faglig grunnlag er innarbeidet gjennom relevant teori, eksperimentelle målinger, og numeriske beregninger. Kunnskapen om luftstrømning i skrå tretak er studert gjennom trykkmålinger på en testmodell av et skrått tretak, og gjennom beregning av støttapskoeffisienter for henholdsvis raft, steinlekter og møne.

Resultatene viser at å benytte justerte steinlekter, i snitt medfører en reduksjon i støttapskoeffisienten for steinlektene tilsvarende 35 %, sammenlignet med å benytte rettkantede steinlekter. Derfor kan det sies at et skrått tretak utført med justerte steinlekter, vil medføre økt luftstrømning, sammenlignet med et skrått tretak utført med rettkantede steinlekter. Dersom spaltehøyden økes fremfor å øke steinlektenes høyde, oppnås et mindre trykktap over steinlektene, som i sin tur medfører mindre motstand mot luftstrømning.

I denne oppgaven er to ulike alternativer for utførelse av raftekassen studert. Ved en sammenligning av en raftekasse med spalteåpninger i raftets underside, og en raftekasse hvor luftingen i sin helhet foretas bak takrenna, fremstår utførelsen med spalteåpninger i raftets underside gunstigst med tanke på luftstrømning i skrå tretak. Alternativet med lufting bak takrenna, medfører en økning i støttapskoeffisienten for raftekassen tilsvarende 230 %, sammenlignet med raftekassen med lufting gjennom spalter i raftets underside. Montering av innsektsnetting i raftekassene, er på sin side vist å medføre en økning tilsvarende 77 %. Ved en sammenligning av ulike utførelser av spalteåpninger i raftets underside, fremstår alternativet med to spalter på 25 mm, som den gunstigste løsningen. Løsningen med fem spalter på 10 mm, gav det største trykktapet, etterfulgt av løsningen med en spalte på 50 mm. Det kan derfor sies at en tradisjonell raftekasse med lufting gjennom spalter i raftekassens underside, er fordelaktig, sett i lys av å oppnå minst motstand mot luftstrømning i luftespalten i et skrått tretak. Møneløsningen som er testet viste seg å medføre et betydelig trykktap, sammenlignet med raft-alternativene. Det anbefales at møne utføres med en mulighet for utlufting, og muliggjør gjennomlufting under mønekammen.

Dersom en hensyntar usikkerhetene ved målingene i laboratoriet, og forenklingene som er gjort i COMSOL, oppleves relativ god overensstemmelse mellom målt og beregnet trykktap over steinlekter. Dette betinger på sin side fornuftig valg av ligningsvarianter og inputverdier.

For å kartlegge spalteutformingens og isolasjonstykkelsens innvirkning på fukt- og temperaturforhold i luftespalten, er det utført et flertalls parameterstudier i WUFI. Effekten av å øke isolasjonstykkelsen i et skrått tretak er observert størst for undertakets fuktforhold. Ved en økning fra 300 mm til 500 mm isolasjonstykkelse, øker årsgjennomsnittlig relativ luftfuktighet for undertaket med 1,8 %. Tilsvarende økning i isolasjonstykkelse, vil medføre at årsgjennomsnittlig temperatur for undertakets kalde side reduseres med 2,2 %. Underkjølingen størrelse vil på sin side øke med 6,6 %, og dets varighet med 15,7 %, for undertakets kalde side, ved samme økning i isolasjonstykkelsen i et skrått tretak.

Sammenlignet med små spaltetverrsnitt vil store spaltetverrsnitt bli varmere ved lav utetemperatur, grunnet redusert underkjøling. Videre vil store spaltetverrsnitt bli kaldere ved perioder med høy utetemperatur og intens solstråling, grunnet økt varmetransport. Ventilasjonens kapasitet er vist å øke i takt med økende spaltetverrsnitt, mens dets størrelse er avhengig av lufthastigheten i luftespalten. En økning i spaltehøyden fra 23 mm til 48 mm er vist å medføre en økning i årsgjennomsnittlig relativ luftfuktighet for spaltens omsluttende flater, tilsvarende 2 %. Ved økende spaltetverrsnitt, reduseres underkjølingens størrelse, mens dets varighet øker. Underkjølingens størrelse er vist å resultere i en reduksjon tilsvarende 5,2 %, mens dets varighet økes med 2,3 %, dersom spaltehøyden økes fra 23 mm til 48 mm. Potensialet for kondens vil øke ved økende spaltetverrsnitt, mens dets varighet reduseres.

Det fremgår av studien vedrørende varierende luftskifte i luftespalten, at økt luftskifte medfører økt fukttilskudd i luftespalten. Ringvirkningen av økt fukttilskudd i luftespalten, er en økning i årsgjennomsnittlig relativ luftfuktighet for luftespaltens omsluttende flater. Dersom luftskiftet økes fra 25 til 50 luftomsetninger i timen, observeres en økning i relativ luftfuktighet i luftespalten tilsvarende 2 %. Videre vil et økt luftskifte i luftespalten, redusere både underkjølingen og potensialet for kondens i luftespalten i et skrått tretak. Likeledes vil økt takhelning medføre en reduksjon i opptredende underkjøling, og potensialet for kondens i en luftespalte i et skrått tretak.

Lufthastighet og temperaturforhold i luftespalten i et skrått tretak er studert ved feltmålinger i ZEB Test Cell. Målingene viser at en antakelse om et midlere luftskifte for luftespalten i intervallet (50 – 100) luftomsetninger i timen, er et fornuftig valg for aktuell takkonstruksjon og geografisk plassering. I tillegg til en markant ekstremverdi for underkjølingen, tilsvarende seks grader, observeres en overraskende lang varighet med underkjøling av takflaten under aktuell måleperiode.

Endrede takkonstruksjoner med bygningsintegrerte solceller, vil sammen med et stadig fuktigere klima, og en stadig kaldere vindsperre, medføre endrede fukt- og temperaturforhold i en luftespalte. Det er derfor nærliggende å tro at snøsmelting ikke blir enkeltstående dimensjonerende parameter i fremtidens retningslinjer for lufting av skrå tretak. Grunnprinsippene for lufting av skrå tretak, vil antakeligvis kunne sammenfattes slik i fremtiden:

- Ventilere bort eventuell fukt fra takkonstruksjonen og dermed hindre uheldig fuktforhold i luftespalten og takkonstruksjonen
- Ventilere bort varmetilskudd under perioder med sol, og ventilere bort varmetilskudd gitt av takets varmetap, med hensikt å forebygge snøsmelting og uheldig isdannelse ved takfoten
- Redusere underkjøling av takflaten og kondens i luftespalten
- Bidra til å forebygge en reduksjon i bygningsintegrerte solcellers virkningsgrad i størst mulig grad

Fremtidens tretak med bygningsintegrerte solceller krever mer nyanserte retningslinjer for lufting av skrå tretak, som blant annet hensyntar effekten av en endret takteking. Et stadig fuktigere klima, vil sammen med en stadig kaldere vindsperre i skrå tretak, ytre et behov for å studere effekten av økt fuktbelastning for luftespaltens omsluttende flater. Videre forskning er nødvendig for å danne tilstrekkelig kunnskapsgrunnlag, for en fremtidig revidering av dagens retningslinjer for lufting av skrå tretak.

SUMMARY

Ventilated pitched wooden roofs are currently a widely used construction for residential and non-residential buildings in Norway. Performed by the guidelines set out in the building details, given by SINTEF Building research, ventilated pitched wooden roof are seen as a robust design method. The current guidelines for pitched wooden roofs are too little concretized and nuanced, especially for roof constructions with low angles and with building-integrated photovoltaics. This thesis serves the purpose to form higher level of technical understanding and knowledge regarding air flow, moisture and temperature conditions in pitched wooden roofs. Increased knowledge and technical understanding are incorporated through relevant theory, experimental investigations and numerical calculations. The knowledge of air flow through the cavity in pitched roofs, are studied through pressure measurements at a test model of a pitched wooden roof, and by calculation of the pressure loss coefficients for eave, battens, and the ridge.

The experimental study shows that the use of round-edged battens leads to a reduction of about 35 % in average, for the pressure loss over the battens, compared with using sharp edged battens. One might say that a pitched roof with round edged battens will experience an increased air flow, compared to a pitched roof with sharp edged battens. Increasing the height of the cavity leads to a smaller pressure loss, than when increasing the height of the battens. In this thesis, two solutions for eaves are studied. The eave where the air flows through openings in the lower part gives a smaller pressure loss, than for an eave with the air-intake behind the gutter. By comparing the two solutions, the eave with an air-intake behind the gutter, is shown to give an increase in pressure loss over the eave, corresponding to 230 %. Installation of insect netting in the eaves, on the other hand has been shown to cause an average increase in the pressure loss for the eaves, equivalent to 77 %. By comparing different air gap configurations for the eave with the air intake in the lower part, the alternative with two air gaps of 25 mm gives the lowest pressure loss. The alternative with five air gaps of 10 mm is shown to lead to the highest pressure loss over the eave, followed by the alternative with one air gap of 50 mm. It can therefore be said that a traditional eave, where the air flows through air gaps in the lower part of the eave, is advantageous in the view of achieving the least resistance to air flow in pitched wooden roofs. The solution for the ridge shows a considerable pressure loss, compared to the pressure loss for the eaves. Furthermore it is recommended that the ridge is performed with the possibility of aeration.

If one takes into account the uncertainties for the measurement in the laboratory, and the simplifications done in COMSOL, a good agreement is observed when comparing calculated and measured pressure loss over battens. A good agreement requires reasonable choosing of equation varieties and input values.

Several studies are carried out in WUFI, to form higher level of understanding about the design of the cavity in pitched wooden roofs, and its impact on the hygrothermal performance of such roof constructions. The hygrothermal effect of increased insulation thickness in a pitched wooden roof, are observed most severe for the warm side of the wind barrier. An increase in the insulation thickness from 300 mm to 500 mm, leads to increased annual average relative humidity corresponding to 1,8 % for the wind barrier. The same increase in the insulation thickness is shown to reduce the annual average temperature for the cold side of the wind barrier by 2,2 %. The undercooling of the cold side of the wind barrier will however increase with 6,6 %, and its duration with 15,7 %, for the same increase in the insulation thickness.

Compared to small cavities, large cavities will get warmer when the outdoor temperature drops, caused by reduced undercooling. Furthermore, large cavities will get colder under periods with high outdoor temperature and intense solar radiation, caused by increased heat transfer. The capacity of the cavity ventilation is shown to increase in line with increased cavity height, while as the size of the ventilation depends on the air velocity in the cavity. An increased cavity height from 23 mm to 48 mm is shown to lead to an increase in annual average relative humidity for the materials in the cavity, corresponding to 2 %. Increased cavity height leads to a reduction in the size of the undercooling, and increased duration. The potential for condensation in the cavity will increase with increased cavity height, while as its duration decreases.

The study regarding variable air change rate, shows that increasing the air change rate leads to a mentionable moisture load in the cavity. An increase in the air change from 25 to 50 ACH, leads to an increase in the annual average relative humidity in the cavity about 2 %. The study shows that, with increased air velocity in the cavity, both the undercooling and the potential for condensation will reduce. The same effect on the undercooling and potential for condensation is observed, when the roof angle increases.

Air velocity and temperature conditions in the cavity for a pitched wooden roof, is studied through measurements at ZEB Test Cell. The measurements show that an average air change rate in the interval (50 – 100) ACH is a reasonable choice for respective roof construction and geographic location. Maximal undercooling was six degrees, and a rather large duration was observed for respective period.

New roof constructions with building-integrated photovoltaics, will together with an increasingly humid climate, lead to a change in temperature- and moisture conditions in a pitched roof. It is therefore likely that melting of snow is not only the single design parameter in future guidelines regarding venting of pitched roofs. The basic principles for venting of pitched roofs could probably be summarized as follows in the future:

- Ventilate moisture from the roof construction and thereby prevent adverse moisture conditions in the air cavity in pitched roofs and the roof construction
- Ventilate heat gains under periods with intense solar radiation, and ventilate heat gains from the roof construction, to prevent snow melt under winter conditions
- Reduce undercooling and condensation in the cavity
- Help to prevent a reduction in building-integrated photovoltaics efficiency, caused by high module temperatures

Future ventilated pitched wooden roofs with building integrated photovoltaics, demands more nuanced guidelines for venting of pitched roofs. Increasingly humid climate together with a colder wind barrier, caused by increased insulation thickness, leads to a need to study an increased moisture load for the materials enclosing the cavity in a pitched wooden roof. Further research is required to form sufficient knowledge base, for a future revision of the guidelines regarding venting of pitched roofs.

INNHold

Forord	I
Sammendrag	III
Summary	V
Innhold	VII
1. Innledning	1
1.1. Bakgrunn.....	1
1.2. Formål.....	2
1.3. Begrensninger.....	2
1.4. Oppbygning.....	2
2. Lufting av skrå tretak	3
2.1. Oppbygning av skrå tretak.....	6
2.2. Skader og problemer.....	7
2.3. Dagens retningslinjer.....	8
2.4. utfordringer knyttet til økte isolasjonsmengder.....	9
3. Strømningsteori	11
3.1. Forutsetninger og begrep.....	11
3.2. Drivkrefter.....	14
3.2.1. Termisk oppdrift.....	14
3.2.2. Vindtrykk.....	15
3.3. Fysiske betraktninger.....	17
3.3.1. Kontinuitetsligningen.....	17
3.3.2. Energiligningen.....	17
3.3.3. Energiligningen uttrykt ved Bernoullis ligning.....	18
3.4. Strømningsteknisk grunnlag.....	19
3.4.1. Hydraulisk diameter.....	19
3.4.2. Absolutt og relativ ruhet.....	19
3.4.3. Reynolds tall.....	20
3.4.4. Kritisk Reynolds tall.....	20
3.4.5. Innløpslengde.....	20
3.5. Strømning i rør og kanaler.....	21
3.5.1. Strømningskarakteristikk.....	21
3.5.2. Overgangssone.....	21
3.6. Trykktap.....	22
3.6.1. Friksjon.....	22
3.6.2. Trykktap over komponenter i et system.....	23
3.6.3. Trykktap over et perforert areal.....	24

4. Fysikalsk grunnlag	25
4.1. Varmeoverføringsmekanismer i luftespalten	25
4.2. Konvektiv varmetransport i luftespalten	27
4.3. Konvektiv fukttransport i luftespalten.....	30
4.4. Luftespaltens ventilasjonsevne.....	33
4.5. Strålingsbalanse for takplanet	35
4.6. Kondens i luftespalten	38
5. Metode	41
5.1. Litteratursøk	41
5.2. Måleutstyr – testmodell	43
5.2.1. Sensorer	43
5.2.2. Vifte.....	43
5.2.3. Kalibrering av måleutstyr	43
5.2.4. Loggeoppsett	44
5.2.5. Usikkerhet ved måleutstyret – testmodell	44
5.3. Måleutstyr – ZEB Test Cell	45
5.3.1. Sensorer	45
5.3.2. Kalibrering av sensorer	45
5.3.3. Loggeoppsett	45
5.3.4. Usikkerhet ved målingene – ZEB Test Cell.....	45
5.4. WUFI.....	46
5.5. COMSOL	48
6. Resultat	49
6.1. Eksperimentelle undersøkelser – Testmodell.....	49
6.1.1. Friksjonstap	50
6.1.2. Støttap over lekter	51
6.1.3. Støttap over raft - alternativ 1	52
6.1.4. Støttap over raft - alternativ 2	54
6.1.5. Støttap over møne.....	55
6.2. Numeriske beregninger – COMSOL.....	56
6.2.1. Forenklinger	56
6.2.2. Trykktap over lekter	57
6.3. Fuktberegninger - WUFI.....	58
6.3.1. Effekten av økt isolasjonstykkelse	59
6.3.2. Effekten av økt spaltehøyde	60
6.3.3. Effekten av økt lufthastighet i luftespalten	62
6.3.4. Effekten av økt takhelning	65
6.4. Målinger ved ZEB – Test Cell	66
6.4.1. Lufthastighet i takets luftespalte	66
6.4.2. Temperaturforhold i luftespalten.....	67
6.4.3. Underkjøling av takflaten.....	68

7. Diskusjon	69
7.1. Sammenligning av målingene på testmodellen.....	69
7.1.1. Friksjonstap.....	69
7.1.2. Støttap for rettkantede steinlekter.....	69
7.1.3. Rettkantede lekter sammenlignet med justerte lekter.....	71
7.1.4. Sammenligning av raft-alternativene.....	72
7.1.5. Møneløsning.....	73
7.1.6. Usikkerhet ved målingene på testmodellen.....	74
7.1.7. Usikkerhet ved beregning av støttapskoeffisienter.....	78
7.1.8. Sammenligning med tidligere studier.....	79
7.2. Sammenligning av målt og beregnet trykktap.....	80
7.3. Parameterstudie i WUFI.....	82
7.3.1. Luftespaltens ventilasjonsevne.....	82
7.3.2. Fuktforhold i luftespalten.....	82
7.3.3. Temperaturforhold i luftespalten.....	83
7.3.4. Underkjøling av takflaten.....	83
7.3.5. Potensial for kondens i luftespalten.....	83
7.4. Målinger ved ZEB Test Cell.....	84
7.4.1. Usikkerhet.....	84
7.4.2. Lufthastighet i spalten.....	84
7.4.3. Underkjøling av takflaten.....	85
8. Konklusjon	87
9. Videre arbeid	89
Referanser	91
Vedlegg	97

1. INNLEDNING

1.1. BAKGRUNN

Byggsektoren står i dag for opptil 30 % av årlige klimagassutslipp globalt, og representerer mer enn 30 % av verdens energiforbruk (IEA) og (UNEP SBCI, 2009). Menneskets bidrag til klimaendringer er i dag kjent, mens de endelige effektene av et klima i endring ikke er fullstendig kartlagt. Stigende temperatur, økt og mer intens nedbør sammen med økt havnivå er allikevel vitenskapelig beviste endringer vi i dag opplever (Miljødirektoratet, 2013).

Omfanget av byggskader, som er særlig knyttet til fukt, viser gjennom skadearkivet til SINTEF Byggforsk at bygningsmassen i Norge er dårlig tilpasset dagens klima (Lisø og Kvande, 2007). Klimatilpasning av bygningskonstruksjoner vil være en viktig brikke i arbeidet med å utvikle robuste løsninger for morgendagens byggverk, samt et essensielt bøtemiddel på et klima i endring. Klimatilpasning av et sårbart bygd miljø er tidligere bakgrunn for et av byggenæringens største forskningsprogram de siste tiårene, Klima 2000. Bakteppet for forskningsprogrammet Klima 2000 var å videreutvikle utvalgte klimapåkjente konstruksjonstyper for mer robuste løsninger. Denne tanken videreføres nå i et bredere perspektiv gjennom forskningsprogrammet Klima 2050, hvor fokuset samtidig rettes mot infrastruktur (Klima 2050).

Et viktig bøtemiddel på klimautfordringen vi i dag står ovenfor vil være en boligmasse som i tillegg til å være tilpasset et klima i endring, forbruker mindre energi og samtidig produserer energi. Boligmassens energiproduksjon foretas hovedsakelig ved å utnytte solenergi gjennom bruk av solceller. En stadig synkende pris, har sammen med økt moduleffektivitet gjort installasjon av solceller til en foretrukket metode for lokal energiproduksjon. Solcellenes levetid og effektivitet henger tett sammen med temperaturen på modulene, som ved montering på tak, blant annet er avhengig av undertakets temperatur (Jelle et al., 2012). Følgelig er takets evne til å nøytralisere en ytre varmebelastning viktig i planlegging av solcelleanlegg for tak, spesielt for bygningsintegreerte solcelleanlegg.

Ved å sette strengere krav til boligmassens energiforbruk, endres følgelig ytelseskravene til konstruksjonenes tekniske komponenter i likhet med bygningskomponentene. Strengere krav til bygningskomponentenes varmetap, legger videre føringer for nødvendige isolasjonstykkelser. Effekten av økt isolasjonstykkelse er redusert varmetap gjennom konstruksjonen, økt uttørkingstid, og en stadig kaldere vindsperre (Geving og Holme, 2010). Dette medfører i sin tur økt fuktbelastning for vindsperresjiktet, som for trebaserte produkter kan gi uheldige ringvirkninger i form av gunstige vekstvilkår for muggsopp.

Lufting av skrå tretak har til nå tjent med en todelt hensikt, nemlig å hindre snøsmelting og isdannelse, samt fjerne byggfukt og fukt i form av kondens eller uheldige lekkasjer. Dagens retningslinjer for lufting av skrå isolerte tretak er for lite nyanserte og konkrete, særskilt for store takflater med lave vinkler, tak med store vinduer og tak med integreerte solceller/solfangere. Retningslinjer for utførelse av skrå isolerte tretak omhandler per dags dato i mindre grad de fysiske utfordringene ved klimaskjermen relatert til integrering av solceller/solfangere. Lufting av skrå tretak vil i fremtiden følgelig tjene flere hensikter, som bør innarbeides i nye, og mer konkretiserte retningslinjer for lufting av skrå tretak.

1.2. FORMÅL

Formålet med denne oppgaven er å øke forståelsen og faglig grunnlag for lufting og uttørking av skrå tretak. Målet med dette prosjektet er å danne et tydeligere bilde av luftstrømning i skrå tretak, gjennom relevant teori, eksperimentelle målinger, og numeriske beregninger.

Luftstrømning i luftespalter er blant annet avhengig av luftespaltens geometri, samt trykkforholdene ved raft og møne. Kunnskapen om trykkforhold er tenkt innhentet ved måling av støttapskoeffisienter både for raft, steinleker og møne. Deretter skal det foretas en verifisering av numeriske beregninger i programmet COMSOL, med resultatene fra testmodellen. Spalteutformingens innvirkning på fukt- og temperaturforhold i luftespalten i skrå tretak, er tenkt studert gjennom ulike parameterstudier i programmet WUFI.

Avslutningsvis skal det utføres reelle målinger av lufthastighet og temperaturforhold, i en av flere luftespalter i ZEB Test Cell.

1.3. BEGRENSNINGER

Denne rapporten er resultatet av en masteroppgave utført ved NTNU våren 2016, som tilsvarer 30 studiepoeng. I denne oppgaven står luftstrømning i luftespalter sentralt. Følgelig vil rapporten omhandle relevant strømmingsteknikk, samt nødvendig fysikalsk grunnlag. Branntekniske aspekter ved tak er ikke en del av denne oppgaven, og vil kun bli omhandlet på et generelt nivå, i likhet med potensialet for mikrobiologisk vekst i skrå tretak.

1.4. OPPBYGNING

Oppgaven omhandler innledningsvis temaet: lufting av skrå tretak. Videre følger dagens retningslinjer for lufting av skrå tretak, og effekten av mer energiambisiøse skrå tretak. Kapittel 3 og 4 tjener som oppgavens teoridel, og gir et grunnleggende strømmingsteknisk- og fysikalsk grunnlag. Kapittel 3 baseres forøvrig på forstudiet til inneværende oppgave, utført ved NTNU høsten 2015. Metode og relevant informasjon relatert til måleutstyr følger i kapittel 5. Resultater fra testmodellen, numeriske beregninger i COMSOL, fuktberregninger i WUFI, samt målingene ved ZEB Test Cell utgjør den sekundære delen av oppgaven, hvilket er plassert i kapittel 6. Diskusjon og oppsummering er plassert i kapittel 7. Konklusjonene som er trukket på bakgrunn av inneværende oppgave, samt behovet for videre arbeid er plassert i henholdsvis kapittel 8 og 9. Illustrasjoner, figurer og relevant data som er utelatt fra fritekst følger som en egen vedleggsdel, plassert sluttvis i denne oppgaven.

2. LUFTING AV SKRÅ TRETAK

I denne oppgaven er skrå tretak tema, hvor fokuset rettes mot skrå tretak som er isolert i hele, eller deler av takplanet. Skrå tretak utført med et kaldt luftet loft, eller kaldt ikke luftet loft, er ikke direkte en del av denne oppgaven. Luftespalten i skrå tretak har til nå tjent med to hensikter:

- Ventilere bort eventuell fukt fra takkonstruksjonen og dermed hindre uheldig fuktforhold i luftespalten og takkonstruksjonen
- Ventilere bort varmetilskudd under perioder med sol, og ventilere bort varmetilskudd gitt av takets varmetap, med hensikt å forebygge snøsmelting og uheldig isdannelse ved takfoten

Grunnlaget for luftespaltens behov og dets formål kan som i (Blom 1990) oppsummeres slik:

- Ventilere bort byggfukt i takkonstruksjonen
- Trykkutjevning for å hindre inntrenging av regn
- Redusere fuktinnhold i tekking og undertak
- Hindre/reducere kondensdannelse
- Hindre uønsket snøsmelting og isdannelse ved takfoten
- Redusere oppheting av takkonstruksjonen

Takets behov for lufting bestemmes først og fremst av aktuell takoppbygning og takets helning. I neste omgang er takets varmetap, som er gitt av takets U-verdi, ansett som dimensjonerende faktor med tanke på snøsmelting og isdannelse ved takfoten (Blom 1990). Valg av takoppbygning, innbefattet valg av type lekter og spaltehøyde, samt utførelse av raft og møne, er også betydningsfulle parametere for takets ventilasjonsevne. Lokale klimapåkjenninger som vind og snømengde legger videre føringslinjer for utformingen av luftespalten. Luftet behovet for skrå tretak er størst på steder med lite vind, mye snø, samt for tak med små takvinkler. Lav lufthastighet i spalten bidrar til at varmemotstanden gitt av spalten i sin helhet øker, som i sin tur øker temperaturen og senker relativ luftfuktighet i spalten, hvilket er fordelaktig fra et fuktteknisk ståsted. Luftstrømningen gjennom luftespalten må være stor nok til å fjerne eventuelle lekkasjer og fukt i spalten. Det største behovet for lufting har vi på vinterstid, hvor varmetilskuddet fra takkonstruksjonen bidrar til å varme opp luftespalten. Under enkelte perioder av året, vil høy lufthastighet kunne bidra til å øke relativ luftfuktighet i luftespalten, hvilket er uheldig. Under varme sommerdager, vil gjennomlufting kunne redusere varmetilskuddet fra den varme takflaten. Dette er spesielt av interesse ved planlegging av integrerte solcelleanlegg i skrå tretak, grunnet det faktum at solcelleanleggenes effektivitet reduseres, i takt med økt modultemperatur.

Fukt- og temperaturforhold i en luftespalte vil preges i betydelig grad av uteluften. Under de kalde periodene ute med snø på taket, vil takflaten kjøles ned. Under disse periodene vil derfor uteluften kunne kondensere på den kalde takflaten i luftespalten. Videre er det ønskelig å holde takflaten så kald at snøsmelting forhindres. Derfor kan det sies at en ønsker begrenset luftstrømning i luftespalten under disse periodene av året, og at dimensjonerende parameter her må være å hindre snøsmelting. Under sommerhalvåret vil situasjonen være motsatt, hvor en ønsker å fjerne mest mulig varmetilskudd i luftespalten. Det er derfor ingen enkel oppgave å dimensjonere behovet for lufting av et skrått tretak, når samtlige interesser skal hensyntas.

I neste omgang er beregning av luftstrømning i luftespalter en dels kompleks oppgave, som ytterligere kompliserer totalbildet. Beregning av lufthastighet i luftespalten avhenger av vindhastighet på stedet, formfaktorer for ulike takutstikk, informasjon om trykktap gitt av tverrsnittsendringer i luftespalten, og friksjonstapet gitt av materialene som omslutter luftespalten.

En luftespalte i et skrått tretak vil i likhet med en luftespalte i en yttervegg, medføre trykkutjevning. Ved å benytte en luftespalte vil overtrykket som driver slagregn gjennom henholdsvis taktekkning og kledning reduseres. Dette prinsippet er i litteraturen kjent som trykkutjevningssprinsippet, og ble studert spesielt for fuger gjennom arbeidet (Birkeland, 1960). Prinsippet om trykkutjevning baserer seg på at luftvolumet under taktekkningen skal stå i forbindelse med uteluften, slik at trykket på begge sider av tekkingen er det samme. Således kan lufttrykket bak tekkingen variere i takt med vindbelastningen mot aktuelle flater (Birkeland, 1960). Redusert trykkgradient over taktekkningen er følgelig av interesse, men er i likhet med beregning av luftstrømning i en luftespalte i et skrått tretak, en kompleks oppgave. I denne oppgaven er fokuset i det følgende rettet mot luftstrømning i skrå tretak.

Et annet viktig moment ved planlegging av lufting av skrå tretak, er utforming av raftet. Fra en tidligere studie (Gustavsen, Uvsløkk, m.fl., 2005), ble det vist at snøinndrev for ulike rafteløsninger viser seg å være betydelig. Studien viste at tak med luftekanaler uten tverrsnittsendringer er lite utsatt for utfelling av snø. Dette skyldes at lufthastigheten ikke blir redusert av tverrsnittsendringer forårsaket av tverrgående steinlekker. Snøinndrev er spesielt uheldig for takkonstruksjoner med kaldt loft, men vil i likhet med kalde loft, skape problemer for takkonstruksjoner hvor lufting skjer i sin helhet gjennom luftespalter. I tilfeller med en kontinuerlig luftespalte uten tverrsnittsendringer vil eventuell utfelling av snø forekomme i raftekassen. I slike tilfeller kan snøinndrev tette luftingen ved raftet, som minimerer luftstrømningen gjennom luftespalten. Det er viktig å presisere at møne også vil tettes når snøen legger seg på taket, og etter hvert blir mer kompakt. Når møne er tett, vil en mulighet for gjennomlufting under mønekammen/mønebordet være viktig. Det er derfor viktig å bygge opp møne på korrekt måte, med avstandsfester for mønekammen/mønebordet (Blom, 1990). Redusert lufting av taket på vinterstid er spesielt uheldig, ettersom det er under denne perioden luftingen forhindrer isdannelse ved takfoten, forårsaket av at snøen smelter langs takplanet.

Økende isolasjonstykkelser medfører et mindre varmetap, og en stadig kaldere vindspærre. Dette medfører at grunnlaget for snøsmelting i takplanet reduseres. Det kan således tenkes, at snøsmelting ikke nødvendigvis vil være et enkeltstående dimensjonerende moment, i fremtidens retningslinjer for lufting av skrå tretak. Sammenhengen mellom underkjøling av taktekkningen og utfelt kondens i luftespalten bør i økende grad studeres nærmere. Videre vil det i fremtiden være viktig å vurdere fuktforholdene i luftespalten, mer nyansert enn hva som til nå har vært praksis. Det nærliggende å tro at fremtidens tretak vil utformes i økende grad med bygningsintegreerte solceller, hvilket betinger at fremtidige retningslinjer hensyntar innvirkningen av en endret taktekkning, og medfølgende fysikalske utfordringer.

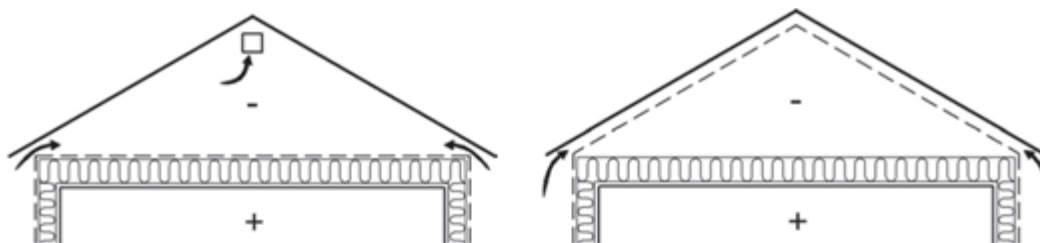
Fra et brannteknisk ståsted er luftespalter problematisk. Luftespalter gir et ekstra bevegelsesmoment i luften grunnet skorsteinseffekten, og vil følgelig lette brannspredning over takplanet. I tilfeller med krysslufting er det nærliggende å tro at bevegelsesmomentet øker, og at brannspredningen kan bli vesentlig mer betydelig. Raft og takutstikk er sett på som et svakt punkt i brannsikkerheten for trehus. Dette grunnet mulighet for brannspredning ut av åpninger/vinduer nære raftet, hvor temperaturen kan sammenlignes med nivået i et røykklag innendørs. Brannspredning via fasader opp til raft er også en utfordring, hvor raftekassens brannmotstand er av betydning både for videre brannspredning. Brannmotstand for ubeskyttede tradisjonelle raftekasser er ansett som neglisjerbar, ettersom trevirket i raftet relativt hurtig når en antennelsestemperatur på rundt 300 °C ved brannspredning oppover fasaden, eller ut av et vindu (Östmann, 2012). Raft med lufting bak takrenne er i markedet ansett som en bedre brannteknisk løsning, og er gjennom et prosjekt utført ved VTT, vist å forsinke trevirket i luftespalten å oppnå antennelsestemperatur i ca 10-15 minutter (Hietaniemi, m.fl., 2003). Forsøket utført av (Hietaniemi, m.fl., 2003), fokuserte på raftekasser i sin helhet, uten isolasjon mellom sperrene. Isolasjon mellom sperrene vil på sin side beskytte trevirke i taksperrene. Dersom en raftekasse skal tjene som en branncellebegrensende bygningsdel, er minimum brannmotstand EI30 (VTEK). En utforming av raftet med lufting bak takrenna er således ikke ansett som en godkjent løsning rent brannteknisk, uten videre passiv brannsikring eller isolerte raft. Det finnes på en annen side takfotventiler, som ved korrekt utførelse imøtekommer 30 minutters brannmotstand. Takets ventilasjonsevne vil på sin side bli redusert ved montering av slike ventiler, ettersom effektivt åpningsareal for luftespalten reduseres betraktelig.

I et fuktigere klima vil effekten av å ha god ventilasjon i luftespalten, kunne medføre oppfukning av materialene i luftespalten i enkelte perioder av året. Et typisk innlandsklima vil på sin side medføre oppfukning i mindre grad enn for kystnære strøk. En større luftespalte i taket medfører på sin side økt fare for brannspredning og inndriv av nedbør. I en totalvurdering av utførelse av takets luftespalte må faktorer som takets størrelse, helning og oppbygning, hensyntas på lik linje med klimatiske faktorer.

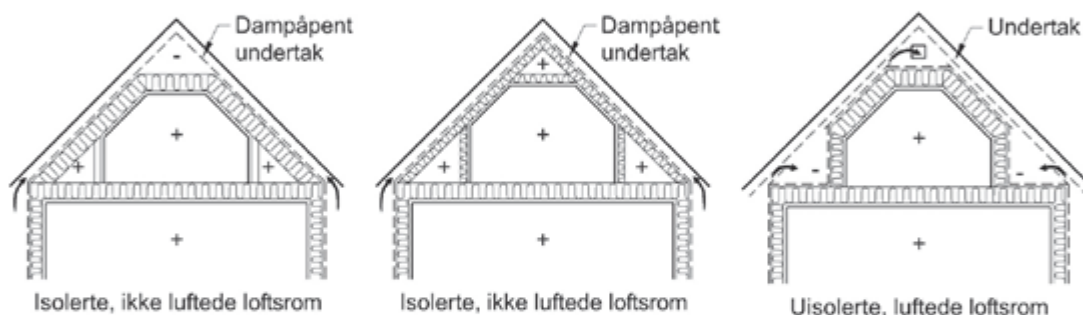
En eventuell revidering av dagens retningslinjer for lufting av skrå tretak er følgelig ingen enkel oppgave. Som nevnt må retningslinjene for lufting av skrå tretak hensynta motstridene interesser, slik som både fukt-, varme-, og branntekniske aspekter ved lufting av skrå tretak. I neste omgang bør eventuelle nye retningslinjer relateres til lokale klimatiske forhold i størst mulig grad, slik at fremtidens tretak i størst mulig grad tilpasses klimaet konstruksjonene skal motstå over deres levetid.

2.1. OPPBYGNING AV SKRÅ TRETAK

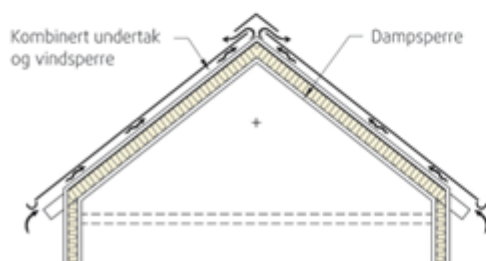
Skrå tretak er i dag en utbredt metode for utforming av tak i både småhus og større næringsbygg. Vi skiller mellom skrå tretak som er isolert i hele takplanet, skrå tretak som er delvis isolert i takplanet og kalde loft. De prinsipielle utformingene omtales i anvisninger som isolerte skrå tretak og skrå tretak med kaldt loft (Byggforskserien 525.106).



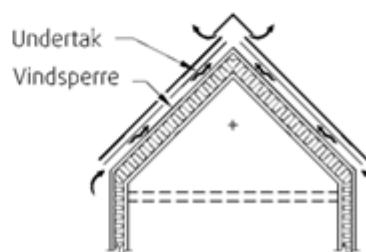
Figur 2.2.1a



Figur 2.2.1b



Figur 2.2.1c



Figur 2.2.1d

Figur 2.2.1. Prinsipiell oppbygning av skrå tretak (Byggforskserien 525.101, 525.102, 525.106 og 525.107).

Figur 2.2.1a viser prinsipiell oppbygning av et skrått tretak med kaldt loft. For slike oppbygninger skiller det mellom kaldt, luftet loft og kaldt, ikke luftet loft. Figur 2.2.1b viser oppbygning av et skrått tretak med oppholdsrom i deler av loftet. Prinsipiell oppbygning av skrå tretak med oppholdsrom i deler av loftet kan utføres med delvis eller fullt isolert takplan, og med isolerte eller uisolerte knevegger (Byggforskserien, 525.107). Prinsippet med bruk av kombinert undertak og vindsperre er vist i figur 2.2.1c. Figur 2.2.1d viser utførelse av skrå tretak, hvor lufting foretas mellom vindsperre og undertak. Denne metoden er spesielt aktuell hvor det benyttes damp tett undertak og et mer permeabelt vindsperreprodukt mot selve takkonstruksjonen (Byggforskserien, 525.101).

2.2. SKADER OG PROBLEMER

Skader og problemer i skrå tretak fremkommer som følge av de ulike påkjenningene tak utsettes for, samt eventuell uheldig utførelse. Regn er alene anslått her til lands å stå for 12 % av alle byggskadene som skyldes nedbør (Lisø og Kvande, 2007). Skrå tretak er i likhet med tak generelt sårbare ovenfor skader relatert til nedbør, som er sett på som den mest betydningsfulle faktoren relatert til skader i tak. Videre er lekkasjer gjennom takkonstruksjonenes dampsperre svært uheldig, ettersom dette, i likhet med nedbør, kan medføre alvorlige fuktskader. Geving og Thune (2002) trekker frem følgende vanlige årsaker til fuktskader i skrå tretak:

- Utette beslag og overgangsløsninger
- Utette gjennomføringer
- Punktering av tekking
- Utett damp- og vindsperre
- Utett undertak
- Mangelfull/manglende lufting av taket

Ringvirkningene av fuktskader kan være omfattende, mens muggsoppvekst og råte er sett på som de mest alvorlige utfallene. Fuktskader kan i sin enkleste form medføre sjenerende flekker, og i motsatt ende, medføre alvorlige helseplager over tid. Geving (2011) trekker frem følgende skader som de mest vanlige i skrå tretak:

- Råte i trevirke
- Muggvekst
- Drypping og vannlekkasjer til nedenforliggende konstruksjoner
- Sjenerende fuktmerker på innvendige overflater
- Istapper/isdannelse og lekkasje fra oppdemmet smeltevann

Grunnet skorsteinseffekten vil det forekomme et innvendig overtrykk i takregionen i bygninger. Dersom dampsperra er utett, vil fuktig inneluft strømme opp i takkonstruksjonen. Den fuktige inneluften avkjøles så til duggpunktet, for så å utfelles som kondens eller rim. Ved værømslag kan rim som smelter renne ned i takkonstruksjonen, og i enkelte tilfeller forårsake alvorlige fuktskader. Desto varmere luftespalten er på vintertid, jo mer øker potensialet for snøsmelting. Det er derfor ønskelig med en så kald takflate/taktekking som mulig, slik at eventuell snø på taktekkningen ikke smelter og siden fryser. Dette unngås ved å minimere varmetapet gjennom taket, i kombinasjon med tilstrekkelig gjennomlufting. Luftlekkasjer vil på sin side bidra til å øke varmetapet gjennom taket, og vil i tillegg til å øke faren for kondens på undertaket, øke potensialet for snøsmelting grunnet et ekstra bidrag i varmetapet. Det er verdt å presisere at effekten av luftlekkasjer vil bli mer betydelig, i takt med økende isolasjonstykkelse i taket. Dette grunnet at økt isolasjonstykkelse medfører en kaldere vindsperre, økt relativ luftfuktighet, samt økt uttørkingstid for materialene i et skrått tretak.

2.3. DAGENS RETNINGSLINJER

Dagens retningslinjer for utforming av skrå tretak er primært gitt gjennom detaljblader i byggforskserien, som er basert på erfaringer og tidligere doktorarbeid innen temaet. Retningslinjene er på sin side for lite nyanserte og for lite konkretisert for større tretak. Takenes totale luftebehov og tilhørende dimensjonering, samt kryssluftingens innvirkning, er ikke i detalj omhandlet i anvisningene. Retningslinjene er i dag konkretisert for skrå tretak med følgende utforming:

- En lengde inntil 7 meter
- Tak med helning større eller lik 10-15 grader
- Tak tilpasset dagens isolasjonsmengde, regulert av byggt teknisk forskrift

Småhustak med en lengde inntil 7 meter anbefales utført med en minimums høyde på luftespalten, tilsvarende 48mm. Videre nevnes det at tilstrekkelig effektiv lufting for tak med en lengde over 15 meter er komplisert å oppnå (Byggforskserien, 525.101). Takplan med en lengde over 7,5 meter anbefales utført med et luftsjikt på opptil 100 mm (Byggforskserien, 525.102). Retningslinjene legger videre minimumføringer, hvor det for tak med en lengde inntil 15 meter er anbefalt helning større enn 10-15 grader (Byggforskserien, 525.102). Tak med en helning mindre enn 10 grader, anbefales utført annerledes. Dagens retningslinjer for skrå isolerte tretak med kombinert undertak og vindsperre, er gitt i tabell 2.3.1.

Tabell 2.3.1. Anbefalt sløyfehøyde (mm) avhengig av takets helning og lengde (Byggforskserien 525.102).

Takvinkel	Taklengde (m)		
	7,5	10	15
18 – 30 °	36	36 + 36	48 + 48
31 – 40 °	30	36	36 + 23
≥ 41 °	23	36	36 + 23

Som følge av klimaendringer og endrede klimaskjærmer, bør retningslinjene i nær fremtid omhandle:

- Tak med isolasjonstykkelse tilpasset fremtidens byggeforskrifter
- Tak med integrerte eller eksternt monterte solcelleanlegg
- Tak utsatt for endrede klimapåkjenninger (ekstremnedbør og/eller i kombinasjon med endrede vindforhold)

Dagens retningslinjer for utforming av skrå tretak omhandler i mindre grad lokale klimatiske forhold, som følgelig er av stor betydning for konstruktive valg under designprosessen. Klimabeskrivelser i lærebøker og anvisninger slik som «værutsatte områder», «steder med mye slagregn», «værharde kyststrøk, og lignende muliggjør kun delvis geografisk differensiert klimatilpasninger av bygninger (Lisø og Kvande, 2007). Retningslinjer for utførelse av luftespalten i tretak bør så langt det er mulig rettes mot lokale klimaforhold. Dette for å oppnå robuste takkonstruksjoner, som under deres levetid skal motstå påkjenninger fra et klima i endring.

2.4. UTFORDRINGER KNYTTET TIL ØKTE ISOLASJONSMENGDER

Dersom verden skal oppfylle togradersmålet, må klimagassutslippene reduseres med 90 prosent sammenlignet med 2010, i løpet av perioden 2040-2070 (Miljødirektoratet, 2013). Energiproduksjon er den største posten for menneskeskapt klimagassutslipp, og energieffektivisering i denne sektoren er følgelig sett på som et effektivt hjelpemiddel på veien mot togradersmålet. Ringvirkningene av regjeringens ambisjon om et skjerpet krav til den norske boligmassens energiforbruk, er i sin tur endrede føringslinjer for nødvendige isolasjonsmengder. Dersom regjeringens ambisjoner tas til betraktning, kan det sies at trenden går i retning mot tykkere bygningskomponenter for den fremtidige norske boligmasse. Fremtidige tretak vil i likhet med vegger nødvendigvis bli tykkere, ettersom det er nærliggende å tro at U-verdien til tak vil reduseres i fremtidige byggeforskrifter. En oversikt over nødvendige isolasjonstykkelser ved gitte krav til takets U-verdi er gitt i tabell 2.4.1.

Tabell 2.4.1. U-verdier for skrå tretak med tilhørende isolasjonstykkelser (Byggforskserien 471.013).
Grunnlag: *sperretak av I-profiler og $\lambda_{iso} = 0,037 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.*

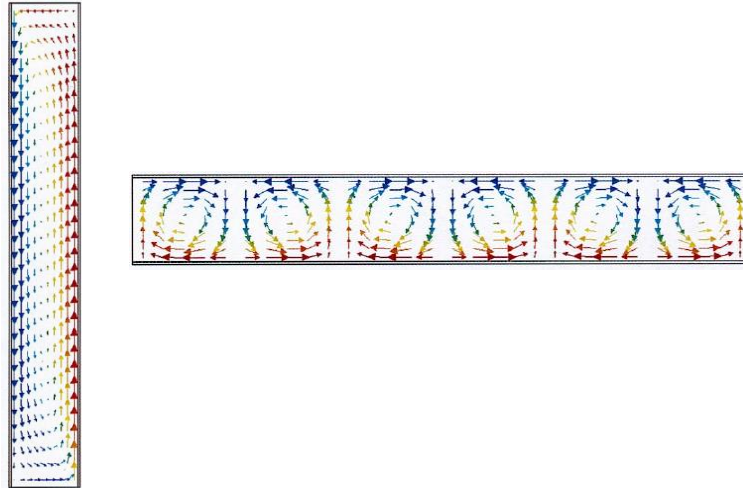
U-verdi (W/(m·K))	Nødvendig isolasjonstykkelse (mm)
0,20	200
0,15	275
0,10	400
0,07	600

Tykkere bygningskomponenter medfører at varmetapet gjennom respektive komponenter reduseres, som følgelig medfører at bygningskomponentenes ytterside stadig blir kaldere. En kaldere vindspærre medfører at relativ luftfuktighet ved vindspærrens overflate øker. Resultatet i Geving og Holme (2010), viste at effekten av å øke isolasjonstykkelsen fra 150 til 400 mm i en bindingsverkvegg av tre, resulterer i en 3 % økning i relativ luftfuktighet ved vindspærresjiktet om vinteren. Et mer betydelig resultat fra studien var effekten i uttørkingstid for bindingsverkvegger, som i ekstreme tilfeller fordobles ved overgangen fra 150 til 400 mm mineralull. Selv om fokuset i tidligere relevante studier (Uvsløkk, 2005), (Geving og Holme, 2010) og (Blom og Uvsløkk, 2012) primært har vært rettet mot bindingsverkvegger av tre, samt kalde loft, er det nærliggende å tro at trenden og effektene er overførbare for isolerte skrå tretak. Dette grunnet at en bindingsverkvegg og et skrått tretak rent fuktteknisk, er svært like, dersom det forutsettes samme grense- og initialbetingelser. Effekten av økt isolasjonstykkelse i skrå tretak, forstås innledningsvis slik:

1. Redusert varmetap
2. Redusert temperatur på vindspærrens overflate
3. Økt relativ luftfuktighet i luftespalten
4. Økt potensial for kondens i spalten
5. Gunstigere betingelser for muggsoppvekst

Økt relativ luftfuktighet ved vindspærresjiktet i et skrått isolert tretak er studert i (Blom og Uvsløkk, 2012), hvor undertakets/vindspærresjiktets motstand mot dampgjennomgang ble analysert. Studien påpekte fordelene med et vindspærresjikt med noe termisk masse og evne for kondensopptak, samt ulempene med å benytte et vindspærresjikt uten nevneverdig kondensopptaksevne. Kondens og kondensopptak er ytterligere omhandlet i kapittel 4.6, mens underkjøling av takflaten er videre omtalt i kapittel 4.5.

Naturlig konveksjon er også en effekt som bør studeres ytterligere for skrå tretak. Naturlig konveksjon er omhandlet i et flertall av publikasjoner og var blant annet tematikk i doktoravhandlingen (Økland, 1998). Strømningsbildet for konveksjon er godt kjent for vegger og horisontale flater, eksempelvis bjelkelag opp mot loft, slik vist i figur 2.4.1. Det finnes på en annen side få studier per dags dato, som omhandler naturlig konveksjon i skrå tretak.



Figur 1.4.1. Strømningskarakteristikk forårsaket av naturlig konveksjon for et vertikalt isolasjonssjikt (venstre) og et horisontalt isolasjonssjikt (Janssens, 1998).

Naturlig konveksjon forårsakes av temperaturdifferanse, som medfører densitetsforskjeller i lufta. I henhold til Bernoulli's ligning (se kapittel 3.3.3), vil densitetsforskjeller i lufta forårsake trykkforskjeller. Den resulterende luftstrømningen som forårsakes av trykkforskjeller i lufta, kalles fri eller naturlig konveksjon (Økland, 1998). Teorien tilsier at størrelsesorden av naturlig konveksjon øker i takt med økende isolasjonstykkelse, hvilket får en stadig økende innvirkning på energiforbruk og vanndamptransport (Økland, 1998).

En annen effekt av naturlig konveksjon i isolasjonssjikt er omfordeling av fukt. I en bindingsverkvegg vil eksempelvis nedre og ytre del bli tørrere, mens øvre og ytre del vil bli fuktigere, spesielt i uttørkningsfasen (Geving og Holme, 2010). Hvordan fuktfordelingsforløpet i skrå tretak utarter seg, er i likhet med naturlig konveksjon i skrå tretak mindre omhandlet i litteraturen. Naturlig konveksjon i skrå tretak er en del av et pågående doktorarbeid (Gullbrekken, 2016).

Tester på reelle takkonstruksjoner har vist at uteluften kan kondensere på luftespaltens overflater, grunnet underkjøling av takflaten under gitte klimaforhold (Nusser, Teibinger, 2013). Eventuell fukt som trenger gjennom takkonstruksjonen via fuktdiffusjon, kan kondensere på undertakets/vindsperrens nedre del dersom lufthastigheten i spalten er for liten. Ved korrekte utførte takkonstruksjoner, ansees denne faren som neglisjerbar, men kan i tilfeller med utett dampspærre være markant. Dette medfører i sin tur en økt fuktbelastning for materialene i taket, som bør studeres nærmere.

3. STRØMNINGSTEORI

3.1. FORUTSETNINGER OG BEGREP

Luftstrømning i yttertaks luftespalte kan beskrives ved å benytte formler og begreper i fluidmekanikken. I denne sammenheng er det forutsatt stasjonær strømning, og at fluidet som omhandles ansees som inkompressibelt. Dette er nødvendig for at formelverket skal være gyldig. Det er videre viktig å bemerke at realiteten er en annen situasjon. Strømningen i luftespalter vil i praksis være dominert av transiente forhold, gitt av vindtrykk på bygninger. Informasjon om vindforhold, formfaktorer, trykktap og spaltens utforming, er i neste omgang essensielt for å kunne beregne lufthastighet i en luftespalte i et skrått tretak. I det følgende beregningsgrunnlag er fluidets fysiske egenskaper av stor betydning. For å lette forståelsen av beregningsgrunnlaget, omtales kort relevante egenskaper og begreper innledningsvis (Hansen, red., 2013).

DENSITET [kg/m^3], er et mål på masse per volumenhet, som avhenger av temperatur og trykk for luft.

VISKOSITET er et uttrykk på hvor «seigt» fluidet flyter.

DYNAMISK VISKOSITET [Ns/m^2], er definer som:

$$\eta = \frac{\tau}{\frac{\partial v}{\partial x}} \quad (3.1)$$

Hvor: τ = Forskyvningsspenning i et plan parallelt med strømningsretningen
 $\partial v / \partial x$ = Hastighetsgradienten vinkelrett på strømningsretningen

Dynamisk viskositet kan beregnes tilnærmet etter formel 3.2 (Blom, 1990).

$$\eta = (17,1 + 0,049 \cdot t) \cdot 10^{-6} \quad (3.2)$$

Hvor: t = Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]

KINEMATISK VISKOSITET [m^2/s], er definert som:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (3.3)$$

Hvor: η = Luftens dynamiske viskositet [Ns/m^2]
 ρ = Luftens densitet [kg/m^3]

Ved beregning av lufthastighet i luftespalter er trykk en viktig parameter. Det eksisterer ulike begreper relatert til trykk, som ikke må forveksles. De ulike begrepene omtales kort i det følgende (Cengel et al., 2012).

STATISK TRYKK representerer det faktiske termodynamiske trykket til fluidet, hvilket benyttes i formelverk og oppslagsverk i termodynamikken. Statisk trykk finnes ved å måle absolutt trykk parallelt med en fluidstrøm i et system.

DYNAMISK TRYKK representerer trykkøkningen når et fluid i bevegelse stoppes eller hindres for videre bevegelse. Dynamisk trykk, alternativt hastighetstrykk, er i Bernoullis ligning definert som:

$$P_d = \frac{\rho \cdot u^2}{2} \quad (3.4)$$

Hvor:

P_d	=	Dynamisk trykk [Pa]
ρ	=	Luftens densitet [kg/m^3]
u	=	Luftens middelhastighet [m/s]

TOTALTRYKK er summen av det statiske, dynamiske og eventuelt det hydrostatiske trykket i et system. Totaltrykket kan finnes ved å måle trykket på en liten flate, som står vinkelrett på fluidstrømmen i et system.

ABSOLUTT TRYKK er det faktiske trykket i en gitt posisjon, og måles relativt til absolutt vakuum. Trykket fremkommer av bombardementet av fluidmolekyl. Absolutt trykk er uttrykt ved den ideelle gassloven:

$$P = \frac{\rho \cdot R \cdot T}{m_g} \quad (3.5)$$

Hvor

P	=	Absolutt trykk [Pa]
ρ	=	Luftens densitet [kg/m^3]
R	=	Gasskonstant [$8,314 \text{ J}/\text{mol} \cdot \text{K}$]
T	=	Absolutt temperatur [K]
m_g	=	Molmasse [kg/mol]

ATMOSFÆRISK TRYKK er begrepet om det absolutte trykket ved havets overflate, som varierer med klimaendringer og høyden over havet. Det atmosfæriske trykket er gjennom internasjonal enighet fastsatt til 101325 Pa.

GAGE TRYKK uttrykker forskjellen mellom absolutt trykk og det lokale atmosfæriske trykket. Det absolutte trykket finnes følgelig ved å legge til det lokale atmosfæriske trykket. Sammenhengen mellom begrepene er vist i formel 3.6 og 3.7.

$$P_{\text{gage}} = P_{\text{abs}} - P_{\text{atm}} \quad (3.6)$$

$$P_{\text{vak}} = P_{\text{atm}} - P_{\text{abs}} \quad (3.7)$$

Hvor:	P_{gage}	= Gage trykk	[Pa]
	P_{abs}	= Absolutt trykk	[Pa]
	P_{atm}	= Atmosfærisk trykk	[Pa]
	P_{vak}	= Trykk ved vakuum	[Pa]

TRYKKTAP OVER KOMPONENTER I SYSTEMET – STØTTAP.

For ikke å skape grunnlag for forvirring, velges det her å konkretisere et meget sentralt begrep i oppgaven. I norsk strømningslære benyttes begrepet støttapskoeffisient om trykktapet gitt av støttapet over enkeltmotstander i et rørsystem (Ingebrigtsen, 2015). Vann- og avløpstekniske fag benytter på sin side begrepet singulærtapskoeffisient, om strømningslærens begrep, støttapskoeffisient (Ødegaard, red., 2013). I dette prosjektet omhandles strømningssteknikk, følgelig velges det å benytte begrepet støttapskoeffisient gjennomgående.

3.2. DRIVKREFTER

Drivkrefter for luftstrømning i en luftespalte er lufttrykkforskjeller mellom innløp og utløp. Lufttrykkforskjeller forekommer ved vind og ved variasjoner i luftens densitet, som er avhengig av luftens temperatur og fuktinnhold. Under vindstille perioder er termisk oppdrift drivkraften for luftstrømningen i spalten. Enkelte innlandsstrøk i Norge har en større andel «vindstille timer» enn kyststrøk, hvor en er avhengig naturlig konveksjon for gjennomlufting av skrå tretak.

3.2.1. TERMISK OPPDRIFT

Ved vindstille perioder vil termisk oppdrift være potensiell drivkraft. Termisk oppdrift skyldes densitetsforskjeller i luften. Luftens tørre densitet kan beregnes tilnærmet etter formel 3.8 (Hansen, red., 2013).

$$\rho = 0,0034837 \cdot \frac{P}{T} \quad (3.8)$$

Hvor: P = Standard atmosfærisk trykk [101325 Pa]
 T = Absolutt temperatur [K]

Luftens densitet avtar ved økt fuktinnhold og ved økt temperatur, og kan beregnes tilnærmet etter formel 3.9. Dersom en sammenligner formel 3.8 og 3.9, ser en at fuktig luft, ved samme trykk og temperatur, alltid er lettere enn tørr luft (Hansen, red., 2013).

$$\rho = 0,0034837 \cdot \frac{P}{T} - 0,0013169 \cdot \frac{p_d}{T} \quad (3.9)$$

Hvor: P = Standard atmosfærisk trykk [101325 Pa]
 p_d = Vanndampens partialtrykk [Pa]
 T = Absolutt temperatur [K]

Det bemerkes at fuktinnholdet kun vil dominere potensialet for termiske oppdriftskrefter i tilfeller med betydelig fukttransport fra omgivelsene. Dette er tilfeller hvor fuktinnholdet i spalten er høyere enn i uteluften (Falk, 2010). Et eksempel på et slikt tilfelle er situasjoner hvor takflaten underkjøles i betydelig størrelsesorden, og kondens forekommer i luftespalten. Normalt vil densitetsforskjeller gitt av temperaturforskjeller utgjøre majoriteten av lufttrykkforskjellen for termisk oppdrift. Luftens densitet varierer med luftespaltens lengde i takplanet. Drivtrykket ΔP_t fra spaltens innløp til utløp, finnes ved å benytte formel 3.10 (Blom, 1990).

$$\Delta P_t = \rho_e \cdot g \cdot H - g \cdot \int_{\text{innløp}}^{\text{utløp}} \rho_g(h) \cdot dh \quad (3.10)$$

Hvor: ΔP_t = Drivtrykket for luftstrømning i luftespalten [Pa]
 ρ_e = Uteluftens densitet [kg/m^3]
 g = Tyngdeakselerasjonen, [$9,81 \text{ m}^2/\text{s}$]
 H = Total høydeforskjell mellom innløp og utløp [m]
 ρ_g = Kanalluftens lokale densitet i aktuell høyde [kg/m^3]

3.2.2. VINDTRYKK

Luftstrømning ved tvungen konveksjon er avhengig av geografisk plassering, og drivtrykk gitt av vindbelastning på bygningen. Vindhastigheten fluktuerer kraftig med tiden, og påvirkes av høyden over marken, samt terrengets ruhet. Omkringliggende bygninger og skjerming i form av vegetasjon, er også en essensiell parameter i beregning av vindtrykk på bygninger.

Drivtrykket er avhengig av forskjellen mellom statisk trykk ved innløp og utløp. Det statiske trykket på taket kan beregnes når trykkoeffisientene til respektive tak er beregnet.

Koeffisientene kan måles, eller beregnet etter metodikk gitt i blant annet NS-EN 1991-1-4.

Målinger ved metrologisk institutt foretas i en høyde 10 meter over terrenget, og i et åpent landskap (Meteorologisk institutt). For å beregne vindhastighet i en annen høyde eller ved annerledes terreng, enn ved målestasjonen, kan følgende uttrykk benyttes (Hagentoft, 2001). Tilhørende parametre er å finne i tabell 3.2.1.

$$U_z = U_m \cdot k \cdot z^a \quad (3.11)$$

Hvor: U_z = Vindhastighet i høyden z [m]
 U_m = Vindhastighet målt i referansehøyden, 10m [m/s]
 k, a = Terrengekoeffisienter i henhold til tabell 3.2.1 [-]

Tabell 3.2.1. Koeffisienter for beregning av vindhastighet (Hagentoft, 2001).

Terrengbeskrivelse	k	a
Åpent, plant terreng	0,68	0,17
Åpent terreng med små hindre	0,52	0,20
Småbebyggelse	0,35	0,25
Bykjerner	0,21	0,33

Drivtrykket for luftstrømningen i luftspalten fra vindtrykk ΔP_{vind} , defineres som forskjell i statisk trykk mellom spaltens innløp og utløp (Blom, 1990):

$$\Delta P_{\text{vind}} = P_{\text{si}} - P_{\text{su}} \quad (3.12)$$

Hvor: ΔP_{vind} = Drivtrykk for luftstrømning i en luftspalte [Pa]
 ΔP_{si} = Statisk lufttrykk [Pa], spaltens innløp (raft, lo side)
 ΔP_{su} = Statisk lufttrykk [Pa], spaltens utløp (møne eller raft le side)

Ved vindbelastning mot en bygning, brytes vinden ved bygningens lo side, som resulterer i et statisk overtrykk. Når vinden brer seg langs bygningen resterende sider, opplever fasadene et statisk over- og undertrykk, som resulterer til det omgivende atmosfæriske trykket. For å beskrive trykkfordelingen på en fasade benyttes formfaktoren C_p , som er definert slik (Falk, 2010):

$$C_p = \frac{P - P_{ref}}{\frac{\rho \cdot u_{ref}^2}{2}} \quad (3.13)$$

Hvor:

- C_p = Formfaktor [-]
- P = Lokalt statisk trykk mot fasaden [Pa]
- P_{ref} = Statisk trykk i den frie luftstrømmen i referansehøyden [Pa]
- ρ = Luftens densitet [kg/m^3]
- u_{ref} = Vindhastighet i en referansehøyde [m/s]

Formfaktoren er avhengig av vindens retning på en fasade, byggets geometri og topografi, samt tilliggende bebyggelse. Det statiske over- og undertrykket som virker på en respektiv fasade, i et gitt punkt, beregnes i henhold til formel 3.14. Det siste leddet i formel 3.14 kjennetegnes som stagningstrykk (Falk, 2010).

$$P = P_{ref} + C_p \cdot \frac{\rho \cdot u_{ref}^2}{2} \quad (3.14)$$

Variasjon i formfaktoren vil sammen med vind mot en bygning skape trykkforskjeller mellom ulike punkter på en fasade. Ved kjente formfaktorer for spaltens innløp $C_{p,i}$ og ved spaltens utløp $C_{p,u}$, kan trykkforskjellen beregnes etter formel 3.15 (Falk, 2010).

$$\Delta P = (C_{p,i} - C_{p,u}) \cdot \frac{\rho \cdot u_{ref}^2}{2} \quad (3.15)$$

Hvor:

- ΔP = Trykkforskjell over luftespalten [Pa]
- $C_{p,i}$ = Formfaktor ved raft [-]
- $C_{p,u}$ = Formfaktor ved møne [-]

3.3. FYSISKE BETRAKTNINGER

3.3.1. KONTINUITETSLIGNINGEN

Når en væskestrøm strømmer gjennom et rør uten forgreininger, vil like mye væske passere ethvert tverrsnitt i røret per tidsenhet. Denne bevaringsloven kalles kontinuitetsligningen. For en stasjonær strøm med inkompressibelt fluid, vil fluidstrømmen være den samme for ethvert tverrsnitt. Kontinuitetsligningen brukes som regel for volumstrøm, og skrives på formen (Blom, 1990):

$$A_1 \cdot u_1 = A_2 \cdot u_2 \quad (3.16)$$

Hvor: A_1, A_2 = Vilkårlige tverrsnitt [m^2]
 u_1, u_2 = Gjennomsnittlig lufthastighet [m/s]

3.3.2. ENERGILIGNINGEN

Energiligningen beskriver den totale mekaniske energien i et punkt i strømmingen. For et vilkårlig punkt i volumet V , i fluidet med massen m , gjelder sammenhengen med at den totale mekaniske energi er (Hansen, red., 2013):

$$E = P_s \cdot V + \frac{m \cdot u^2}{2} + m \cdot g \cdot h \quad (3.17)$$

Hvor: E = Energi [J]
 P_s = Statisk trykk [Pa]
 V = Volum [m^3]
 m = Masse [kg]
 u = Lufthastighet [m/s]
 g = Tyngdeakselerasjonen, [9,81 m^2/s]
 h = Høyde [m]

Divideres formel 3.18 med volumets masse og multipliseres med densitet, fås uttrykket:

$$e \cdot \rho = \frac{\rho \cdot u^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h \quad (3.18)$$

Hvor: e = Spesifikk energi [J/kg]
 ρ = Luftens densitet [kg/m^3]

I en ideal strømming, hvor energien ikke tapes, er den spesifikke energien i et hvert punkt i fluidet den samme. For en slik strømming gjelder Bernoullis ligning (Hansen, red., 2013):

$$P_s + P_d + \rho \cdot g \cdot h = \text{konstant} \quad (3.19)$$

Hvor: P_s = Statisk trykk [Pa]
 P_d = Dynamisk trykk [Pa]

3.3.3. ENERGILIGNINGEN UTTRYKT VED BERNOULLIS LIGNING

Bernoullis ligning beskriver sammenhengen mellom trykk, hastighet og høyde langs en strømningslinje, under forutsetningene om stasjonær, tapsfri og inkompressibel strømning (Falk, 2010). Formel 3.20 uttrykker energien som konserveres i systemet som betraktes, hvorav leddet $(\rho \cdot u^2)/2$ representerer det dynamiske trykket, eventuelt hastighetstrykket. Høydestrykket er representert i formelen ved leddet $(\rho \cdot g \cdot z)$.

$$P_s + \frac{\rho \cdot u^2}{2} + \rho \cdot g \cdot z = \text{konstant} \quad (3.20)$$

Hvor:	P_s	= Statisk trykk [Pa]
	ρ	= Luftens densitet [kg/m^3]
	u	= Lufthastighet [m/s]
	g	= Tyngdeakselerasjonen, [9,81 m^2/s^2]
	z	= Høyden over referanseplanet [m]

3.4. STRØMNINGSTEKNISK GRUNNLAG

3.4.1. HYDRAULISK DIAMETER

Formler og sammenhenger i fluidmekanikken er primært relatert til strømning i sirkulære rør og tverrsnittsformer. Ved å innføre begrepet hydraulisk diameter, muliggjøres beregning av fluidstrømning i rektangulære tverrsnittsformer. Hydraulisk diameter er definert som (Cengel et al., 2012):

$$d_h = \frac{4 \cdot A}{R} = \frac{4 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}}{\pi \cdot d} = \frac{4 \cdot a \cdot b}{2 \cdot (a + b)} = \frac{2 \cdot a \cdot b}{a + b} \quad (3.21)$$

Hvor:	d_h	= Hydraulisk diameter [m]
	A	= Seksjonens tverrsnittsareal [m ²]
	R	= Seksjonens perimeter [m]
	d	= Diameter [m]
	a	= Spaltens bredde [m]
	b	= Spaltens høyde [m]

For parallelle plan, med en innbyrdes avstand b , gjelder uttrykket gitt i formel 3.22. Dette gjelder så fremt planenes bredde er betydelig større enn avstanden mellom planene (Kronvall, 1980).

$$d_h = 2 \cdot b \quad (3.22)$$

Hvor:	b	= Spaltens høyde [m]
-------	-----	----------------------

3.4.2. ABSOLUTT OG RELATIV RUHET

Ved beregning av friksjonsfaktoren i et system, er en avhengig av parameteren relativ ruhet. Relativ ruhet er definert som forholdet mellom absolutt ruhet, og den hydrauliske diameteren for aktuelt tverrsnitt (Cengel et al., 2012):

$$\text{Relativ ruhet} = \frac{\varepsilon}{d_h} \quad (3.23)$$

Hvor:	ε	= Absolutt ruhet [mm]
	d_h	= Hydraulisk diameter [m]

3.4.3. REYNOLDS TALL

Et sentralt begrep innen fluidmekanikk er Reynolds tall. Reynolds tall avgjør om strømmingstilstanden i et rør eller en spalte er laminær, turbulent eller i en overgangsfase mellom tilstandene. Reynolds tall kan beregnes ved å benytte formel 3.24 (Hansen, red., 2013).

$$Re = \frac{u_m \cdot d_h \cdot \rho}{\eta} = \frac{u_m \cdot d_h}{\nu} \quad (3.24)$$

Hvor:	Re	= Reynolds tall [-]
	u_m	= Luftens middelhastighet [m/s]
	d_h	= Hydraulisk diameter [m]
	η	= Luftens dynamiske viskositet [Ns/m ²]
	ρ	= Luftens densitet [kg/m ³]
	ν	= Luftens kinematiske viskositet [m ² /s]

3.4.4. KRITISK REYNOLDS TALL

Strømningsmotstanden til et fluid avhenger av systemets overflateruhet, vibrasjoner og pulseringer i strømmingen. For praktiske sammenhenger er følgende grenser for de ulike tilstandene definert (Cengel et al., 2012):

$Re \leq 2300$	- Laminær strømming
$2300 \leq Re \leq 4000$	- Overgangssone
$Re \geq 4000$	- Turbulent strømming

Det bemerkes at typisk Reynolds tall ved overgang til turbulent strømming varierer mellom ulike oppslagsverk. Danvak benytter på sin side Reynolds tall lik 3200, som grensesjiktet hvor strømmingen går over til turbulent. Dette er gitt at det ikke er store forstyrrelser i strømmingen, eksempelvis tverrsnittsutvidelser eller reduksjoner (Hansen, red., 2013).

3.4.5. INNLØPSLENGDE

Luften som strømmer fra bygningens fasade og inn i spaltens innløp vil få et hastighetsprofil som er tilnærmet jevn med spaltens sider, slik som illustrert i figur 3.5.2. I en gitt avstand etter spaltens innløp, vil luften oppnå et fullt utviklet hastighetsprofil. Innløpslengden, som er definert fra spaltens innløp til fullt utviklet hastighetsprofil – laminær strømming, er definert slik (Falk, 2010):

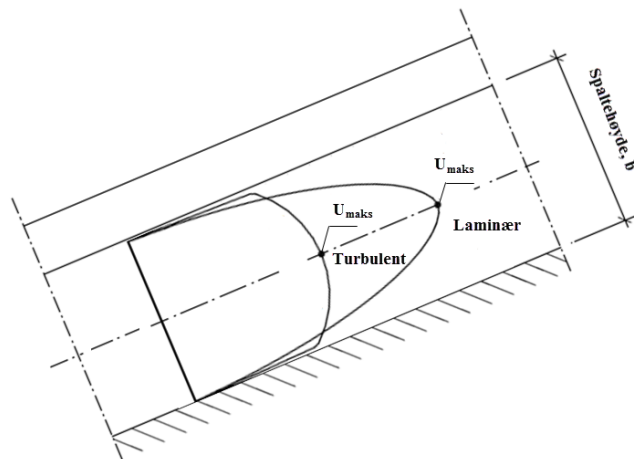
$$L_x = b \cdot \frac{Re_b}{50} \quad (3.25)$$

Hvor:	L_x	= Innløpslengde [m]
	Re_b	= Reynolds tall, bestemt med d_h satt til b [-]
	b	= Spaltens høyde [m]

3.5. STRØMNING I RØR OG KANALER

3.5.1. STRØMNINGSKARAKTERISTIKK

I en luftspalte kan det forekomme ulike strømningstyper, avhengig av lufthastigheten i spalten, samt spaltens utforming. Det skilles mellom laminær og turbulent strømning, samt overgangsområdet mellom de ulike strømningstypene. Laminær strømning karakteriseres ved at fluidet beveger seg rolig uten hurtige pulseringer, og uten endring av retning og hastighet. Turbulent strømning karakteriseres på sin side ved hurtig variasjoner i hastighet og retning. Hastighetsprofilene til strømningstypene er vist i figur 3.5.1 (Falk, 2010).

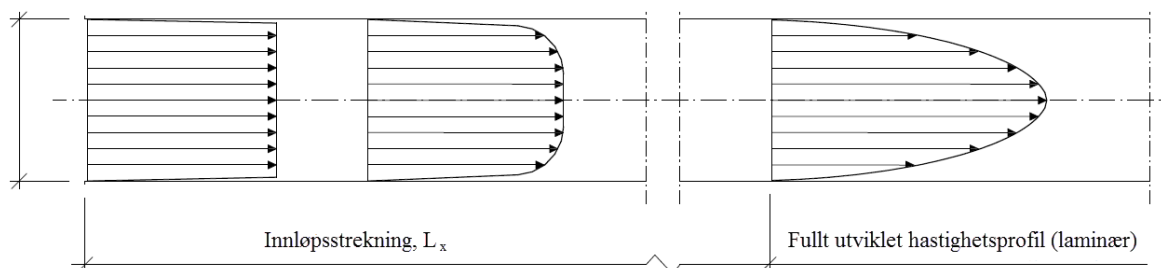


Figur 2.5.1. Hastighetsprofiler for strømningstypene (Falk, 2010).
Bearbeidet av Espen Hansen 2016.

Karakterisering av de ulike strømningstypene, er av betydning for formelverk relatert til blant annet beregning av friksjonsfaktor for systemet som vurderes. Følgelig vil bestemmelse av type strømning og overgangssone være av interesse i denne sammenheng.

3.5.2. OVERGANGSSONE

Overgangen mellom turbulent og laminær strømning kalles overgangssone, og karakteriseres ved kritisk Reynolds tall (Blom, 1990). Innløpsstrekningen omfatter strekningen fra innløpet, til det punktet i luftespalten hvor fluidstrømmen går over til laminær strømning. Innløpsstrekningen er vist i figur 3.5.2 (Falk, 2010).



Figur 3.5.2. Innløpsstrekning (Falk, 2010). Bearbeidet av Espen Hansen 2016.

3.6. TRYKKTAP

3.6.1. FRIKSJON

Når luft strømmer gjennom en kanal, vil friksjon mellom luften og spaltens omsluttende flater medføre ett trykktap. Beregning av det totale trykktapet forårsaket av friksjon i en luftespalte, kan utføres ved å benytte formel 3.26 (Falk, 2010).

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{l}{d_h} \cdot \frac{\rho \cdot u_m^2}{2} \quad (3.26)$$

Hvor:

ΔP	=
λ	= Friksjonsfaktor [-]
l	= Luftespaltens lengde [m]
d_h	= Hydraulisk diameter [m]
ρ	= Fluidets densitet [kg/m ³]
u_m	= Fluidets middelhastighet etter innløp og før utløp [m/s]

Beregningen av trykktap ved friksjon følger samme fremgang som for generelle støttap, men betinger støttapskoeffisienten for selve friksjonstapet. Denne kan beregnes ved å benytte formel 3.27 (Falk, 2010).

$$\xi_{\text{friksjon}} = \lambda \cdot \frac{l}{d_h} \quad (3.27)$$

Hvor: ξ = Støttapskoeffisient for friksjonstapet[-]

Ved laminær strømning vil friksjonsfaktoren domineres av spalteveggens ruhet. Friksjonsfaktoren ved laminær strømning kan beregnes tilnærmet for rektangulære tverrsnittsformer, med sidekanter a og høyde b etter formel 2.28 (Falk, 2010).

$$\lambda = \frac{64}{\left[\frac{2}{3} + \frac{11}{24} \cdot \frac{b}{a} \cdot \left(2 - \frac{b}{a} \right) \right] \cdot \text{Re}} \quad (3.28)$$

Hvor:

λ	= Friksjonsfaktor [-]
Re	= Reynolds tall ved laminær strømning [-]
b	= Spaltens høyde [m]
a	= Spaltens bredde [m]

Ved turbulent strømning $\text{Re} > 4000$, kan beregning av friksjonsfaktoren i spalten foretas i henhold til formel 2.29 (Falk, 2010).

$$\lambda = \left[2 \cdot \log \left(\frac{-4,793}{\text{Re}} \cdot \log \left(\frac{10}{\text{Re}} + 0,2 \cdot \frac{\varepsilon}{d_h} \right) + 0,2698 \cdot \frac{\varepsilon}{d_h} \right) \right]^{-2} \quad (3.29)$$

Hvor:

ε	= Absolutt ruhet [mm]
d_h	= Hydraulisk diameter [m]

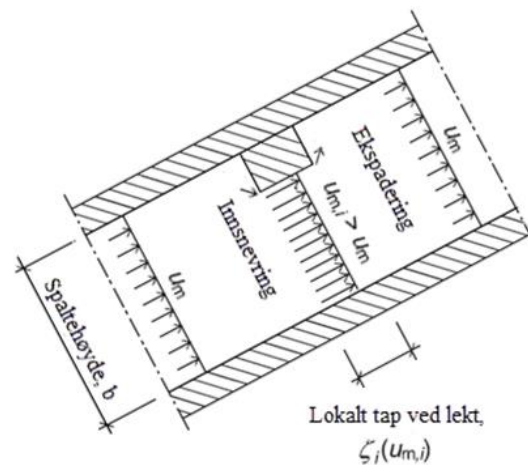
Fluidets hastighetsprofil og strømningskarakteristikk vil variere over innløpsstrekningen, som medfører at friksjonsfaktoren for systemet varierer. I tilfeller hvor strømningskarakteristikken over innløpsstrekningen er turbulent, vil den midlere friksjonsfaktoren være nærmere den for fullt utviklet turbulent strømning (Falk, 2010). Ved forutsetningen om laminær strømningskarakteristikk over innløpsstrekningen, kan en midlere friksjonsfaktor for strekningen beregnes etter formel 3.30 (Falk, 2010).

$$\lambda_{L_x} \approx 1,6 \cdot \lambda \quad (3.30)$$

Hvor: λ_{L_x} = Midlet friksjonsfaktor for innløpsstrekningen [-]
 λ = Friksjonsfaktor ved fullt utviklet laminær strømning [-]

3.6.2. TRYKKTAP OVER KOMPONENTER I ET SYSTEM

I strømningsmeknikken omtales trykktapet grunnet støt eller enkeltmostander i et system, som støttap. I dette prosjektet vil støttap forekomme ved luftespaltens innløp, utløp samt over steinlekker, slik illustrert i figur 3.6.1. Støttapet over en komponent i en luftespalte, slik som raftekassen, er til dels sammensatt. I første omgang vil luften strømme fra et fritt volum gjennom spalteåpningene i raftekassen, gjennom fluenetting og opp mot selve luftespalten. Støttapskoeffisienten for raftekassen er således sammensatt av flere komponenter, eksempelvis trykktap ved strømning gjennom hull, spalter og innsnevring/ekspansjon av luftvolumet. Ettersom det ikke finnes analytiske eller empiriske formler for beregning av slike støttapskoeffisienter per dags dato, må slike måles i praksis, eventuelt beregnes i mer omfattende programvarer, slik som COMSOL.



Figur 3.6.1. Støttap over komponenter i systemet (Falk, 2010). Bearbeidet av Espen Hansen 2016.

Det bemerkes at det for beregning av støttapskoeffisient for raft, skal benyttes middelhastighet etter innløpet, samt før utløpet for beregning av støttapskoeffisienter for møneløsninger. For beregning av trykktap relatert til steinlekker, skal lufthastighet ved minste tverrsnitt benyttes, slik illustrert i figur 3.6.1.

Trykktap over luftespaltens ulike komponenter kan beregnes ved å benytte formel 3.31 (Kronvall, 1980). Trykktapene for spaltens ulike komponenter, blir slik vist i formel 3.31 et resultat av det dynamiske trykket, og støttapskoeffisientene for aktuelle komponenter.

$$\Delta P = \xi \cdot \frac{\rho \cdot u_m^2}{2} \quad (3.31)$$

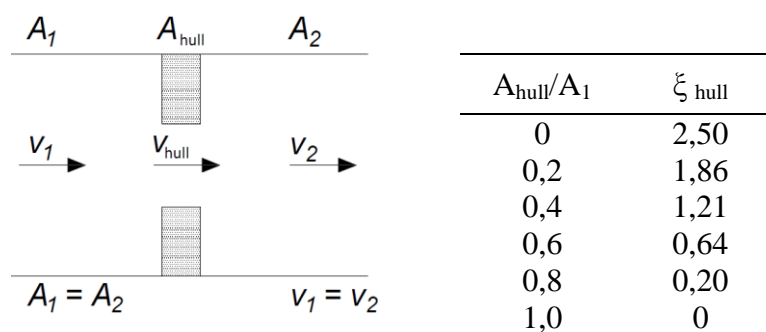
Hvor: ΔP = Trykktap [Pa]
 ξ = Støttapskoeffisient [Pa]
 ρ = Luftens densitet [kg/m^3]
 u_m = Luftens middelhastighet [m/s]

I bygg-sammenheng eksisterer det per dags dato begrenset mengde data, som omhandler støttapskoeffisienter for ulike komponenter i en luftespalte i et skrått tretak. Dataen som per dags dato eksisterer, er et resultat av ulike studier utført i (Blom, 1990) og (Hofseth, 2005). I praksis må trykktapet over ulike komponenter i et skrått tretak måles ved ønskede lufthastigheter i luftespalten, for deretter å beregne støttapskoeffisientene. Parametere som må måles i et laboratorium, blir følgelig temperatur, lufthastighet i luftespalten ved riktige plasseringer og for riktige tverrsnittstørrelser, samt selve trykktapet.

3.6.3. TRYKKTAP OVER ET PERFORERT AREAL

I Norge benyttes av tradisjon fluenetting i raftekasser. Dette for å hindre inndriv av insekter og smuss, som kan tette luftespalten. Fluenettingen utgjør i seg selv en trykkmotstand, hvor trykktapet er knyttet forholdet mellom effektivt areal, og det perforerte arealet. En beregningsmetode er gitt i (Falk, 2010), med henvisning til (Sørensen, red., 2004), hvor situasjonen sammenlignes med trykktapet knyttet til strupeskiver i en rørkanal. Slik figur 3.6.2 viser, kan støttapskoeffisienten for en fluenetting med en perforeringsgrad lik 60 %, eventuelt $A_{\text{hull}}/A_1 = 0,6$, avleses lik 0,64 [-].

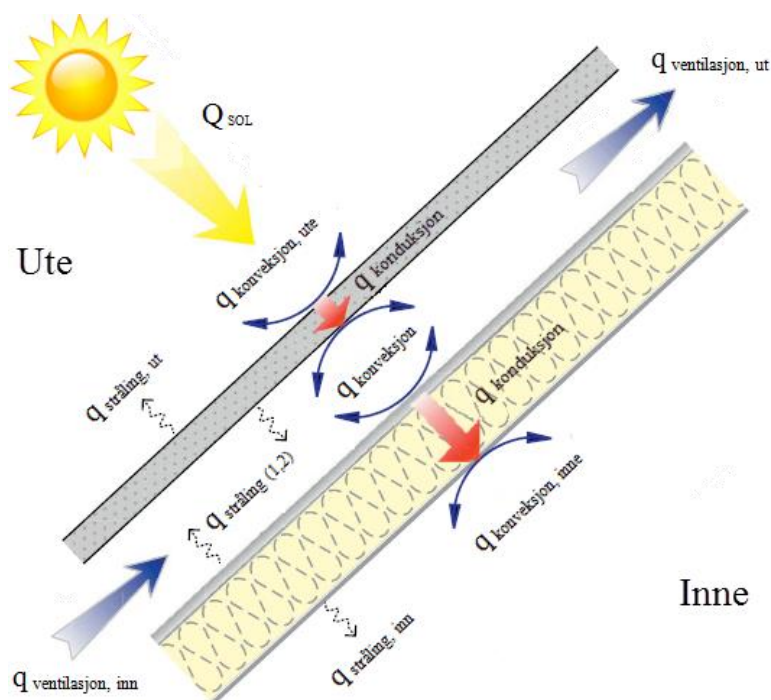
Figur 3.6.2. Støttap for skarpkantet strupeskive (Falk, 2010) med henvisning til (Sørensen, red., 2004).



4. FYSIKALSK GRUNNLAG

4.1. VARMEOVERFØRINGSMEKANISMER I LUFTESPALTEN

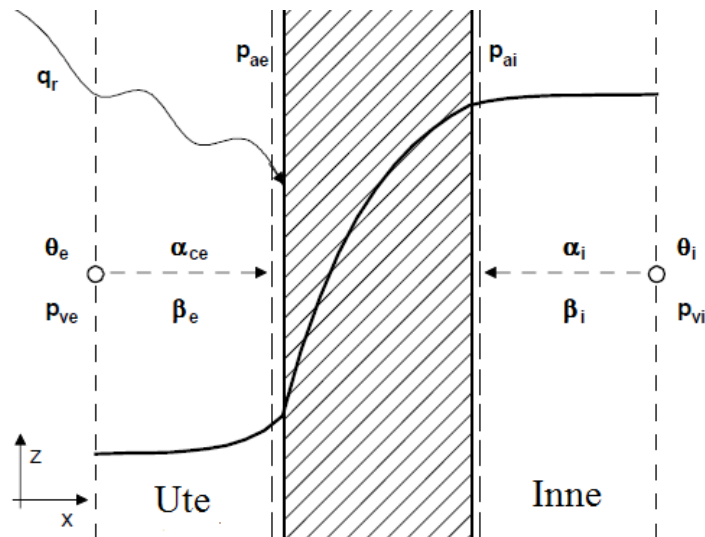
Luftespaltens fukt- og varmeoverføringsmekanismer er en funksjon av både spalteutforming, klima, og de tilgrensende overflaters materialegenskaper. Klimatiske påvirkninger er ansett av størst betydning vedrørende fukt og temperaturforhold i luftespalten. Sekundært, er luftespaltens utforming og materialegenskaper essensielt for spaltens evne til å ventilere bort eventuelle varme- og fukttilskudd. Desto mindre varmekapasitet for taktekingen, jo hurtigere temperaturendringer vil oppleves i luftespalten. Tilsvarende prinsipp gjelder for fuktlagring i takplanet, hvor undertakets fuktlagringsevne, og kondensopptaksevne er avgjørende parametere for fuktlagring og eventuell kondensutfelling. Mekanismene som utgjør potensialet for varme- og fukttransport, kan som i (Blom, 1990), (Lee, m.fl., 2008) og (Janssens, 1998), visualiseres gjennom henholdsvis figur 4.1.1 og 4.1.2.



Figur 4.1.1. Mekanismer for varmeoverføring i en luftespalte for et skrått tretak (Lee m.fl., 2008). Bearbeidet av Espen Hansen 2016.

Figur 4.1.1 viser et generelt oppsett av varmeoverføringsmekanismene for et skrått tretak. Varmeoverføringen i luftespalten skjer ved konduksjon gjennom taktekingen eller undertaket, langbølget strålingsutveksling mellom undertaket og taktroa, og konveksjon i luftespalten. Videre er strålingsbidraget fra både kortbølget og langbølget solstråling av stor betydning for konduksjon gjennom taktekingen, og dets størrelsesorden. Langbølget strålingsutveksling fra taktekingen mot atmosfæren, er betegnet $q_{\text{stråling, ut}}$, i figur 4.1.1. Luftespalten utgjør takets ventilasjonsevne, som i figur 4.1.1 er betegnet $q_{\text{ventilasjon}}$. Ventilasjonen har subindekser inn og ut, ettersom det må skilles mellom tilskudd og ventilering av varme og fukt i luftespalten. Varmeoverføringsmekanismer for innvendig side, er slik betegnet i figur 4.1.1, sammensatt av stråling, konduksjon og konveksjon. For å kunne regne på nevnt fysikk er en avhengig av å sette opp en energibalanse for luftespalten. I tillegg til konduksjon gjennom luftespaltens omsluttende flater, henholdsvis

takro og undertak, er stråling og konveksjon viktige bidrag. Strålingsbidraget er primært dominert av tilskudd fra solstråling, mens langbølget strålingsutveksling mot atmosfæren utgjør et viktig sekundært bidrag. Beregningsmessig håndtering av varmetilskuddet fra sol, og strålingsutveksling mot atmosfæren, er i tillegg til å være utfordrende, svært tidskrevende. I neste rekke er fuktlagring og varmelagring for de ulike sjiktene en utfordring, ettersom materialparametere varierer med henholdsvis relativ luftfuktighet og temperatur. Det er derfor hensiktsmessig å benytte anerkjente beregningsverktøy, for heller eksportere ut data, ment for en videre analyse. I en videre analyse er konvektiv varme- og fukttransport av interesse, hvor grunnlaget omtales i det følgende.



Figur 4.1.2. Mekanismer for varme- og fuktoverføring for overflater (Janssens, 1998).

Figur 4.1.2 viser prinsipielle mekanismer for varme- og fuktoverføring for overflater. Varmeovergangsmotstanden for en overflate er satt sammen av både et bidrag fra stråling og konveksjon. Dersom varmeoverføring ved konveksjon skal beregnes, er en avhengig av å besitte informasjon om den konvektive varmeoverføringskoeffisientens størrelsesorden. Videre betinger beregning av konvektiv fuktoverføring, kjennskap til den konvektive fuktoverføringskoeffisientens størrelse. I denne oppgaven rettes fokuset videre mot konvektiv fukt- og varmeoverføring i luftespalten. Videre omtales langbølget strålingsutveksling mot atmosfæren, hvor underkjøling og kondensutfelling i luftespalten er av interesse.

4.2. KONVEKTIV VARMETRANSPORT I LUFTESPALTEN

Varmeoverføring ved konveksjon beskriver prinsippet om at luften transporterer varme. Det finnes to typer konveksjon, som omtales naturlig- eller tvungen konveksjon. Naturlig konveksjon forårsakes som nevnt tidligere av densitetsforskjeller i lufta, gitt av temperaturforskjeller mellom punktene som analyseres (Hagentoft, 2001). Tvungen konveksjon forårsakes eksempelvis av vind eller vifter. Varmeoverføring ved konveksjon beregnes slik vist i formel 4.1.

$$q_c = \alpha_c \cdot (T_s - T_a) \quad (4.1)$$

Hvor:

q_c	=	Varmetransport ved konveksjon [W/m ²]
α_c	=	Konvektiv varmeoverføringskoeffisient [W/m ² K]
T_s	=	Overflatens temperatur [K]
T_a	=	Omgivende lufttemperatur [K]

Det finnes et flertall empiriske formler for varmeoverføringskoeffisienter, hvorav det skilles mellom utvendige og innvendige overflater. En bør merke seg at majoriteten av empiriske formler for varmeoverføringskoeffisienter relaterer seg til den totale varmeoverføringskoeffisienten. Varmeoverføringskoeffisienten er som sagt sammensatt av to bidrag, ett fra stråling, og ett fra konveksjon. I denne oppgaven er konveksjonsbidraget av interesse, og omhandles ytterligere i det følgende. Varmeoverføringskoeffisienten, kan som i (Hagentoft, 2001) sammenfattes slik vist i formel 4.2.

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_r \quad (4.2)$$

Hvor:

α	=	Varmeoverføringskoeffisient [W/m ² K]
α_c	=	Konvektiv varmeoverføringskoeffisient [W/m ² K]
α_r	=	Koeffisient for strålingsutveksling [W/m ² K]

Varmeoverføringen ved konveksjon langs en luftespalte i et skrått tretak vil variere, ettersom strømningsforholdene og temperaturen varierer langs takplanet (Hansen, red., 2013). Fra strømningsmekanikken kan en finne et flertalls empiriske relasjoner og formler, for varmeoverføringskoeffisienter i rør og kanaler. Formlene antas gyldig for en luftespalte, så fremt hydraulisk diameter benyttes. Empiriske formler for varmeoverføringskoeffisienter er basert på en utledning som inkluderer Grashofs-, Prandtls-, Nusselts-, Reynolds-, og Fouriers tall (Hansen, red., 2013). Resultatet av utledningen uttrykker varmeoverføringskoeffisienten gjennom Nusselts tall, hvilket vises i formel 4.3. (Hansen, red., 2013).

$$Nu = \frac{\alpha_c \cdot l}{\lambda} \quad (4.3)$$

Hvor:

Nu	=	Nusselts tall [-]
α_c	=	Varmeoverføringskoeffisient [W/m ² K]
l	=	Spaltens lengde [m]
λ	=	Luftens varmekonduktivitet [W/(mK)]

Falk og Sandin (2013) trekker frem flere empiriske formler for varmeoverføringskoeffisienter, som er aktuelle i bygg-sammenheng. En av formlene gjelder for spalter, slik vist i formel 4.4. Det bemerkes at denne gjelder for tvungen laminær strømning i rør. Lignende empiriske formler er også gitt i (Hansen, red., 2013) og benyttes blant annet i (Blom, 1990). Formelen er grunnet forutsetningen om laminær strømning, kun gyldig for Reynolds tall mindre enn 2300.

$$\alpha_c = 3,66 \cdot \frac{0,104 \cdot \text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \left(\frac{d_h}{l} \right)}{1 + 0,016 \cdot \left(\text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \left(\frac{d_h}{l} \right) \right)^{0,8}} \quad (4.4)$$

Hvor:

- α_c = Konvektiv varmeoverføringskoeffisient [W/m²K]
- Re = Reynolds tall [-]
- Pr = Prandtls tall [-]
- d_h = Spaltens hydrauliske diameter [m]
- l = Spaltens lengde [m]

Varmeoverføringskoeffisienten vil som sagt variere med strømningsform, temperatur, og er videre sammensatt av de omsluttende flatenes geometriske faktorer. For strømning i rør og kanaler, kan størrelsesorden for den konvektive varmeoverføringskoeffisienten sammenfattes slik vist i tabell 4.2.1 (Hansen, red., 2013).

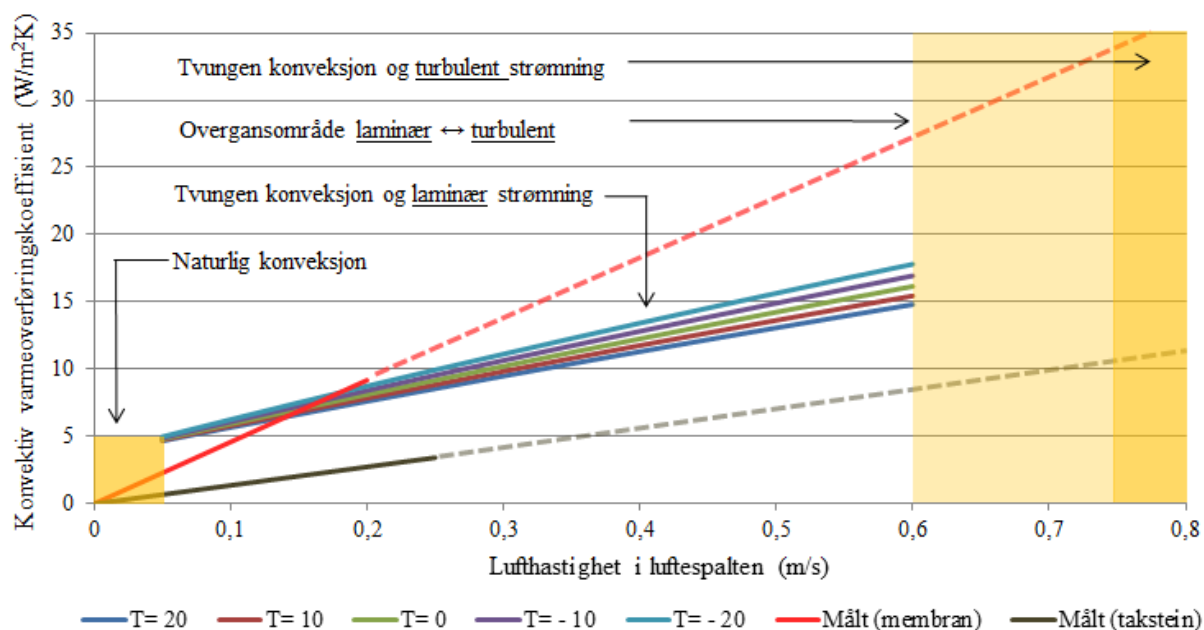
Tabell 4.2.1. Konvektiv varmeoverføringskoeffisient i rør, som funksjon av strømningsform (Hansen, red., 2013).

Strømningsform	α_c (W/m ² K)
Fri konveksjon	2 – 10
Laminær rørstrømning	2 – 25
Turbulent rørstrømning	10 – 50

Varmeoverføringskoeffisienten for uventilerte spalter skiller seg fra ventilerte spalter. Dette grunnet at den stillestående luftens konduktivitet får en innvirkning, spesielt for smale spalter (Hagentoft, 2001). Generelt kan en merke seg at varmeoverføringskoeffisienten for uventilerte, vertikale spalter, ligger i intervallet [0 – 2] (W/m²K), for spalter bredere enn 20 mm (Hagentoft, 2001).

Lufthastigheten i en luftespalte vil variere i takt med vindhastigheten ute, som medfører at varmeoverføringen i en luftespalte blir utfordrende å beregne. I enkelte tilfeller er det ønskelig å kunne beregne hvorvidt varmeoverføringen i spalten domineres av naturlig konveksjon, eller tvungen laminær-, eventuelt turbulent strømning. En fremgangsmåte for å bestemme dette er gitt i vedlegg 2.1. I WUFI foretas en forenkling vedrørende den konvektive varmeoverføringskoeffisienten i luftespalter, som er omtalt ytterligere i vedlegg 4.1.

For å gi et visuelt bilde på den konvekitive varmeoverføringskoeffisientens variasjonsområde, er det i denne sammenheng utarbeidet en illustrasjon. Figur 4.2.1 viser den konvekitive varmeoverføringskoeffisienten for en 48 mm høy og 552 mm bred luftespalte, i et skrått tretak med en lengde på fem meter. Nederst til venstre er området hvor naturlig konveksjon vil inntreffe markert, mens overgangsområdet mot det turbulente området er å finne til høyre i figur 4.2.1. I det laminære området, er den konvekitive varmeoverføringskoeffisienten beregnet ut fra formel 4.4, ved varierende temperaturer. I tillegg er resultatene fra et tidligere feltarbeid plottet inn. Feltarbeidet utført av Philipp Kölsch, gikk ut på å undersøke varmeoverføringskoeffisienten under henholdsvis takteking av takstein, og takteking av membran med taktro (personlig mail-korrespondanse, februar 2016). De stiplede linjene er ekstrapolert, ettersom resultatet fremgikk av lufthastigheter mindre enn henholdsvis 0,2 og 0,25 m/s.



Figur 3.2.1. Konvektiv varmeoverføringskoeffisient for en luftespalte og dets variasjonsområde.

4.3. KONVEKTIV FUKTTRANSPORT I LUFTESPALTEN

Analogt med konvektiv varmetransport ved konveksjon, har vi fukttransport ved konveksjon. Konvektiv fukttransport beskriver hvor mye fukt per tids- og arealenheter, som transporteres til en overflate, fra omgivende luft. I likhet med varmetransport representerer en negativ rate et tap, hvor det for konvektiv fukttransport transporteres fukt fra flaten til omgivende luft. Fukttransportraten, kan i henhold til (Hagentoft, 2001) og (Künzel, 1995), uttrykkes slik vist i formel 4.5. Dersom fukttransportraten ønskes å relateres til forskjell i vanndamptrykk (Pa), kan metodikk gitt i vedlegg 2.2, benyttes for å regne mellom enhetene (kg/(Pa·m²·s)) og (m/s).

$$g = \beta \cdot (v_a - v_s) \quad (4.5)$$

Hvor:

- g = Fukttransportrate [kg/m²s]
- β = Konvektiv fuktoverføringskoeffisient [m/s]
- v_a = Fuktinnhold i omgivende luft [kg/m³]
- v_s = Fuktinnhold for overflaten [kg/m³]

Likeledes som for varmetransport ved konveksjon, er fuktoverføringskoeffisienten, alternativt massetransportraten eller fukttransportkoeffisienten, av interesse ved beregning av konvektiv fukttransport. Den konvektive fuktoverføringskoeffisienten kan beregnes forenklet, slik gitt i blant annet (Hagentoft, 2001) og (Geving, 1997), ved å benytte formel 4.6.

$$\beta = \frac{\alpha_c}{\rho \cdot c_p} \quad (4.6)$$

Hvor:

- β = Konvektiv fuktoverføringskoeffisient [m/s]
- α_c = Konvektiv varmeoverføringskoeffisient [W/(m²·K)]
- ρ = Luftens densitet ved aktuell temperatur [kg/m³]
- c_p = Spesifikk varmekapasitet for luft/damp blanding [J/(kg·K)]

Formel 4.6 ekskluderer effekten av strømningsforhold, hvilket har betydning for koeffisientens størrelsesorden. Konvektive fuktoverføringskoeffisienter kan utledes fra den konvektive varmeoverføringskoeffisienten, gjennom analoge forhold (Künzel, 1995), med henvisning til (Illig, 1952). Fra Lewis formel for turbulent strømming gjelder sammenhengen gitt i formel 4.7 (WUFI, 2016a), med henvisning til (Illig, 1952).

$$\beta_{\text{turbulent}} = \frac{\alpha_c}{\rho \cdot c_p \cdot R \cdot T} \quad (4.7)$$

Hvor:

- $\beta_{\text{turb.}}$ = Fuktoverføringskoeffisient ved turbulent strømming [m/s]
- α_c = Konvektiv varmeoverføringskoeffisient [W/(m²·K)]
- ρ = Luftens densitet ved aktuell temperatur [kg/m³]
- c_p = Spesifikk varmekapasitet for luft/damp blanding [J/(kg·K)]
- R = Gasskonstanten for vanndamp [J/(kg·K)]
- T = Luftens temperatur [K]

For laminær strømning gjelder uttrykket i formel 4.8 (WUFI, 2016a), med henvisning til (Illig, 1952).

$$\beta_{\text{laminær}} = \frac{D \cdot \alpha_c}{\lambda \cdot R \cdot T} \quad (4.8)$$

Hvor: $\beta_{\text{lam.}}$ = Fuktoverføringskoeffisient ved laminær strømning [m/s]
 D = Diffusjonskoeffisient for vanndamp i luft [m²/s]
 λ = Termisk konduktivitet for luft [W/(m·K)]

Diffusjonskoeffisienten for vanndamp i luft kan beregnes ved å benytte Schirmers formel, slik vist i formel 4.9 (Belleghem, m.fl, 2015).

$$D_v = 2,31 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{101,325}{P_{\text{op}}} \right) \cdot \left(\frac{T}{273,15} \right)^{1,81} \quad (4.9)$$

Hvor: D_v = Diffusjonskoeffisienten for vanndamp i luft [m²/s]
 P_{op} = Atmosfærisk trykk [Pa]
 T = Luftens temperatur [K]

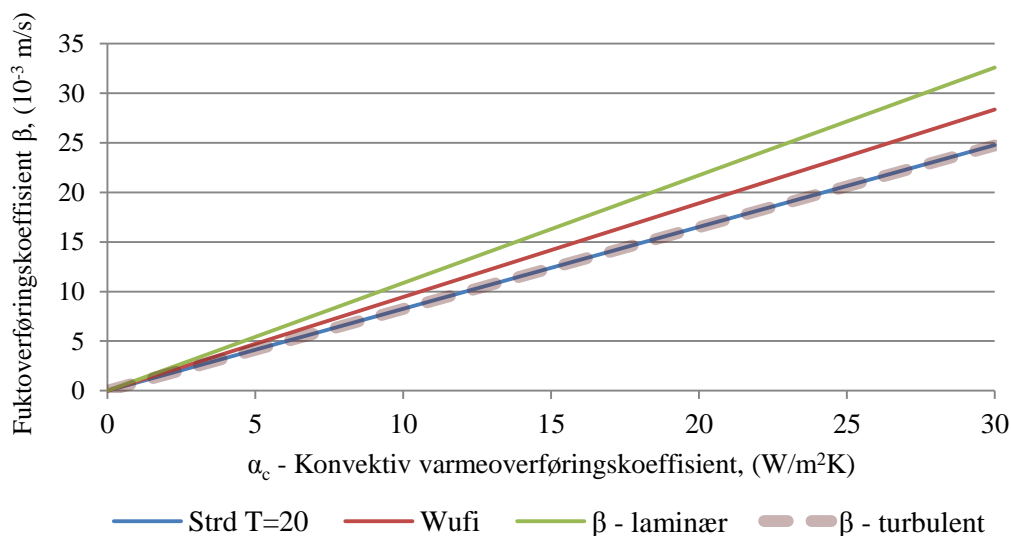
Slik det fremgår av formel 4.7 og 4.8, er fuktoverføringskoeffisienten avhengig av flere parametere. Det er følgelig utfordrende å gi et estimat, som skal gjelde overordnet for et temperaturintervall som er av interesse i fuktberegninger. WUFI benytter på sin side en konstant faktor ved beregning av konvektiv fukttransportkoeffisient for utvendige og innvendige overflater, tilsvarende $7 \cdot 10^{-9} \cdot \alpha_c$ (WUFI, 2016b). Betydningen av strømningsforhold og temperatur på vanndampoverføringskoeffisientens størrelsesorden, er illustrert i figur 4.3.1. Ved å benytte formel 4.6, 4.7 og 4.8, kan en ved gitte temperaturer og konvekative varmeoverføringskoeffisienter utarbeide et tilsvarende diagram.

Til nå, har fokuset i denne delen av oppgaven vært rettet mot konvektiv fukttransport, i sammenheng med kondensering på overflater. Det er nødvendig å presisere at en overflate opplever flere prosesser enn kondensering. I første omgang vil en overflate bli oppfuktet av fuktig uteluft som strømmer gjennom luftespalten. Dersom duggpunktet nås, og spalteluften inneholder mer fukt enn overflatene, vil kondens inntreffe. I neste tidssteg, kan overflaten oppleve fordampning, dersom kondensbetingelsene frafaller. Videre må uttørking av overflaten tas med i en mer omstendelig betraktning. Dersom lufthastigheten i luftespalten uteblir, reduseres fukttransporten til fuktdiffusjon, analogt med varmetransport, hvor varmetransporten reduseres til konduksjon (Talev, 2011). En mer detaljert oversikt over de ulike fasene en overflate i spalten gjennomgår, er omtalt i (Falk og Sandin, 2013).

Følgelig blir en komplett analyse av kondens svært omfattende. Videre i denne oppgaven er situasjonen kraftig forenklet, hvor en kun ser på tilfellene hvor spalteluften inneholder mer fukt per kubikk, enn overflaten. I kapittel 6.3 er situasjonen nevnt over, omtalt kondenspotensial. Dette gir følgelig ikke tilfredsstillende nøyaktighet ved en mer virkelighets tilnærmet evaluering av kondens. På en annen side, kan tilfellet når spalteluften inneholder mer fukt enn overflatene i spalten, benyttes som en kvantifisering av kondens, i en parameterstudie.

Det totale bilde blir ytterligere komplisert dersom materialenes kondensopptaksevne hensyntas. Ulike materialer kan ta opp ulike mengder kondens, hvilket vil ha stor betydning på mengde utfelt kondens i luftespalten. Ettersom det foretas en forenkling vedrørende beregning av kondens i WUFI, velges det ikke å gå dypere til verks i denne oppgaven. Hvordan parameterstudiet i WUFI er utført, og hvilke begrensinger og forenklinger som er foretatt, er beskrevet i vedlegg 4.1.

Av hensiktsmessige årsaker er det også i dette kapittelet valgt å visualisere variasjonsområdet for respektiv overføringskoeffisient. Figur 4.3.1, viser den konvekktive fuktoverføringskoeffisienten, som funksjon av varierende formelverk, samt varierende konvektiv varmeoverføringskoeffisient.



Figur 4.3.1. Variasjonsområdet for konvektiv fuktoverføringskoeffisient i en luftespalte. Figuren viser konvektiv fuktoverføringskoeffisient ved varierende konvektiv varmeoverføringskoeffisient, og ved bruk av ulike formler.

I figur 4.3.1, er formel 4.8, benyttet til å beregne fuktoverføringskoeffisienten som funksjon av varierende konvektiv varmeoverføringskoeffisient, ved laminær strømning. Likeledes er formel 4.7 benyttet til å beregne koeffisienten ved turbulent strømning. I tillegg er formel 4.6 benyttet til å visualisere effekten av å benytte en forenklet tilnærming. Sluttvis er koeffisienten tegnet inn i diagrammet, i henhold til hvordan WUFI beregner konvektiv fuktoverføringskoeffisient. Sett i lys av konvektiv fuktoverføring, er en forskjell i fuktinnhold (g/m^3), drivkraften for fukttransporten. Forskjell i fuktinnhold har således en mer betydelig innvirkning på fuktoverføringens størrelsesorden, enn variasjon i den konvekktive fuktoverføringskoeffisienten. Ettersom det foretas en forenkling vedrørende konvektiv fukttransport i luftespalten, forstås det fornuftig å studere forskjell i vandampinnhold i luftespalten, dersom kondensbetingelser skal evalueres.

4.4. LUFTESPALTENS VENTILASJONSEVNE

Luftespalter i skrå tretak tjener som nevnt tidligere hovedsakelig med to hensikter.

Luftespalten skal ventilere bort fukt fra takkonstruksjonen, og varmetilskudd fra perioder med sol. Således kan det skilles mellom fuktventilering og varmeventilering i spalten. I tillegg til å ventilere bort fukt og varme, kan utelufta som strømmer gjennom luftespalten bidra som et tilskudd. Under vindfulle, varme sommerdager, vil luftstrømning i luftespalten bidra til at spalten i sin helhet varmes opp. Likeledes vil vindfulle perioder med mye fukt i utelufta, kunne bidra til et fukttilskudd i luftespalten. Det er derfor viktig at begge situasjonene tas til betraktning, dersom spalteutforming skal analyseres.

I det følgende presenteres formelverket som ligger til grunn for å analysere fukt og temperaturforhold i en luftespalte. Det bemerkes at dette er en forenkling av virkeligheten. På en annen side vil fremgangsmåten være anvendbar i en parameterstudie, hvor luftespaltens evne til å ventilere bort fukt og varme, som funksjon av ulike parametere studeres.

En anvendt metode for å beregne spaltens evne til å transportere bort, eventuelt bidra med et tilskudd, er å anta spalteluften som en fukt- og varmeteknisk kilde. Luftspaltens ventilasjonsevne sett i lys av varme, kan beregnes ved å benytte formel 4.10 (WUFI, 2016c).

$$V = \rho_{\text{ute}} \cdot \frac{\text{ACH}}{3600} \cdot d \cdot C_p \cdot (T_{\text{ute}} - T_{\text{spalte}}) \quad (4.10)$$

Hvor:	V	= Luftespaltens ventilasjonsevne [W/m ²]
	ρ_{ute}	= Uteluftens densitet [kg/m ³]
	ACH	= Luftskifte per time [1/h]
	d	= Luftespaltens høyde [m]
	C_p	= Luftens varmekapasitet [J/kg·K]
	T_{ute}	= Uteluftens temperatur [K]
	T_{spalte}	= Middelttemperatur i luftespalten [K]

Dersom en ønsker å relatere beregningen av varmeventilering til luftespaltens lengde og opptredende lufthastighet, kan metodikken beskrevet sluttvis i formel 4.11 benyttes. I formel 4.10 er det gjort visse forenklinger fra virkeligheten. I første omgang midles temperaturen over luftespalten. Videre antas en konstant varmekapasitet for spalteluften. I realiteten varierer varmekapasiteten for luft som funksjon av temperaturen, men i svært begrenset grad, i temperaturintervallet som er av interesse i bygg-sammenheng. Spalteluftens temperatur kan på sin side variere i mer betydelig grad, noe som ansees å ha større innvirkning. Ved beregning av en overordnet ventilasjonsevne for taket, ansees forenklingen relatert til ulik temperatur i spalten langs takplanet, mindre betydelig. Forenklingen vil ved beregning av varmeoverføringskoeffisienter i spalten være uheldig, ettersom varmeoverføringskoeffisienten er temperaturavhengig. Følgelig vil en få frem et forenklet bilde av realiteten, ved å benytte en midlet spaltetemperatur. Dette grunnet at luftespaltens temperatur er avhengig av konduksjon fra taktro og undertak, langbølget strålingsutveksling mellom undertaket og taktroa, samt varmetransport ved konveksjon fra overflatene.

I neste omgang er luftespaltens evne for fuktventilering av interesse. Når luft strømmer gjennom spalten, kan konvektiv fukttransport finnes ved å benytte formel 4.11 (Falk og Sandin, 2013).

$$G = (v_{inn} - v_{ut}) \cdot \frac{d \cdot u_m}{l} \quad (4.11)$$

Hvor:

- G = Konvektiv fukttransport i luftespalten [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]
- v_{inn} = Luftens vanndampinnhold ved innløpet [kg/m^3]
- v_{ut} = Luftens vanndampinnhold ved utløpet [kg/m^3]
- d = Spaltehøyde [m]
- u_m = Lufthastighet i spalten [m/s]
- l = Spaltens lengde [m]

Dersom formel 4.11 justeres med hensyn på luftskifte per time, fås uttrykket slik vist i formel 4.12 (WUFI, 2016c):

$$G = (v_{inn} - v_{ut}) \cdot d \cdot \frac{ACH}{3600} \quad (4.12)$$

Hvor:

- G = Konvektiv fukttransport i luftespalten [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]
- v_{inn} = Luftens vanndampinnhold ved innløpet [kg/m^3]
- v_{ut} = Luftens vanndampinnhold ved utløpet [kg/m^3]
- d = Spaltehøyde [m]
- ACH = Luftskifte per time (1/h)

I en analyse av en luftespaltens varme og fuktforhold, må som sagt både tilskudd og ventilert mengde hensyntas. Dersom en luftespalte har mulighet til å ventilere et stort varmetilskudd under en varm dag på sommeren, er det nærliggende å tro at spalten også har mulighet for å fukte opp spalten på kveldstid. Dette grunnet at den varme uteluften blir fuktigere i takt med synkende utetemperatur.

4.5. STRÅLINGSBALANSE FOR TAKPLANET

I tillegg til varmefluks fra konduksjon gjennom taktekingen og konvektiv varmetransport til omgivende luft, vil stråling ha en betydelig innvirkning på taktekingens overflatetemperatur. Normalt vil kortbølget solstråling bidra til å varme opp taktekingen på dagen. Takflaten vil i takt med redusert kortbølget stråling og utetemperatur, avkjøles utover ettermiddagen og kvelden. Ved bestemte klimatiske forhold kan takflaten, grunnet en betydelig mengde emittert langbølget stråling, underkjøles flere grader utover utetemperaturen (Kehrer og Schmidt, 2008). Under enkelte perioder av året, spesielt for vår og høst, vil underkjølingen sammen med fuktig uteluft kunne medføre at det dannes kondens på spaltens omsluttende flater. Klimatiske forhold som er gunstig, sett i lys av underkjøling, er primært skyfrie netter. Dersom en betrakter faren for kondens i luftespalten, er situasjoner hvor en opplever et værromslag av interesse. Dette gjelder spesielt døgn hvor en har hatt en jevn relativ luftfuktighet på dagen, og hvor relativ luftfuktighet øker betraktelig utover kvelden og på nattetid.

Det finnes metoder for å beregne langbølget strålingsutveksling tilnærmet, hvor det foretas visse forenklinger fra virkeligheten (Hagentoft, 2001). Metodene egner seg for enkle overslagsberegninger, mens det er ansett fordelaktig å benytte en mer omstendelig prosedyre ved vurdering av fuktteknisk ytelse for bygningskonstruksjoner. Fordelen med metoden beskrevet i det følgende, er at en får hensyntatt uteklime i større grad, enn for håndberegninger (Kehrer and Schmidt, 2008). Strålingsbalanse for takplanets ytre sjikt er av stor betydning for temperatur- og fuktforhold i tak generelt. Strålingsbalansen består av flere komponenter, slik vist i formel 4.13 (Kehrer and Schmidt, 2008).

$$I = \alpha \cdot I_s + \varepsilon \cdot I_l - I_e \quad (4.13)$$

Hvor:	I	= Balansert netto stråling for takplanet [W/m ²]
	α	= Kortbølget absorpsjonskoeffisient for takplanet [-]
	I_s	= Innfallende kortbølget stråling [W/m ²]
	ε	= Langbølget emisjonskoeffisient for takplanet [-]
	I_l	= Innfallende langbølget stråling [W/m ²]
	I_e	= Emittert langbølget stråling for takplanet [W/m ²]

Balansen gitt i formel 4.13 betinger korrekt klimadata for solstråling, hvilket ikke alltid er tilfellet i praksis. I Norge er det utført en omfattende studie, hvor hensikten var å utarbeide uteklime for ulike geografiske plasseringer i landet (Geving og Torgersen, 1997). Denne dataen mangler innfallende langbølget solstråling, og kan derfor ikke benyttes direkte sammen med formel 4.13. Det er denne dataen som er grunnlaget for klimafilene for Norge i WUFI. Ettersom klimadata for de norske stedene i Norge er komplette med tanke på solstråling, er der nærliggende å tro at det er foretatt en videreutvikling av klimadataen utarbeidet i (Geving og Torgersen, 1997), i nåværende klimafilene for aktuelle steder i Norge i WUFI.

Langbølget strålingsutveksling mot atmosfæren er videre avhengig av klimaparametere som skydekket, tid på døgnet, luftfuktighet og temperatur, samt geografisk plassering. I tillegg er takets helning av betydning, ettersom redusert takvinkel medfører at takets synsfelt mot atmosfæren øker. Sagt på en annen måte kan det sies at taket ser mer av himmelen, desto lavere takvinkelen bli. Den innfallende langbølgede solstrålingen I_1 (W/m^2), kan beregnes etter formel 4.14 (Kehrer and Schmidt, 2008).

$$I_1 = g_{\text{atm.}} \cdot I_{1,\text{atm.}} + g_{\text{terr.}} \cdot (I_{1,\text{terr.}} + I_{1,\text{refl.}}) \quad (4.14)$$

Hvor:

- I_1 = Innfallende langbølget solstråling [W/m^2]
- $g_{\text{atm.}}$ = Takflatens synsfelt mot himmelen [-]
- $I_{1,\text{atm.}}$ = Atmosfærisk langbølget motstråling [W/m^2]
- $g_{\text{terr.}}$ = Takflatens synsfelt mot bakken [-]
- $I_{1,\text{terr.}}$ = Langbølget motstråling fra bakken [W/m^2]
- $I_{1,\text{refl.}}$ = Atm. langbølget motstråling reflektert fra bakken [W/m^2]

Synsfeltet for takflaten mot henholdsvis himmelen og bakken, kan beregnes ut fra formel 4.15 og sammenhengen gitt i formel 4.16 (Kehrer and Schmidt, 2008).

$$g_{\text{atm.}} = \cos^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (4.15)$$

Hvor: α = Takets helning [$^\circ$]

$$g_{\text{terr.}} = 1 - g_{\text{atm.}} \quad (4.16)$$

Det er gitt at en takflate vil se mer av himmelen i takt med redusert takvinkel. Det er derfor nærliggende å tro at underkjølingen av takflaten øker, ettersom netto stålingsutveksling fra takflaten mot atmosfæren øker. Videre er taktekkingens kortbølgede absorpsjonskoeffisient og den langbølgede emisjonskoeffisienten av stor betydning for strålingsutvekslingens størrelsesorden. Disse antas like i (Kehrer and Schmidt, 2008). Derfor vil ulike materialer og ulike farge, mer presist, ulike kortbølget absorpsjonskoeffisient, ha en viktig betydning på strålingsutvekslingens størrelsesorden. Dette kan indirekte visualiseres gjennom tabell 4.5.1, hvor ulike farger og tilhørende koeffisienter er listet opp (Bludau, m.fl., 2008).

Tabell 4.5.1. Ulike absorptiviteter som funksjon av overflatens farge (Bludau, m.fl., 2008).

Overflatens farge	Absorptivitet, α (-)
Svart	0,949
Grå	0,849
Sølv	0,130
Hvit	0,234

Effekten av negativ netto strålingsbalanse for takflaten, er underkjøling av takflaten. Størrelsesorden og treghet i temperatursenkningen antas analogt med effekten av termisk masse innvendig i bygninger. Likeledes antas taktekkinger med en nevneverdig fuktlagringssevne å kunne gi en forskyvning og dempning av amplituden, representert ved kondenspotensial på taktekkings side mot luftespalten. Kondens i luftespalten er tematikk for kapittel 4.6.

Langbølget strålingsutveksling mot atmosfæren, og underkjøling av taktekkingen, var en av flere parametere som ble målt på forsøkshuset på Tyholt i en tidligere doktoravhandling (Blom, 1990). Fra temperaturmålingene kunne en observere at det forekom markante temperaturendringer langs luftspalten fra raft til møne for en 23 mm luftespalte. Feltene med (48 og 98) mm luftespalte, hadde på en annen side relativt små temperaturgradienter over takplanet, fra raft til møne. Langbølget stråling, og underkjøling av tekkingen ble observert hyppigst forekommende for de minste kanaltverrsnittene.

Videre er det viktig å se på varigheten av underkjøling gjennom et år. Eksempelvis må antall timer med underkjøling gjennom ett år, sammenlignes med gjennomsnittlig underkjøling (°C) på årsbasis. Det er nærliggende å tro at effekten av økt antall dager med underkjøling gjennom ett år, kan forverre fuktforholdene i luftespalten i større grad, sammenlignet med noe økt underkjøling (°C). Slik langbølget strålingsutveksling mot atmosfæren forstås innledningsvis, vil effekten få en mer betydelig innvirkning i takt med en stadig kaldere og fuktigere luftespalte.

4.6. KONDENS I LUFTESPALTEN

Det finnes i dag få konkretiserte retningslinjer på hvilke nivåer av utfelt mengde kondens som kan tolereres i tak. Fenomenet er på en annen side anerkjent, samtidig som det er i begrenset grad omhandlet i litteraturen. Kondens er sett på som problematisk, og dagens retningslinjer for lufting av skrå tretak henstiller seg i begrenset grad til dette problemet. Kondens eller kondensering skyldes enten ren vanndampdiffusjon, eller luftlekkasjer fra innelufta. Dersom det er brukt dampsperre av plastfolie, er kondensering fra vanndampdiffusjon sjelden eller aldri noe problem (Geving, 2011). Videre bemerkes det at vanndampgjennomgangen for ulike produkter er vesentlig lavere for de kaldere periodene av året. Reduksjonen i vanndampdiffusjon skyldes at drivkraften for diffusjon, damptrykkforskjellen over undertaket, reduseres i takt med synkende temperatur (Uvsløkk og Vågen, 2012). Blom og Uvsløkk (2012) gjennomførte en studie, som blant annet omhandlet fuktforholdene på undertakets varme side. Ulike produkter ble simulert, hvor ulik motstand mot dampgjennomgang, samt ulik termisk masse ble testet. Det gikk tydelig frem av studien at et vindsperreprodukt med en viss termisk masse, har gunstig innvirkning på fuktforholdet på vindsperrens varme side. Videre fremgikk det av studien, at et foliebasert vindsperrsjikt er mer ømfintlig ovenfor fukttilskudd og variasjoner i uteluftens fuktinnhold. Et vindsperreprodukt med en viss termisk masse, og en evne for kondensopptak, kan således dempe variasjoner i sjiktets fuktinnhold (Blom og Uvsløkk, 2012).

Ettersom uteluften inneholder mer fukt per volum på sommeren, utgjør denne perioden et større potensial for kondensutfelling, enn eksempelvis vår og høst, dersom en fokuserer entydig på luftens fuktinnhold. For at kondens skal forekomme, må på en annen side duggpunktet for luftespaltens omsluttende flater nås. I perioder med snø på taket, vil taktekkings overflatetemperatur være rundt null grader. I likhet med perioder med betydelig langbølget strålingsutveksling mot atmosfæren, og medfølgende underkjøling av takflaten, vil perioder med snø på taket utgjøre en periode av interesse, sett i lys av potensiell kondensutfelling. Parametere med størst betydning for kondenspotensialet, ansees som spaltehøyde, type taktekkning og lufthastighet i luftespalten. Spaltehøyden vil endre temperaturdifferansen over luftespalten, mens økt lufthastighet vil medføre at klimaet i luftespalten innstiller seg hurtigere etter uteklimaet. Ulik taktekkning vil i neste omgang være utslagsgivende på underkjølingen i luftespalten, som teoretisk sett medfører at duggpunktet nås hurtigere.

I likhet med langbølget strålingsutveksling mot atmosfæren, og underkjøling av taktekkningen, var fuktforholdet under taktroa en av flere parametere som ble målt på forsøkshuset på Tyholt i (Blom, 1990). Målingene fra forsøkshuset på Tyholt viste at fuktforholdet i tak med taktro under asfaltbelegg, var klart lavere i feltene med de minste kanaltverrsnittene. I avhandlingen ble det konkludert med at klimaet i de største kanaltverrsnittene domineres av den kalde og fuktige uteluften under perioder med kondensbetingelser. Videre ble det påvist at de minste kanaltverrsnittene hadde færrest perioder med kondensbetingelser (Blom, 1990).

Så langt i dette kapitlet har fokuset vært rettet mot fuktforhold i luftespalten og potensialet for kondens. I en mer detaljert beregning, enn det som foretas i denne oppgaven, bør om mulig materialenes kondensopptaksevne inkluderes. Dette er ingen enkel oppgave, ettersom det eksisterer begrenset med kunnskap om materialers kondensopptaksevne, i sammenheng med eksponeringstid. Videre benyttes det i dag en metode, som ser på kondensopptaksevne på materialenes underside mot mineralull (NT Build 304). Klimaforholdene i disse testene vil trolig skille seg betydelig fra fukt- og temperaturforholdene i en luftespalte, ettersom

uteklimaet har en større og hurtigere innvirkning i luftespalten. Det finnes begrenset kunnskap på hvor store mengder kondens ulike materialer kan tolerere, før eventuell utfelling av kondens oppstår. I den britiske standarden BS 5250:2002, gis overordnede og svært generelle føringslinjer, som i korthet er nevnt under (BS 5250).

- Estimerer på kondens for tre- eller trebaserte overflater, spesielt konstruktive elementer, bør omhandles i forsiktighet og elimineres om mulig.
- En ytre vange av teglstein, som oppfuktes av regn, kan tåle betydelige mengder kondens uten alvorlige følger.
- Kondens på impermeable overflater, slik som flater av metall eller plastikk, vil ikke alltid forårsake skade der kondensen inntreffer, men kan renne av flaten og forårsake skader på mer ømfintlige materialer.

Standarden gir i neste omgang informasjon om sammenhengen mellom mengde kondens og tilhørende effekt for impermeable overflater, slik som overflater av metall og plastikk og komposittmaterialer. Sammenhengen er vist i tabell 4.6.1 (BS 5250).

Tabell 4.6.1. Sammenheng mellom mengde kondens (g/m^2) og avrenning for impermeable overflater (BS 5250).

Kondens g/m^2	Effekt
0-30	Fin tåke/dus dannes. Kondensvann renner ikke av flaten, selv for vertikale flater
30-50	Dråper starter å dannes, og vil sakte renne av for vertikale flater
50 - 250	Store dråper formes og vil renne av selv for flater med helning 70 g/m^2 vil renne av for en flate med 45 graders helning 150 g/m^2 vil renne av for en flate med 23 graders helning
> 250	Dråper som er store nok til å renne av flaten direkte vil formes selv på horisontale flater

Det bemerkes at retningslinjene gjelder for overflater som ikke har en betydningsfull fuktlagringsevne, sett i lys av fuktregninger. Det har ikke lyktes i å innhente informasjon om hvilken test som er grunnlaget for tabellen i den britiske standarden. Videre er det ikke gitt retningslinjer for permeable flater, med fuktlagringsevne. Dersom en luftespalte i et skrått tretak er omsluttet av permeable flater med vindspærre i nedre del, og taktro i øvre del, kan overflatene i luftespaltene lagre noe forekommende kondens, avhengig av hvilke produkt som benyttes (Uvsløkk og Vågen, 2012). Fukttinnholdet i taktroa vil på en annen side innstille seg etter fukttinnholdet i spalteluften, hvilket må hensyntas i en generell betraktning. I fuktregninger vil sorpsjon- og desorpsjonskurver hensynta dette. I en fuktregning er tidssteget oftest en time, grunnet formatet på tilgjengelig klimadata. Slik at eventuelle retningslinjer vedrørende kondensopptaksevne for flater, bør relateres til et forenelig tidssteg, eksempelvis en time.

I teknisk godkjenning her til lands, benyttes en standardisert metode for å måle kondensopptaksevne (NT Build 304). I metoden er prøvestykkene tørre ved oppstart, og kondensopptaksevne, oppgitt som (g/m^2), blir målt i det øyeblikket kondens utfelles som dråper på skråstilte prøvestykker. Kondensopptaksevnen blir således ikke relatert til tid. Det finnes informasjon om et flertalls undertaks-produkters kondensopptaksevne, men uten relasjon til tid. Måten undertaksproduktene testes på, må derfor ansees som et øvre nivå for mye vann som kan lagres, og at utfelling kan starte noe før, avhengig av forholdene.

I tillegg til teknisk godkjenning, finnes det en tidligere studie på vanddampgjennomgang ved vinterforhold, hvor forfatterne også testet kondensopptakseve (Uvsløkk og Vågen, 2012). I studien ble duk-baserte, kartong-baserte og plateprodukter testet for kondensopptakseve, på varm side av taket, altså undertakets underside. Prøvene ble kun veid etter hver periode, hvor klimaet i testen ble endret, og det kan derfor ikke direkte overføres til noen spesifikk kondensopptakseve. Studien gir på en annen side et interessant bilde på variasjoner i undertakenes fuktegenskaper ved vinterforhold, hvilket var hensikten med rapporten. I denne oppgaven er kondensbetingelser ytterligere studert i kapittel 6.3, da i en meget forenklet form.

Sett i lys av mikrobiologisk vekst, er eventuelt økt relativ luftfuktighet i luftespalten problematisk, såfremt resterende vekstvilkår er tilstede. Forekomst av muggvekst ble gjennom doktoravhandlingen (Holme, 2010) studert for ulike platebaserte bygningsprodukter. Testene ved 15 °C, som varte 11 uker, viste forekomst av muggvekst i intervallet (85-100) % relativ luftfuktighet for gipsplater og trefiberplater. Kritisk relativ luftfuktighet for platebaserte bygningsprodukter var blant annet tematikk i doktoravhandlingen (Johansson, 2012). Johansson studerte effekten for ulike plateprodukter ved henholdsvis 22 °C og 10 °C, hvor testingen foregikk i 12 uker. Johansson rapporterte kritisk nivå for relativ luftfuktighet i intervallet (75-95) % avhengig av type produkt, og temperatur.

I praksis velges det ofte et vindsperresjikt i taket bestående av både platebaserte produkter og et utenpåliggende dukprodukt. Slike utførelser av vindsperresjiktet er i likhet med andre situasjoner interessant, med tanke på risiko for muggsoppvekst. Ulike vindsperreprodukt og kombinasjonen av et plateprodukt og utenforliggende dukprodukt ble studert i (Myklebost og Jansen, 2007). I studiet konkluderes det med at løsningen viser seg å ha tilstrekkelig uttørkningsevne til unngå muggsoppvekst, under de klimatiske forholdene som ble testet. Studien gikk over seks uker ved 15 °C, og ved fuktnivåer på henholdsvis (85,9 – 100) % relativ luftfuktighet. Det bemerkes at vindsperresjiktets totale motstand mot dampgjennomgang bør etterleve anbefalingen til SINTEF Byggforsk, tilsvarende en S_d – verdi på 0,5 m, eller mindre. Tilstrekkelig mulighet for uttørking av eventuell innebygd eller inntrengt fuktighet er essensielt for slike utførelser. Forenklet sagt, kan en kritisk grense for muggvekst settes lik 80 % relativ luftfuktighet (Byggforskserien 471.111).

5. METODE

5.1. LITTERATURSØK

BIBSYS ASK

BIBSYS er et statlig forvaltningssystem underlagt Kunnskapsdepartementet (BIBSYS). Gjennom ulike søkemotorer tilbyr BIBSYS tilgang til bibliotekenes ressurser. BIBSYS samarbeider med Nasjonalbiblioteket, NTNU og andre institusjoner. Søkemotoren BIBSYS Ask fases ut av NTNUs Universitetsbibliotek 2015, for å bli erstattet av søkemotoren Oria. Søkemotoren Oria leveres av BIBSYS (Oria).

Som student ved NTNU har en tilgang på Universitetsbiblioteket, Bygg og arkitektur biblioteket, samt fagdatabaser og organisasjonsnettsider gjennom Oria. Søkemotoren Oria benyttes i dette prosjektet for litteratursøk, samt for å få tilgang til organisasjonsnettsidene ELSEVIER og SAGE.

ELSEVIER

ELSEVIER er en verdensledende leverandør av informasjonsløsninger som forbedrer ytelsen av vitenskap og teknologi (ELSEVIER). ELSEVIER tilbyr internettbasert digitale løsninger og utgir over 2500 tidsskrifter, og mer enn 33 000 boktitler inkludert en rekke ikoniske oppslagsverk (ELSEVIER). Building and Environment er en internasjonal journal, som er en del av ELSEVIER. Journalen publiserer forskningsartikler og rapporter relatert til bygningsforskning og forskning myntet på menneskets interaksjon med det bygde miljø (Journal of Building and Environment).

Som Student ved NTNU har en gjennom Universitetsbiblioteket og Oria tilgang til ELSEVIER. I denne oppgaven er journalen Building and Environment benyttet til å finne relevant litteratur, samt få tilgang på referanser gitt kjent litteratur.

SAGE

SAGE er en ledende uavhengig akademisk og profesjonell utgiver av innovativt og høykvalitets materiale (SAGE). Kjent for deres forpliktelse til kvalitet og innovasjon, har SAGE hjulpet med å informere, samt utdanne et globalt samfunn. Årlig publiserer SAGE mer enn 900 journaler og over 800 bøker (SAGE). Journal of Building Physics er en internasjonal journal, som er en del av SAGE Publishing systemet. Journalen fokuserer på å publisere høykvalitets «state of the art» forskning, relatert til faget bygningsfysikk (Journal of Building Physics).

Som Student ved NTNU har en gjennom Universitetsbiblioteket og Oria tilgang til SAGE. I denne oppgaven er journalen: Building Physics benyttet til å finne relevant litteratur, samt få tilgang på referanser gitt kjent litteratur.

SINTEF BYGGFORSK KUNNSKAPSSYSTEM

SINTEF Byggforsk er et internasjonalt ledende forskningsinstitutt for bærekraftig utvikling av bygg og infrastruktur (SINTEF Byggforsk). Deres virksomhetsområder er forskning og utvikling, forskningsbasert rådgivning, produktdokumentasjon samt kunnskapsformidling. SINTEF Byggforsk har sammen med byggenæringen i mer en 50 år gjort kunnskap tilgjengelig og anvendbar gjennom Byggforskserien. Anvisningene i Byggforskserien kan legges til grunn for tegninger og beskrivelser, eller tjene som dokumentasjon for prosjektering og utførelse i byggesaken (Byggforskserien). I dette prosjektet er bruken av anvisninger relatert til temaet: lufting av skrå isolerte trectak.

DAIM

DAIM er en digital arkivering og er utviklet for å følge masterstudenter fra oppstart av masterstudiet, til masterstudiets avslutning (DAIM). DAIM er i denne oppgaven benyttet for å få tilgang på relevante prosjektoppgaver og masteroppgaver utført ved NTNU.

GOOGLE SØK

I tilfellene hvor referanser i meddelt litteratur ikke har vært å finne i nevnte fagdatabaser eller organisasjonsnettsider, er Google søk benyttet. Søkene er primært relatert til å finne utenlandsk forskningsarbeid og avhandlinger.

VEILEDERE

I tillegg til veileder Professor Tore Kvande ved NTNU, Institutt for bygg anlegg og transport, har biveileder Lars Gullbrekken fra NTNU/SINTEF Byggforsk bistått underveis i arbeidet med prosjektoppgaven. Samtlige veiledere har bidratt godt i form av generelle opplysninger, deling av relevant litteratur for oppgaven, samt faglige samtaler våren 2016.

FORKUNNSKAP

Gjennom studiet ved NTNU og høyskolen i Østfold, er kunnskap om bygningsfysikk og tilgrenset kunnskap om fluidmekanikk tilegnet. Tidligere pensumlitteratur fra fag ved både NTNU og HIØ er benyttet i oppgaven, og benyttes gjennomgående som referanser i teorikapitlet.

5.2. MÅLEUTSTYR – TESTMODELL

5.2.1. SENSORER

TEMPERATUR

Måling av temperatur på testmodellen foretas ved bruk av termoelementer, Type T. Denne typen termoelementer består av to metaller, kobber (Cu) og konstantan (Cu-Ni). Ettersom Type – T har god motstand mot korrosjon, muliggjøres bruk av uisolerte ender. Type T og klasse 1 med et temperaturintervall fra -40 til +350 °C, har en målenøyaktighet på +/- 0,5 °C (Pyrocontrol). I denne sammenheng benyttes uisolert tupp, ettersom det skal måles temperatur i spalten, og ikke overflatetemperaturer i spalten. Elementet ved spaltens innløp er strålingsbeskyttet, mens termoelementet i mønekassen er ubeskyttet. Elementene monteres så i et system, koblet opp med en forsterker. Leverandør av forsterkeren som benyttes er Delphin Technology. Forsterkerens modellnavn er Expert Key 100C.

TRYKK

For å måle trykk benyttes fire mikromanometere, videre omtalt trykksensorer for enkelhetens skyld. Målepunkter for trykkavlesning er gitt i kapittel vedlegg 3. Trykksensorene kobles opp mot samme logger som termoelementene. Leverandør av trykksensorene er Furness Controls. Trykksensorenes kjennetegnes Differential Pressure Transmitter – Model 352. I dette prosjektet benyttes Model 352 - type 1, med et måleområde på +/- 50 Pa. Standard målenøyaktighet for sensorene er oppgitt til (0,25 – 0, 5) % av avlesning, avhengig av hvilket måleområde en befinner seg i (Furness Controls).

VOLUMSTRØM

Måling av volumstrøm foretas ved å benytte en måleblende fra SINTEF Byggforsk sitt laboratorium. Produsent av måleblenden er Furness Controls. Modellnavn for måleblenden som benyttes er FCO93 Flow Element. Det finnes per dags dato ikke kalibreringsdata for måleblenden som er benyttet i prosjektet.

5.2.2. VIFTE

Testmodellen utstyres med en sirkulær kanalvifte, som utgjør drivkraften for luftstrømning i systemet. Produsent er Østberg og typen som benyttes i prosjektet er CK200, med en kapasitet på 976 m³·h.

5.2.3. KALIBRERING AV MÅLEUTSTYR

Termoelementene er kalibrert etter testing, ved bruk av en temperaturkalibrator. Produsent av kalibratoren er ScanSense, og type instrument er TC15M. Trykksensorene som er kjøpt inn med hensikt for inneværende prosjekt, er kalibrert før målingen. Det bemerkes at det per dags dato ikke finnes kalibreringsbevis for måleblenden. Måleusikkerheten for måleblenden er knyttet både til trykksensorene som benyttes, samt måleblenden i seg selv. Sistnevnte usikkerhet er studert gjennom en sensitivitetsanalyse i usikkerhetsberegningene.

5.2.4. LOGGEOPPSETT

Data logges kontinuerlig i forsterkeren, for deretter å bli hentet ut manuelt. En kan selv bestemme frekvensen på hver måleserie, som i dette prosjektet er satt til ett sekund. I neste omgang behandles rådata i ulike regneark.

5.2.5. USIKKERHET VED MÅLEUTSTYRET – TESTMODELL

Tradisjonelt deles målefeil inn i grove-, systematiske og tilfeldige feil. Av hensiktsmessige årsaker, velges det å fremstille usikkerhetene som følge av deres opphav. Usikkerhetene ved måling og beregning av støttapskoeffisienter i dette prosjektet, kan sammenfattes slik:

1. Volumstrøm

- Laminærstrømsmålerens avlesningsfeil
- Ulikt absolutt trykk ved kalibrering og bruk av laminærstrømsmåler
- Trykksensor som måler differansetrykket (målenøyaktighet)
- Trykksensor som måler differansetrykket (oppløsning på sensoren)

2. Trykkmålinger

- Trykksensor som måler differansetrykk (målenøyaktighet)
- Trykksensor som måler differansetrykk (oppløsning på sensoren)

3. Geometriske avvik

- Variierende spaltehøyde
- Variierende lektestørrelse
- Takflatens planhet
- Testmodellens egenlekkasje

4. Avlesningsfeil

- Ulikt differansetrykk

Støttapskoeffisientene i denne oppgaven er et resultat av flere variabler. Koeffisientene kan således skrives på formen gitt i formel 5.1. Usikkerheten for støttapskoeffisienten, kan videre beregnes etter formel 5.2 (Moffat R.J., 1988).

$$\xi = f(x, y, z, w) \quad (5.1)$$

$$\Delta\xi = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial\xi}{\partial x} \cdot \Delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial\xi}{\partial y} \cdot \Delta y\right)^2 + \left(\frac{\partial\xi}{\partial z} \cdot \Delta z\right)^2 + \left(\frac{\partial\xi}{\partial w} \cdot \Delta w\right)^2} \quad (5.2)$$

Av tidsmessige årsaker har det ikke latt seg gjøre og statistisk behandle all måledata. Det er derfor gjort et utvalg vedrørende analysen av usikkerheten i måledataen. Dette for å danne et overordnet bilde på hvor stor usikkerhet det ligger i resultatene som fremgår av målinger gjort i laboratoriet. Usikkerhet relatert til resultatene fra testmodellen, er ytterligere behandlet i kapittel 7.1.6.

5.3. MÅLEUTSTYR – ZEB TEST CELL

I forbindelse med bygging av det nye laboratoriet ZEB Test Cell, ble enkelte luftespalter i taket utstyrt med sensorer som måler trykk, temperatur og lufthastighet. Hensikten med målingene er å danne et tydeligere bilde av hvordan luftingen av det skrå isolerte treetaket fungerer ved varierende uteklime. I neste omgang er det av interesse å undersøke temperaturforhold i luftespalten, for å kunne studere takflatens underkjøling, samt luftespaltens evne til å transportere bort varme under ulike vindforhold. I denne oppgaven er hensikten med målingene i ZEB Test Cell taket, å vise til reelle målinger av lufthastighet i en luftespalte. I denne oppgaven presenteres data fra perioden (22.03.2016 – 31.03.2016), hvor klimastasjonen på Test Cell var montert. Det er også sammenfattet data fra januar, hvor lufthastighet ute er hentet fra Living Lab. Dette resultatet er å finne som vedlegg 5.3.

5.3.1. SENSORER

For å måle trykk og temperatur benyttes 310 transmitter fra KIMO instruments, med en målenøyaktighet for temperatur tilsvarende $\pm 0,4$ % av avlesning, og $\pm 0,2$ % for trykkmåling (KIMO, 2016a). Det benyttes termoelement av typen T, som har en overordnet målenøyaktighet på $\pm 0,5$ grader (Pyrocontrol). For måling av lufthastighet benyttes fire anemometer av typen SVO: Omnidirectional. Anemometrene er levert av KIMO instruments, og har en målenøyaktighet på ± 3 % av avlesning (KIMO, 2016b). Termoelementer og anemometre som benyttes i taket er vist i vedlegg 5.2.

5.3.2. KALIBRERING AV SENSORER

I et ønskelig tilfelle, skulle sensorene vært kalibrert før og etter måleperioden, for deretter å korrigere måledata, for å få fremstilt feltmålingene mer nøyaktig. Ettersom sensorene ikke er tilgjengelig for kalibrering, ekskluderes kalibrering av måledata i denne oppgaven.

5.3.3. LOGGEOPPSETT

I ZEB Test Cell er det montert logge-moduler av typen NI 9205 av National Instruments. Måledata sendes via nettverket til egne servere som lagrer måledataen. Deretter henter brukere selv ut data.

5.3.4. USIKKERHET VED MÅLINGENE – ZEB TEST CELL

Usikkerheten i målingene som utføres i taket på ZEB Test Cell, er relatert til sensorenes målenøyaktighet og sensortype. Februar og starten av mars har en del manglende timer, slik at perioden som fremstilles her er den mest komplette måleperioden, som foreligger per dags dato, med kun en manglende time. Dette gjelder timen 23.00-24.00, den (27.03.2016). I vedlegg 5.3, er lufthastigheten i luftespalten fra januar måned fremstilt. Under denne perioden var ikke klimastasjonen på Test Cell montert, slik at vindhastighet ute måtte hentes fra ZEB Living Lab. ZEB Living Lab ligger 250 meter lengre nord enn Test Cell. Det vil følgelig være en usikkerhet i å benytte denne dataen, ettersom terrenget omkring bygningene og høyde plasseringen er ulikt. Videre er klimastasjonen montert i en høyde lavere enn 10 meter. Vindhastighet fra klimastasjonen på ZEB Living Lab er ikke høydekorrigert, slik resultatet fremstår i vedlegg 5.3.

5.4. WUFI

WUFI 1D Pro er et kommersielt tilgjengelig endimensjonalt beregningsprogram for kombinert varme- og fukttransport i porøse bygningsmaterialer. WUFI tilbyr også WUFI 2D, som på sin side er et todimensjonalt beregningsprogram. I tillegg til overnevnte programmer, finnes programmene WUFI Plus, WUFI Passive og WUFI Bio i sortimentet (WUFI, 2016d).

I denne oppgaven benyttes WUFI 1D Pro til å analysere effekten av spalteutforming i skrå tretak, samt fuktforhold ved økt isolasjonstykkelse. For å tydeliggjøre effekten av parameterne som her er av interesse, neglisjeres inntrenging av vann gjennom takteking.

I WUFI er effekten av følgende parametere studert:

- Økt isolasjonstykkelse
- Økt spaltehøyde
- Økt lufthastighet, alternativt luftskifte
- Økt takhelning

Videre er effekten av de ulike parameterne kvantifisert gjennom en analyse av:

- Fuktforhold i luftespalten
- Temperaturforhold i luftespalten
- Underkjøling av takflaten
- Potensial for kondens
- Ventilasjonens størrelse og kapasitet

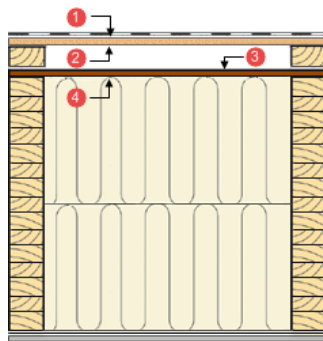
For å fremheve effekten av ulike parametere, er ulike perioder av året fremstilt. Eksempelvis er dagene på sommeren med høyest utetemperatur og globalstråling, lagt til grunn for sammenligning av temperaturforhold i luftespalten ved sommerforhold.

Temperaturforholdene under vinterstid er på sin side kartlagt ved perioden med lavest utetemperatur. I tillegg er effekten av de ulike parameterne sammenlignet på årsbasis. Det bemerkes at fremvisningen i denne oppgavens resultatdel vil variere fra fremstillingen i respektive vedlegg. Dette grunnet et ønske om å begrense aktuelle resultater, ettersom resultatene er detaljert fremstilt i aktuelle vedlegg.

Slik det fremgår av resultatene i kapittel 6.3, er det valgt å sammenligne et skrått tretak med 300 mm isolasjon, med et tak med 500 mm isolasjon. Et skrått tretak med 300 mm isolasjon, er ment å representere et tak bygd etter dagens byggeforskrifter, mens 500 mm er ment å representere et skrått tretak bygd etter fremtidens byggeforskrifter.

Oslo-klima er benyttet for samtlige beregninger. Videre må det bemerkes at klimafilen som benyttes i WUFI er et såkalt (MDRY), et referanseår for fuktberegninger. Modell, antakelser, forenklinger, og en konkretisering av arbeidet med WUFI er gitt i kapittel 6.3, og utdypes i vedlegg 4.1. Parameterstudiene er å finne i en mer komplett utgave, som vedlegg 4.2 – vedlegg 4.5.

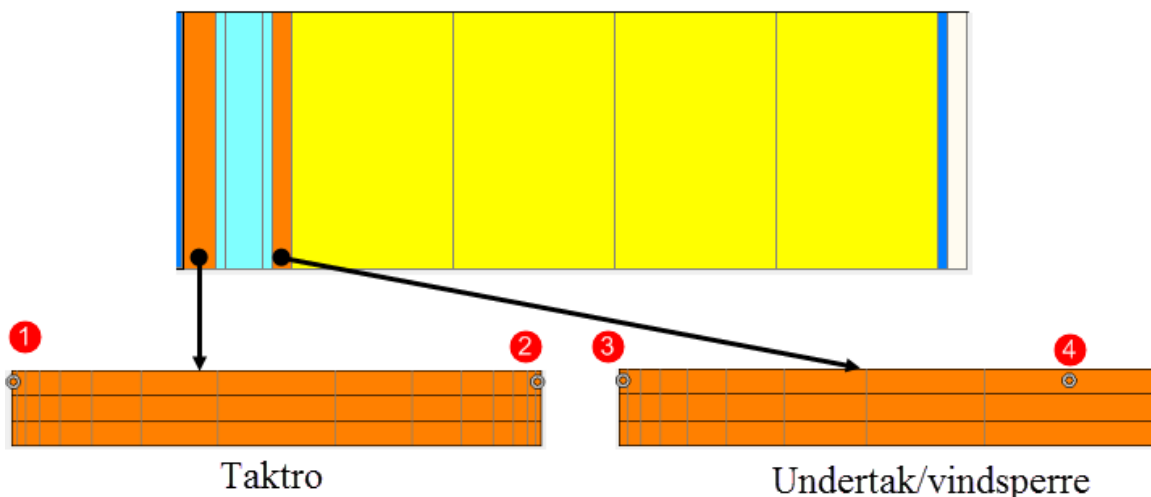
I WUFI er det benyttet er flertalls monitorposisjoner. For å konkretisere hvordan resultatene fra WUFI er fremstilt, omtales sjiktene og deres monitorposisjoner i korthet. En definisjon av hvilke sjikt som er studert i WUFI er gitt i figur 5.4.1.



Sjikt 1 – taktroas overside, under membran
 Sjikt 2 – taktroas underside
 Sjikt 3 – undertakets overside
 Sjikt 4 – undertakets underside

Figur 5.4.1. Definisjon av hvilke sjikt som studeres.

Det er viktig å bemerke at sjikt 1, taktroas overside, relateres til den øvre delen av taktraoa. Likeledes vil sjikt 4, undertakets underside, relateres til nedre side av undertaket. Monitorposisjoner i WUFI er illustrert i figur 5.4.2.



Figur 5.4.2. Monitorposisjoner i WUFI for taktro og undertak

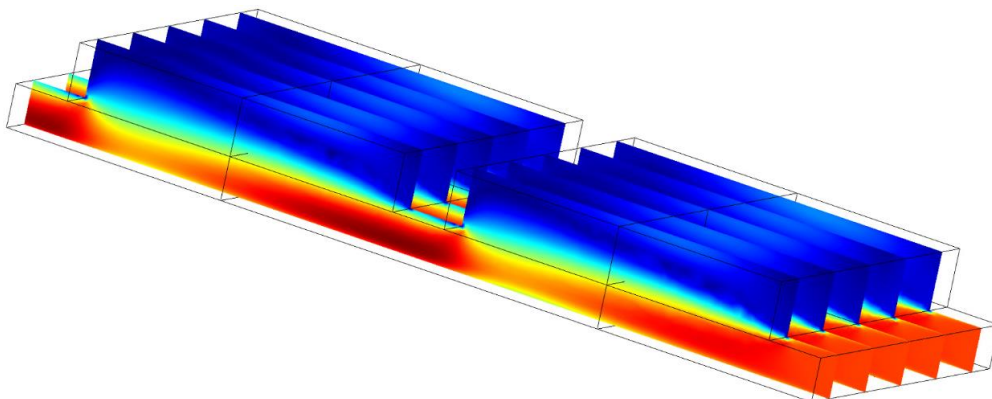
Det er for enkelhetens skyld valgt å benytte beskrivelsen underside og overside. På en annen side er det mer korrekt å benytte beskrivelsene, nedre og øvre del av henholdsvis taktro og undertak.

5.5. COMSOL

COMSOL Multiphysics er et kommersielt tilgjengelig beregningsverktøy for modellering og analyse innen anvendt matematikk og fysikk. COMSOL Multiphysics er en programvare for modellering og simulering av fysikkbaserte systemer, der hovedstyrken er at man kan hensynta koplede fysikkfenomener (COMSOL, 2016a). COMSOL Multiphysics tilbyr et flertall fysiske modellerings funksjonaliteter, samt evnen til å inkludere flere fysiske aspekter i en og samme modell. Ved å legge til ulike moduler, kan ulike fysikk adderes en og samme modell, eksempelvis elektronikk, mekanikk, dynamikk, varmeoverføring og strømningsteknikk.

I denne oppgaven benyttes CFD-modulen (Computational Fluid Dynamics) i COMSOL Multiphysics. Videre velges strømningstypen (Single-Phase Flow), hvor ulike varianter av Navier-Stokes ligningene benyttes til å modellere strømning i ulike regimer, avhengig av strømningshastighet og strømningsskarakteristikk. I denne oppgaven begrenses bruken av CFD-modulen til ligningsvariantene ($k-\epsilon$) og (Low Reynolds $k-\omega$). Modellen og et resultat fra studien i COMSOL er illustrert i figur 5.5.1.

COMSOL benyttes i dette prosjektet til å beregne trykktap over lekter, gitt av en dynamisk trykkforskjell, forårsaket av friksjon og støttap. Følgelig vil en modell som hensyntar materialene/veggene som omslutter luftespalten være fordelaktig å benytte. Strømningsskarakteristikken nær vegger er på sin side utfordrende å beregne, slik at det i enkelte tilfeller foretas en forenkling, gjennom å benytte såkalte (Wall Functions). Denne forenklingen er et av alternativene for ($k-\epsilon$) – modellen, mens (Low Reynolds $k-\omega$) hensyntar de omsluttende flaters innvirkning på luftstrømningen. Det totale strømningssprofil for en turbulent strøm inkluderer fire regimer: veggens overflate, laminært underlag, buffer sone og et fullt utviklet turbulent strømningssprofil (COMSOL, 2016b). Vegg-funksjonen ignorerer strømningssfeltet i buffersonen, og analytisk beregner en strømningshastighet tilsvarende null ved veggens overflate. Dette medfører en betydelig reduksjon i nødvendig datakapasitet, og er ofte anvendt i praktiske tilfeller (COMSOL, 2016b). I dette prosjektet er ligningsvarianten ($k-\epsilon$) først benyttet. Resultatene fra denne beregningen, benyttes deretter som initialverdier for (Low Reynolds $k-\omega$) - modellen. Det utføres derfor to beregninger, for å minimere konvergensfeil, og for å redusere nødvendig tid per beregning.



Figur 4.5.1. Figuren viser resultatet av beregning av trykktap over en steinlekt i COMSOL. Fremvisningen viser strømningssbildet i luftespalten ved tvungen konveksjon.

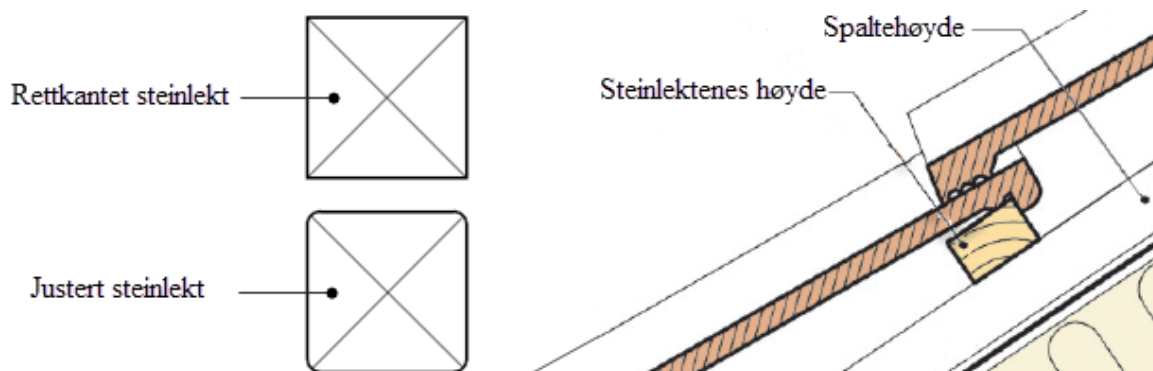
6. RESULTAT

6.1. EKSPERIMENTELLE UNDERSØKELSER – TESTMODELL

Det eksperimentelle arbeidet som er utført i denne oppgaven, er utført for å danne økt forståelse av spalteutførelsens innvirkning på luftstrømning i skrå tretak. Effekten av å velge større steinlekter, sammenlignet med å velge en høyere luftespalte, er av spesiell interesse for innværende oppgave. Videre er effekten av raftets utforming, sammen med møneløsningens innvirkning studert. Arbeidet i laboratoriet og de ulike testene kan deles inn i følgende deler:

1. Egenlekkasje ved varierende spaltehøyder
2. Friksjonstap ved varierende spaltehøyder
3. Støttap for steinlekter ved varierende lektedimensjon og spaltehøyde
4. Støttap for to ulike raft med ulik spalteåpning og spaltehøyde
5. Støttap for møne ved ulik høyde på luftespalten

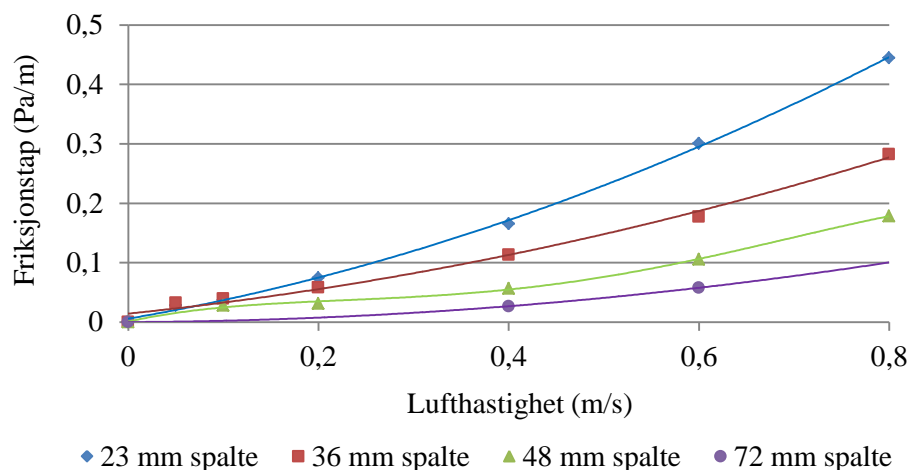
Test 1 inkluderes indirekte, gjennom usikkerhet ved målingene på testmodellen. Resultatet fra egenlekkasje-testene utelates i dette kapittelet av hensiktsmessige årsaker. Deler av resultatene fra de enkeltstående testene er presentert i det følgende, og sammenlignes i kapittel 7. I det eksperimentelle arbeidet i denne oppgaven er både spaltehøyden og steinlektenes høyde variert, for å kunne danne et bilde på deres innvirkning på luftstrømningen i testmodellens tak. Til venstre i figur 6.1.1 vises forskjellen på justert og rettkantet steinlekt. Det bemerkes at terminologien som her er benyttet for de to ulike lektetyperne, kan variere i markedet og for ulike deler av landet. Det velges likevel, til tross for usikkerheten rundt den virkelige definisjonen av de to typene lektene, å holde fast på begrepene rettkantet og justerte steinlekter i det følgende.



Figur 6.1.1. Definisjon på ulike typer steinlekter (til venstre), og begrepene spaltehøyde og steinlektenes høyde. Illustrasjonen til høyre er basert på (525.102, figur 12), og bearbeidet av Espen Hansen 2016.

6.1.1. FRIKSJONSTAP

Innledningsvis ble friksjonstap for ulike spaltehøyder målt. For luftespalter uten tverrgående steinlekter, er trykktapet over takplanets lengde gitt av friksjonstapet i sin helhet, i tillegg til trykktapet over raft og møne. Trykktapet gitt av friksjon ved ulike spaltehøyder er illustrert i figur 6.1.2.



Figur 6.1.2. Friksjonstap i luftespalten ved ulike spaltehøyder og varierende lufthastighet.

Slik det fremgår av figur 6.1.2, vil friksjonstapet dominere i takt med redusert spaltetverrsnitt. Friksjonstapet får videre en mindre betydelig innvirkning på luftstrømningen, i takt med økende spaltetverrsnitt. Friksjonstapene for spaltehøydene som er testet er å finne i tabell 6.1.1. Det bemerkes at friksjonstapet er gitt som (Pa/m).

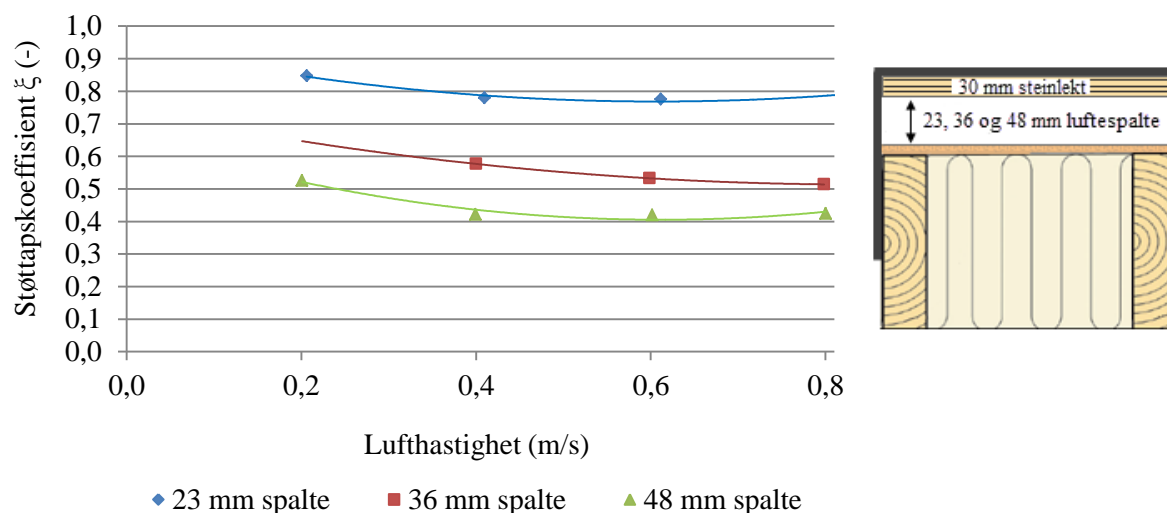
Tabell 6.1.1 Friksjonstap (Pa/m) ved ulike spaltehøyder og hastigheter i luftespalten.

Spaltehøyde	Lufthastighet (m/s)						
	0	0,05	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8
23 mm	-	0,03	0,4	0,07	0,17	0,30	0,44
30 mm	-	0,03	0,04	0,07	0,12	0,20	0,31
36 mm	-	0,03	0,04	0,06	0,11	0,18	0,28
48 mm	-	-	0,03	0,03	0,06	0,11	0,18
53 mm	-	-	-	-	0,04	0,10	0,16
59 mm	-	-	-	-	0,03	0,07	0,13
66 mm	-	-	-	-	0,03	0,06	0,10
72 mm	-	-	-	-	0,03	0,06	-

Slik det fremgår av tabell 6.1.1, lot det seg ikke gjøre å måle enkelte friksjonstap. I det nedre intervallet, med lufthastigheter ned mot 0 m/s, ble trykktapet for lite til å måles. Videre satte viftens kapasitet begrensning for hvor stort tverrsnitt som kunne testes. For aktuell vifte, lot det seg ikke gjøre å måle friksjonstap for spaltehøyder over 72 mm.

6.1.2. STØTTAP OVER LEKTER

En stor del av det eksperimentelle arbeidet i inneværende prosjekt, er knyttet til støttapet for ulike steinlektet ved varierende spaltehøyde. Effekten av å variere steinlektenes dimensjon og type, er i det følgende sammenlignet med å øke spaltehøyden. Dette for å kunne danne et tydeligere bilde på luftstrømningen i luftespalten, samt for å kunne uttale seg om spaltehøydens effekt på luftstrømningen. Slik det fremgår av figur 6.1.3, vil det totale trykktapet, og følgelig støttapskoeffisienten for en 30 mm rettkantet steinlekt reduseres, i takt med økende spaltehøyde.



Figur 6.1.3. Støttapskoeffisient ξ (-) for en 30 mm rettkantet steinlekt ved varierende spaltehøyde.

Resultatet fra studiene som omhandlet ulike lektet og spaltehøyder, er i sin helhet sammenfattet i tabell 6.1.2 og 6.1.3. Det bemerkes at det skiller mellom rettkantede og justerte steinlektet i tabellene.

Tabell 6.1.2. Støttapskoeffisienter ξ (-) for rettkantede steinlektet med varierende spaltehøyder.

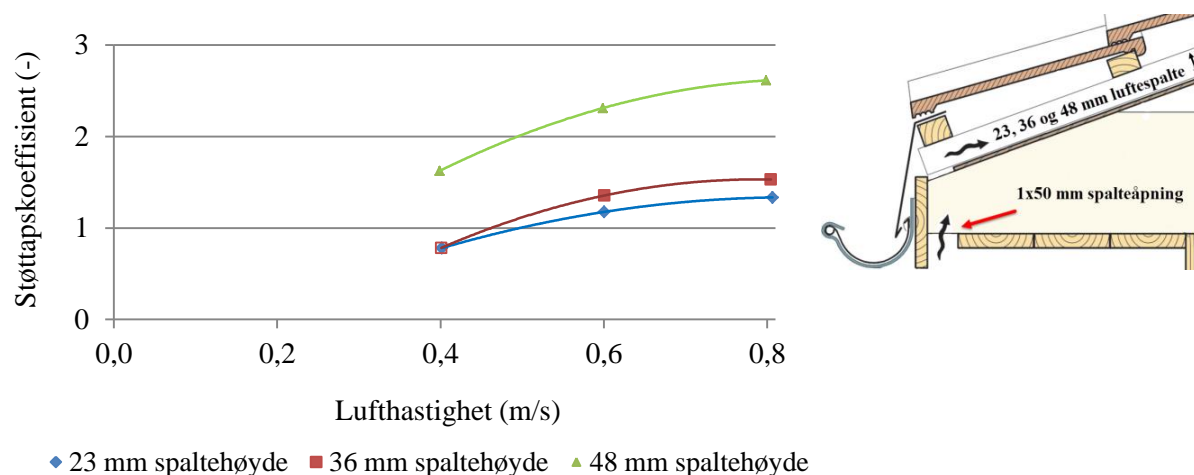
Lufthastighet	30 mm rettkant steinlekt			36 mm rettkant steinlekt			48 mm rettkant steinlekt		
	23 mm	36 mm	48 mm	23 mm	36 mm	48 mm	23 mm	36 mm	48 mm
0,20 m/s	0,85	-	0,53	1,19	0,71	0,57	1,17	0,68	-
0,40 m/s	0,78	0,58	0,42	1,03	0,63	0,49	1,17	0,78	0,64
0,60 m/s	0,78	0,53	0,42	0,99	0,65	0,50	1,16	0,81	0,68
0,80 m/s	0,79	0,51	0,42	0,98	0,74	0,51	1,23	0,83	0,69

Tabell 6.1.3. Støttapskoeffisienter ξ (-) for justerte steinlektet, med varierende spaltehøyder.

Lufthastighet	36 mm justert steinlekt			48 mm justert steinlekt		
	23 mm	36 mm	48 mm	23 mm	36 mm	48 mm
0,2 m/s	0,58	0,39	0,40	0,79	0,49	0,44
0,4 m/s	0,59	0,36	0,24	0,80	0,55	0,44
0,6 m/s	0,59	0,35	0,27	0,80	0,56	0,46
0,8 m/s	0,58	0,46	0,34	0,86	0,56	0,46

6.1.3. STØTTAP OVER RAFT - ALTERNATIV 1

Ettersom det i dag eksisterer begrenset eksperimentell data på trykktapet over raft, var det ønskelig å studere dette trykktapet i innværende oppgave. Innledningsvis ble en tradisjonell løsning for raft konstruert, hvor det både er utført tester med og uten innsektsnetting/fluenetting. I neste omgang er spalteåpningen i raftekassen variert, for å kunne danne økt kunnskap vedrørende spalteutforming i raft og tilhørende trykktap. Utførelse av raft-alternativ 1, er å finne som vedlegg 3.2.1. For samtlige tester ble 36 mm rettkantede steinlekker benyttet.



Figur 6.1.4. Støttapskoeffisient ξ (-) for raft – alternativ 1 (uten fluenetting), ved varierende spaltehøyde. Figuren viser raft – alternativ 1 utført med 1x50 mm spalteåpning i raftekassen.

I motsetning til støttapskoeffisienten for steinlektene, vil økt spaltehøyde øke støttapet over raftekassen. Intuitivt kan dette forstås bemerkelsesverdig, ettersom trenden i figur 6.1.4 skiller seg fra trenden i figur 6.1.3. Resultatene for raft-alternativ 1, er å finne i tabell 6.1.4 – 6.1.6.

Tabell 6.1.4. Støttapskoeffisient ξ (-), for raft – alternativ 1, ved varierende spaltehøyde. Spalteåpning i raft er utført som en 50 mm bred spalte. Støttapskoeffisientene gjelder for spalter med og uten fluenetting.

Lufthastighet	Uten fluenetting			Med fluenetting		
	23 mm spalte	36 mm spalte	48 mm spalte	23 mm spalte	36 mm spalte	48 mm spalte
0,4	0,78	0,78	1,62	1,50	2,02	3,01
0,6	1,18	1,36	2,31	1,75	2,26	3,31
0,8	1,33	1,53	2,61	1,79	2,31	3,38

Det er viktig å ha i baktanke at støttapet over en raftekasse er mer komplisert, enn for støttapet over en lekt. Støttapet over raftekassen er sammensatt av en volumreduksjon innledningsvis, når uteluften strømmer gjennom spalteåpningen. Videre blir luftstrømmen utsatt for en volumutvidelse, gitt av raftekassens volum. Avslutningsvis vil luftstrømningen utsettes for en volumreduksjon, når luften strømmen mot luftespaltens nedre del. Det bemerkes at støttapet for raftekassene i dette prosjektet inkluderer friksjonstapet gjennom raftekassen.

Som nevnt, kan en se at støttapet over raftet blir større, ved økende spaltetverrsnitt. Trenden kan ikke direkte sammenlignes med strømningssteknikkens relasjoner, ettersom en må se på raftekassen som en serie av tverrsnittsendringer. De resterende resultatene er gitt henholdsvis i tabell 6.1.5 og 6.1.6. En kan også her observere at resultatene følger samme trend, nemlig at støttapskoeffisienten for raftekassen øker, ved økende spaltetverrsnitt.

Tabell 6.1.5. Støttapskoeffisient ξ (-), for raft – alternativ 1, ved varierende spaltehøyder. Spalteåpning i raft er utført som 2x25 mm spalter. Støttapskoeffisientene gjelder for spalter med og uten fluenetting.

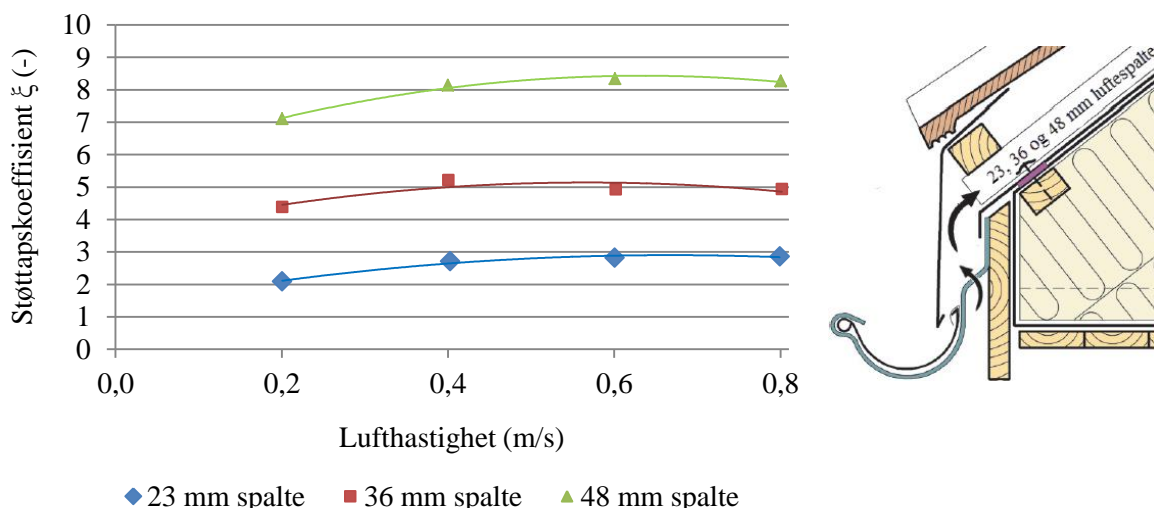
Lufthastighet	<u>Uten fluenetting</u>			<u>Med fluenetting</u>		
	23 mm spalte	36 mm spalte	48 mm spalte	23 mm spalte	36 mm spalte	48 mm spalte
0,4	0,76	0,71	1,24	1,47	2,08	2,89
0,6	1,14	1,24	1,84	1,69	2,26	3,20
0,8	1,28	1,44	2,09	1,70	2,27	3,20

Tabell 6.1.6. Støttapskoeffisient ξ (-), for raft – alternativ 1, ved varierende spaltehøyde. Spalteåpning i raft er utført som 5x10 mm spalter. Støttapskoeffisientene gjelder for spalter med og uten fluenetting.

Lufthastighet	<u>Uten fluenetting</u>			<u>Med fluenetting</u>		
	23 mm spalte	36 mm spalte	48 mm spalte	23 mm spalte	36 mm spalte	48 mm spalte
0,4	1,24	1,14	1,34	2,15	2,87	3,73
0,6	1,67	1,66	2,09	2,31	2,92	3,93
0,8	1,70	1,84	2,38	2,33	2,94	3,96

6.1.4. STØTTAP OVER RAFT - ALTERNATIV 2

I tillegg til å teste en tradisjonell utførelse av raftekassen, var det ønskelig å teste en mer moderne løsning. Raft-alternativ 2, er utført med (Byggforsk 525.102, figur 712b), som inspirasjon. Mer utdypet, illustrerer raft-alternativ 2 en løsning hvor raftekassen er innpakket, og luftingen i sin helhet foretas bak takrenna. Utførelse av raft alternativ 2 er å finne som vedlegg 3.2.2. I likhet med testene for raft-alternativ 1, er samtlige tester for raft-alternativ 2 utført med 36mm rettkantede steinlekter. I alternativ 2 er åpningsbredden bak takrenna konstant lik 25 mm.



Figur 6.1.5. Støttapskoeffisient ξ (-) for raft – alternativ 2 (uten fluenetting), ved varierende spaltehøyde.

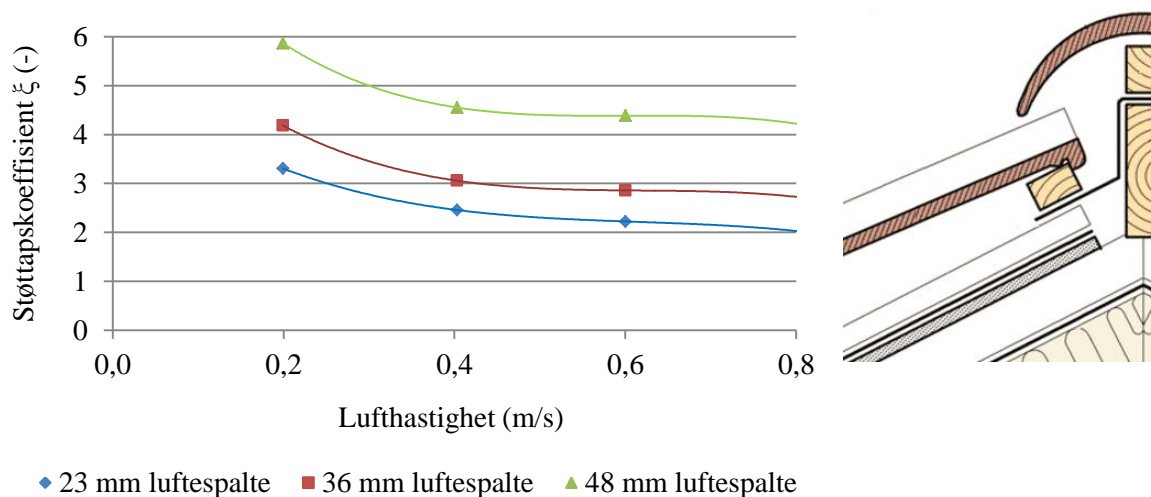
Slik figur 6.1.5 viser, oppleves en lik trend for begge raft-alternativene. Trenden for raft-alternativ 2, kan sies å visualiseres i større grad for alternativ 1. Dette skyldes at løsningen med lufting bak takrenna, gav et betydelig større trykktap over raftekassen. Slik det fremgår av tabell 6.1.7, vil støttapskoeffisienten for raft-alternativ 2 økes betraktelig, dersom det monteres fluenetting ved spaltens åpning.

Tabell 6.1.7. Støttapskoeffisient ξ (-), for raft – alternativ 2, ved varierende spaltehøyde. Spalteåpning i raft er utført som 1x25 mm spalte. Støttapskoeffisientene vises for både med og uten fluenetting montert.

Lufthastighet	Uten fluenetting			Med fluenetting		
	23 mm spalte	36 mm spalte	48 mm spalte	23 mm spalte	36 mm spalte	48 mm spalte
0,2	2,09	4,38	7,10	5,08	10,67	17,49
0,4	2,71	5,21	8,14	4,87	9,95	15,31
0,6	2,82	4,92	8,34	4,50	9,28	14,36
0,8	2,86	4,93	8,27	4,29	8,93	13,49

6.1.5. STØTTAP OVER MØNE

Selv om det er utført tidligere studier på trykktap over møne ved NTNU (Eian og Lyngestad, 1989) og (Blom, 1990), var det ønskelig å teste trykktapet over en møneløsning i inneværende oppgave. Møneløsningen er av hensiktsmessige årsaker holdt lik for samtlige tester. Dette grunnet at fokuset i denne oppgaven er rettet mot støttapskoeffisienter over steinleker og ulike løsninger for raftekassen. Utførelse av møneløsningen er illustrert i vedlegg 3.3.



Figur 6.1.6. Støttapskoeffisient ξ (-) for møneløsningen, ved varierende spaltehøyde.

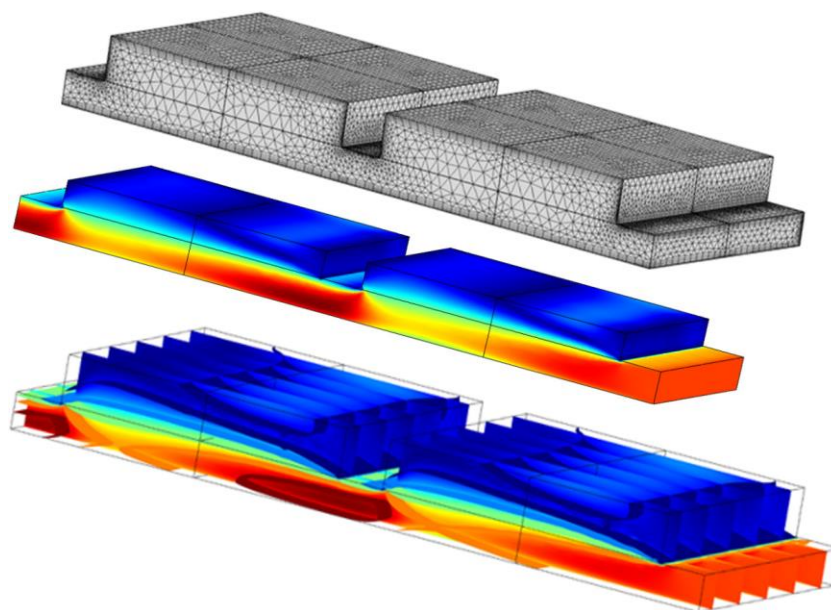
I likhet med resultatene for raftekassene, vil økt spaltetverrsnitt, alternativ spaltehøyde, medføre at støttapskoeffisienten over møne øker. Det observeres en større økning i støttapskoeffisienten ved å øke spaltehøyden fra 36 mm til 48 mm, sammenlignet med å øke spaltehøyden fra 23 mm til 36 mm. Resultatene fra møneløsningen er i sin helhet sammenfattet i tabell 6.1.8.

Tabell 6.1.8. Støttapskoeffisient ξ (-) for møneløsningen, ved varierende spaltehøyde.

Lufthastighet (m/s)	Støttapskoeffisient ξ (-)		
	23 mm spalte	36 mm spalte	48 mm spalte
0,2	3,31	4,19	5,87
0,4	2,46	3,06	4,55
0,6	2,22	2,86	4,39
0,8	2,02	2,71	4,20

6.2. NUMERISKE BEREGNINGER – COMSOL

Et av formålene i inneværende oppgave var å verifisere beregningsprogrammet COMSOL mot testresultatene. Alternativt sagt, var det ønskelig å se hvor godt COMSOL beregner virkeligheten. COMSOL har i denne oppgaven stått som en sekundær del, etter fullføring av det eksperimentelle arbeidet i laboratoriet. Innledningsvis ble luftespalten modellert, slik illustrert øverst i figur 6.2.1. Av hensyn til datakapasitet måtte det foretas enkelte forenklinger, som er omtalt ytterligere i kapittel 6.2.1.



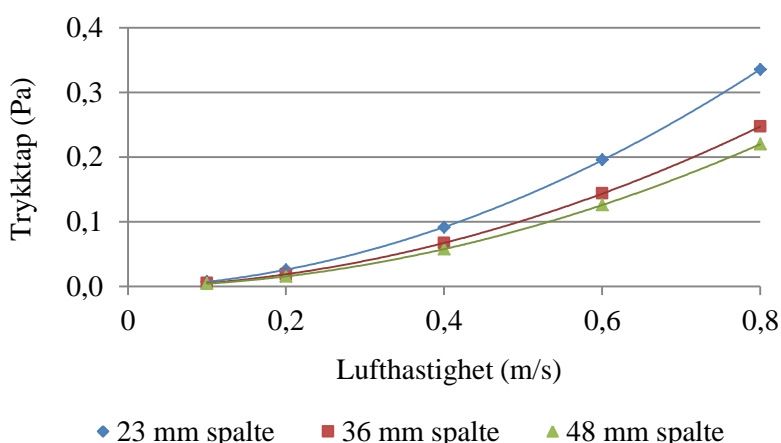
Figur 6.2.1. Modell av luftespalten i et skrått tretak (øverst), og lufthastigheten i luftespalten ved tvungen konveksjon (midten), samt strømningslinjer ved tvungen konveksjon (nederst). Figuren viser 48 mm steinlekker og en luftespalte på 36 mm.

6.2.1. FORENKLINGER

Av hensyn til datakapasitet og tid, er tre steinlekker modellert i COMSOL, sammenlignet med testmodellens 11 steinlekker. Videre var det hensiktsmessig å benytte et såkalt symmetriplan i COMSOL, som deler takets virkelige bredde i to. En mer betydningsfull parameter i forhold til datakapasitet og nødvendig tid per beregning, er det beregningsmessige rutenettet (mesh-grid). Dette er valgt grovt for beregningene i denne oppgaven, slik illustrert øverst i figur 6.2.1. For å kunne sammenligne resultatene fra testmodellen med COMSOL-beregninger, er trykkforskjellen over en lekt gitt av to målepunkt benyttet. Dersom en ser på øverste bilde i figur 6.2.1, kan en i overkant skimte to kryss på hver side av den midtre steinlekten. Disse kryssene representerer målepunktene for trykkavlesning, som er benyttet i COMSOL beregningene.

6.2.2. TRYKKTAP OVER LEKTER

I COMSOL settes referansetrykket, angitt som totaltrykk ved luftespaltens innløp, lik 1 (atm) = 101325 (Pa). I programmet avleses det totale trykket parallelt med luftstrømningen, henholdsvis før og etter steinlekten. Således får en ut forskjell i statisk trykk over steinlekten. Dette vil da gi en lik avlesningsprosedyre, som for testmodellen, med unntak i at absolutt trykk kan variere i mindre grad ved avlesningene på testmodellen. Ettersom det var ønskelig å sammenligne COMSOL med målinger, ble forskjell i statisk trykk over en steinlekt valgt som sammenligningsgrunnlag, da dette er ansett som det mest korrekte sammenligningsgrunnlag. Figur 6.2.2 viser forskjell i statisk trykk over en 30 mm rettkantet steinlekt ved varierende spaltehøyde.



Figur 6.2.2. Trykktap over en 30 mm rettkantet steinlekt ved varierende spaltehøyde.

Slik det fremgår av figur 6.2.2, vil en oppnå et redusert trykktap over en lekt, ved å øke luftespaltens høyde. Av tidsmessige årsaker, er arbeidet i COMSOL begrenset til beregning av trykktap for rettkantede steinlekter. Resultatene er gjengitt i sin helhet i tabell 6.2.1. Trenden og en sammenligning mot målte trykktap, er gitt i kapittel 7.2.

Tabell 6.2.1. Trykktap (Pa) over rettkantede steinlekter ved ulike spaltehøyder.

Lufthastighet	30 mm rettkant steinlekt			36 mm rettkant steinlekt			48 mm rettkant steinlekt		
	23 mm	36 mm	48 mm	23 mm	36 mm	48 mm	23 mm	36 mm	48 mm
0,1	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00
0,2	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02
0,4	0,09	0,07	0,06	0,09	0,07	0,06	0,10	0,07	0,05
0,6	0,20	0,14	0,13	0,20	0,14	0,12	0,21	0,15	0,11
0,8	0,34	0,25	0,22	0,34	0,24	0,21	0,36	0,26	0,19

6.3. FUKTBEREGNINGER - WUFI

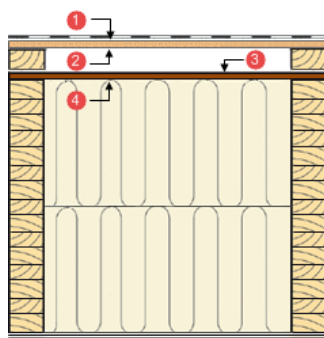
For å kunne kvantifisere luftespaltens innvirkning på fukt- og temperaturforhold i skrå tretak, er det i det følgende utført et flertalls parameterstudier i WUFI. Studiene omhandler parametere som innledningsvis ansees av stor betydning for fukt- og temperaturforhold i skrå tretak. I denne delen av oppgaven prioriteres resultatene av størst betydning, mens mindre betydelige resultater kommenteres generelt. Respektive parameterstudier er vedlagt oppgaven, i en mer detaljert form.

Takkonstruksjonen som ligger til grunn for parameterstudiene, er bygd opp med taket i ZEB Test Cell som inspirasjon. Valg av luftskifte for enkelte av parameterstudiene, er basert på resultater fra et regneark i byggforsk-miljøet. Regnearket beregner lufthastighet i luftespalten som funksjon av vindhastighet målt 10 meter over bakken, slik som for de fleste værstasjonene i Norge. Dataen som ligger til grunn for valg av luftskifte i WUFI, er gitt i tabell 6.3.1.

Tabell 6.3.1. Lufthastighet i spalten og tilhørende luftskifte for taket i Zeb Test Cell.

Vindhastighet ute (m/s)	Beregnet hastighet i luftespalten (m/s)	Luftskifte (h^{-1})
0,8	0,17	56
1	0,21	70
2	0,42	140
4	0,85	280
6	1,28	427

I parameterstudiene som ikke omhandler variabelt luftskifte, er luftskifte satt lik 50 luftomsetninger per time. For aktuell takkonstruksjon tilsvarer dette en lufthastighet i luftespalten i underkant av 0,17 m/s. Valget er tatt på bakgrunn av at resultatene betraktes på årsbasis, hvor det blir mer korrekt å benytte en årsmiddelverdi for lufthastigheten i luftespalten. I denne delen av oppgaven er hensikten å kartlegge trender, alternativt effekter av ulike parametere. Følgelig blir valget om å benytte et konstant luftskifte i studiene, en mer egnet tilnærming av virkeligheten, når parametere som spaltehøyde og isolasjonsmengde studeres. I studiene som følger, er en forenklet modellering av luftsjiktet i luftespalten benyttet. Det må bemerkes at trendene og effektene i det følgende har tilknyttet en usikkerhet, basert på forenklinger ved modellen. Forenklinger ved modellen, og dets begrensninger er omtalt i vedlegg 4.1. I parameterstudiet er ulike sjikt vurdert, slik vist i figur 6.3.1.

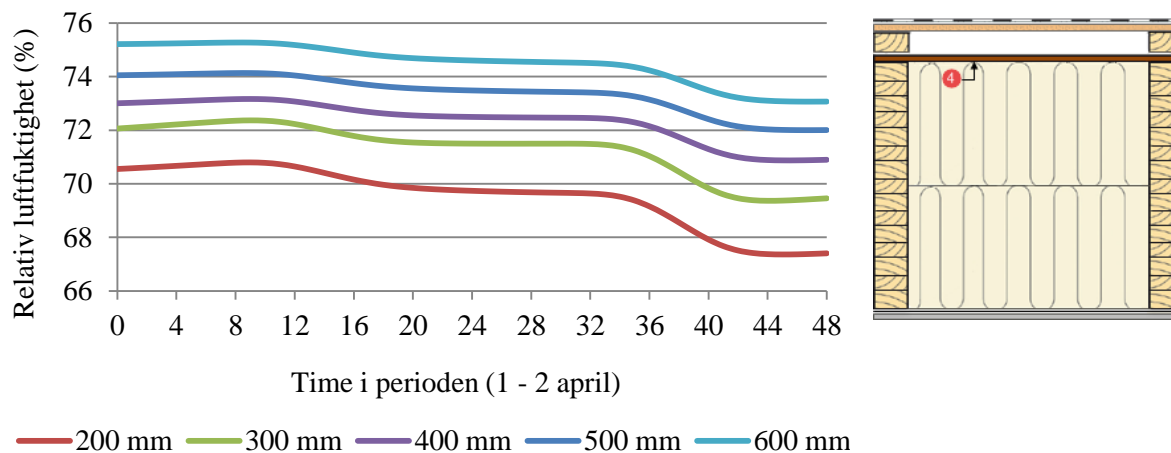


- Sjikt 1 – taktroas overside, under membran
- Sjikt 2 – taktroas underside
- Sjikt 3 – undertakets overside
- Sjikt 4 – undertakets underside

Figur 6.3.1. Definisjon av hvilke sjikt i taket som er studert.

6.3.1. EFFEKTEN AV ØKT ISOLASJONSTYKKELSE

Økt isolasjonstykkelse i skrå tretak medfører at vindspærren blir kaldere. Sett i lys av en stadig kaldere vindspærre, er fuktforholdene på undertakets underside av interesse å studere. Dersom en betrakter en vårperiode på to dager, kan effekten av økt isolasjonstykkelse i et skrått tretak illustreres slik vist i figur 6.3.2. Aktuelt parameterstudie er ytterligere beskrevet i vedlegg 4.2.



Figur 6.3.2. Relativ luftfuktighet for undertakets underside, ved varierende isolasjonstykkelse.

Dersom en skal analysere effekten av økte isolasjonstykkelser med tanke på økt relativ luftfuktighet, bør en se på en lengre periode, eksempelvis årsgjennomsnittlig relativ luftfuktighet. Ved en årsgjennomsnittlig betraktning, fremgår det at effekten av å øke isolasjonstykkelsen fra 300 mm til 500 mm, tilsvarer en økning i relativ luftfuktighet for undertaket på 1,8 %.

TEMPERATURFORHOLD I LUFTEPALTEN

Effekten av økt isolasjonstykkelse, er slik nevnt tidligere, en stadig kaldere vindspærre. Videre vil varmetapet gjennom takkonstruksjonen reduseres, hvilket medfører en stadig kaldere luftespalte. Derfor forstås faren for snøsmelting redusert, i takt med økt isolasjonstykkelse i skrå tretak. Dersom en betrakter årsgjennomsnittlig temperatur for undertakets overside, er effekten av å øke isolasjonstykkelsen fra 300 mm til 500 mm, en reduksjon tilsvarende 0,2 °C, alternativt 2,2 %.

UNDERKJØLING AV TAKFLATEN

Ved økt isolasjonstykkelse i et skrått tretak, vil undertakets overside i tillegg til å bli kaldere, underkjøles i stadig større grad og omfang. Eksempelvis vil effekten av å øke isolasjonstykkelsen fra 300 mm til 500 mm, resultere i en 15,7 % økning av underkjølingens varighet, samt en 6,7 % økning av underkjølingens størrelsesorden, for undertakets overside. Underkjøling av takflaten ved økt isolasjonstykkelse, er ytterligere behandlet i vedlegg 4.2.

POTENSIAL FOR KONDENS

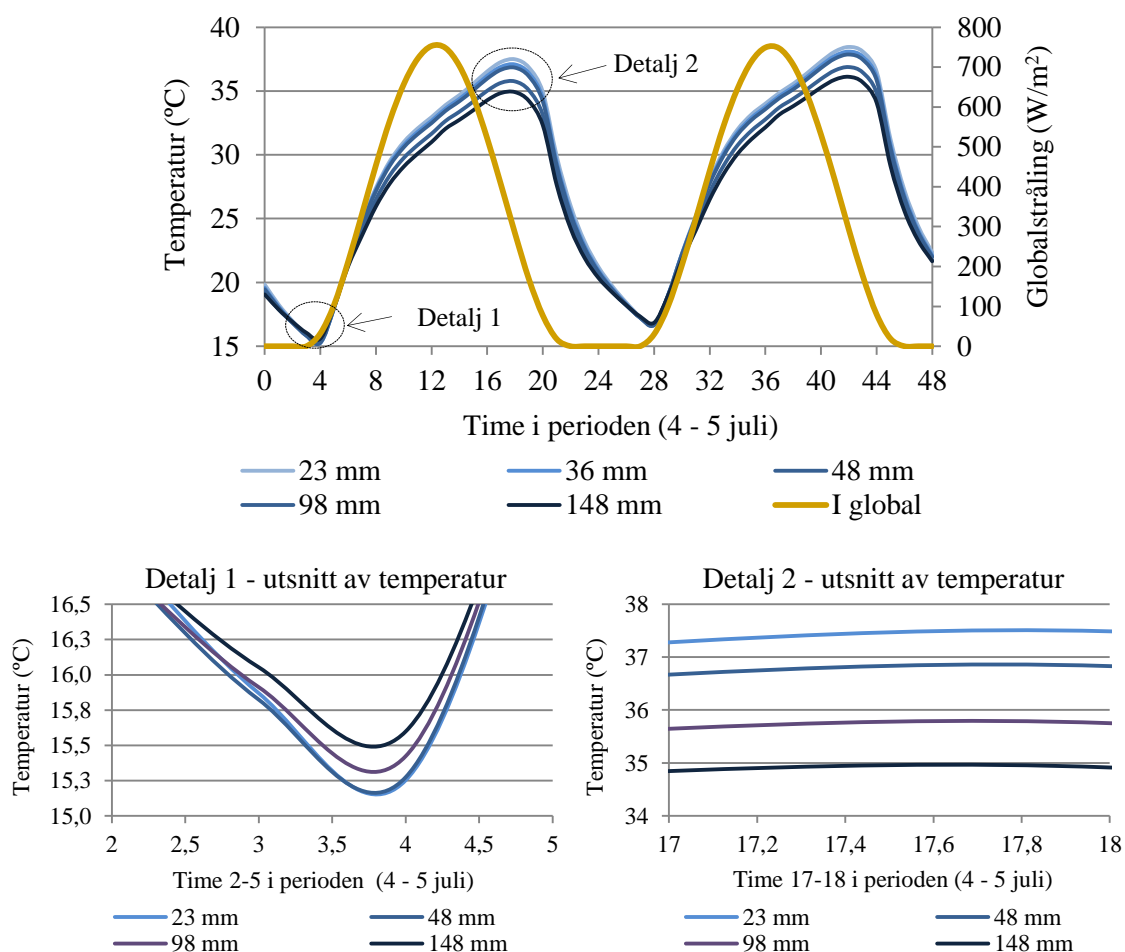
Ved en årsgjennomsnittlig betraktning av kondenspotensialet for undertakets overside, fremgår det at effekten av økt isolasjonstykkelse er neglisjerbar. Dette grunnet at potensialet gitt som (g/m³h) er minimalt. Teoretisk sett, vil effekten av å øke isolasjonstykkelsen fra 300 mm til 500 mm, medføre en økning av potensialets størrelse tilsvarende 6,4 %, og en reduksjon av potensialets varighet tilsvarende 1 %.

6.3.2. EFFEKTEN AV ØKT SPALTEHØYDE

I det følgende er spaltehøydens innvirkning på fukt- og temperaturforhold skrå trectak studert. Aktuelt parameterstudie og dets resultater er ytterligere omhandlet i vedlegg 4.3.

TEMPERATURFORHOLD I LUFTESPALTEN

For bygningsintegreerte solceller er undertakets temperatur, alternativt temperaturen på elementenes underside av stor interesse. Dette grunnet at effektiviteten for slike anlegg reduseres i takt med økende modultemperatur. Undertaket, som her omtales taktro, er studert ved å sammenligne dets temperatur ved ulike spaltehøyder under dimensjonerende sommerforhold, og ved en årsgjennomsnittlig betraktning. Med dimensjonerende sommerforhold, menes den perioden hvor utetemperaturen og globalstrålingen er høyest. Perioden er valgt ut på bakgrunn av Oslo klima (MDRY), som benyttes i WUFI.



Figur 6.3.3. Temperatur for luftespaltens øvre del under dimensjonerende sommerforhold, ved varierende spaltehøyde.

I store spaltetverrsnitt vil temperaturamplituden for taktroas underside reduseres, sammenlignet med små spaltetverrsnitt. Temperaturens amplitude kan visualiseres gjennom detalj 1 og detalj 2, i figur 6.3.3. Sammenlignet med små spaltetverrsnitt, vil store spaltetverrsnitt bli varmere ved lav utetemperatur, grunnet redusert underkjøling. Videre vil store spaltetverrsnitt bli kaldere ved perioder med høy utetemperatur og intens solstråling, grunnet økt varmetransport, sammenlignet med små spaltetverrsnitt.

VENTILASJONSEVNE

Ved planlegging av luftespalter i skrå trectak må et flertalls interesser hensyntas. Eksempelvis må det for takets ventilasjonsevne, skilles mellom ventilert mengde og tilskudd i spalten. Det fremgår av parameterstudiet at dersom spaltehøyden økes, øker varmetransporten ut fra luftespalten, samtidig som tilskuddet til spalten øker. Tilsvarende vil fukttransport og fukttilskuddet i luftespalten øke, ved økende spaltetverrsnitt. På bakgrunn av resultatene i respektive studie, kan ikke argumentet om å øke spaltehøyden for å ytre takets lufteevne direkte forsvares. Flere fysikalske effekter må studeres, dersom behovet for å øke spaltehøyden ytres i prosjekteringssammenheng.

FUKTFORHOLD I LUFTESPALTEN

Effekten av økt spaltetverrsnitt er kvantifisert ved å sammenligne årsgjennomsnittlig relativ luftfuktighet for taktroas nedre del mot luftespalten. Det observeres at spaltens omsluttende flater påvirkes i størst grad, mens undertakets underside påvirkes i begrenset grad, ved økte spaltetverrsnitt. Resultatene viser at økt spaltehøyde resulterer i en større amplitude for relativ luftfuktighet for luftespaltens omsluttende flater. Dersom en fokuserer på taktroas underside, vil en økning fra 23 mm til 48 mm spaltehøyde medføre en økning i relativ luftfuktighet på ca 2 %. En økning fra 48 mm til 98 mm luftespalte, medfører på sin side en økning tilsvarende 1,8 % i relativ luftfuktighet for taktroas underside.

UNDERKJØLING

Ved økende spaltetverrsnitt vil utetemperaturen få en mer betydelig innvirkning på fukt- og temperaturforholdene i en luftespalte. I likhet med foregående effekter, er underkjølingen størrelsesorden og varighet ved økte spaltetverrsnitt av interesse. Det fremgår av resultatene at underkjølingen av taktroas underside reduseres, i takt med økende spaltetverrsnitt.

Underkjølingens varighet vil på sin øke, i takt med økende spaltetverrsnitt. Dette gjelder spesielt for vår, sommer og høst. På en annen side kan en observere at både underkjølingens varighet og størrelse reduseres for undertakets overside, ved økende spaltetverrsnitt. For undertakets overside vil effekten av å øke spaltehøyden fra 23 mm til 48 mm, medføre at underkjølingens varighet reduseres med 2,5 %, samt at dets størrelse reduseres med 13 %.

POTENSIAL FOR KONDENS

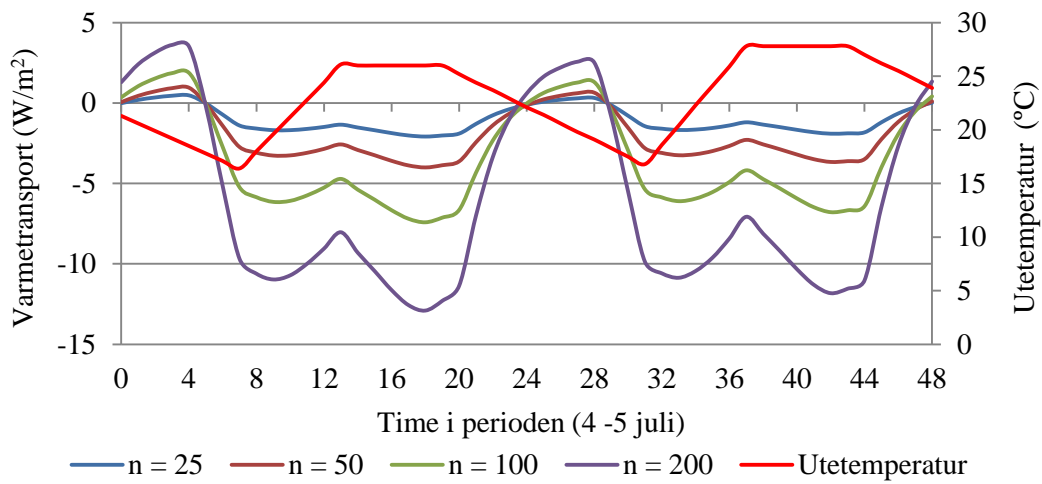
Ettersom uteluften inneholder mindre fukt per volumenhet under vår- og høstperiodene, sammenlignet med sommerperioden, vil kondenspotensialet reduseres under disse periodene ved økte spaltetverrsnitt. På en annen side, vil kondenspotensialet for store spaltetverrsnitt øke betraktelig under sommerperioden, sammenlignet med små spaltetverrsnitt. Det bemerkes at potensialets størrelse øker i langt større grad enn dets varighet, ved økende spaltetverrsnitt.

6.3.3. EFFEKTEN AV ØKT LUFTHASTIGHET I LUFTESPALTEN

I det følgende er lufthastighetens innvirkning på fukt- og temperaturforhold i et skrått tretak studert. Aktuelt parameterstudie og dets resultater er ytterligere omhandlet i vedlegg 4.4.

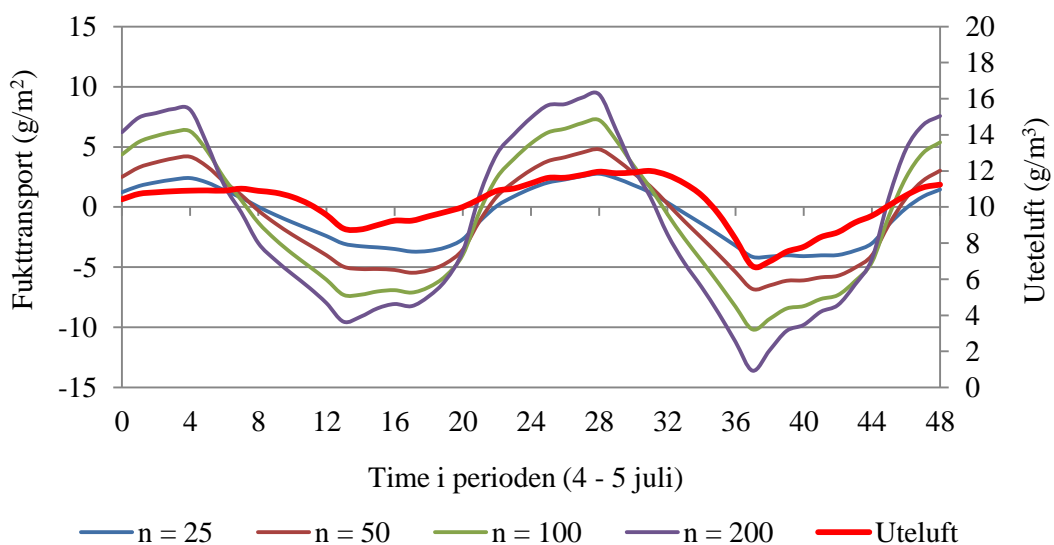
VENTILASJONSEVNE

Ved vurdering av en overordnet ventilasjonsevne for luftespalten i et skrått tretak, bør både uteklima og geometrisk utforming av luftespalten legges til grunn. Videre bør ventilasjonsevnen beregnes på måneds- eller årsbasis. Slik det fremgår av figur 6.3.4, vil lufthastigheten i luftespalten ha en markant innvirkning på luftespaltens varmetransport, samt tilskuddets størrelsesorden, under dimensjonerende sommerperiode.



Figur 6.3.4. Varmetransport under dimensjonerende sommerdøgn, ved varierende luftskifte (h^{-1}).

Det observeres at effekten av økt lufthastighet har størst innvirkning på varmetransport i luftespalten. Det fremgår av parameterstudiet at effekten av å doble luftomsetningen, fra 25 omsetninger i timen, medfører en økning av varmetransport i luftespalten tilsvarende 92 %, mens fukttransporten øker med 60 %.

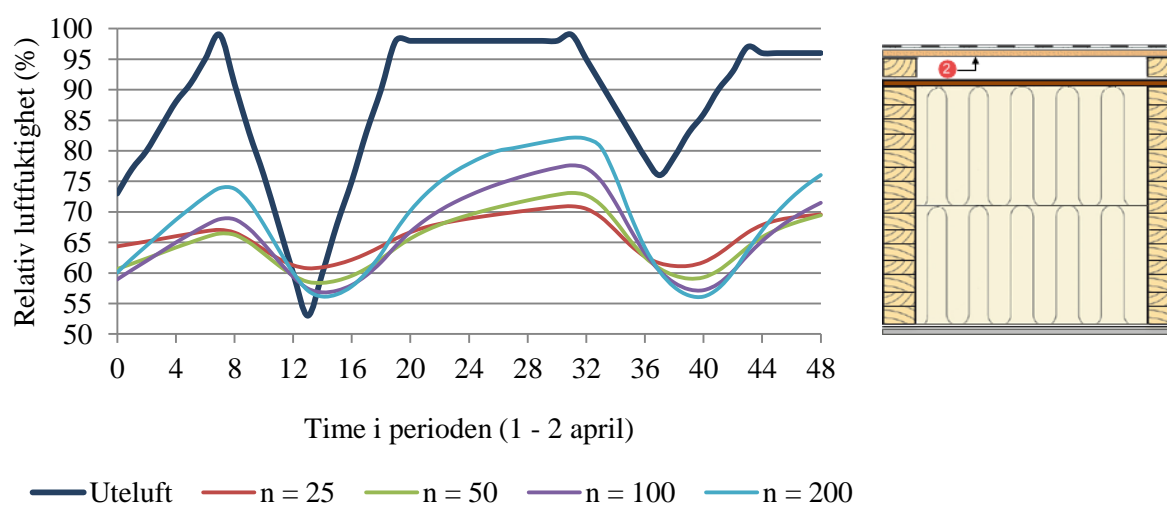


Figur 6.3.5. Fukttransport under dimensjonerende sommerdøgn, ved varierende luftskifte (h^{-1}).

Ved økt lufthastighet i luftespalten, og dermed økt luftskifte, vil uteluften strømme hurtigere gjennom luftespalten. Dette medfører at mer fukt per tidsenhet dras gjennom spalten, gitt av uteluftens fuktinnhold, slik illustrert i figur 6.3.5. Dersom fuktinnholdet i luftespalten er mindre enn for uteluften, vil uteluften som strømmer gjennom luftespalten virke som et fukttilskudd i luftespalten, og motsatt. Det bemerkes at netto fukttransport øker, ved økende luftskifte i luftespalten. Til gjengjeld øker fukttilskuddet i luftespalten ved økende luftskifte, hvilket er kvantifisert i det følgende.

FUKTFORHOLD I LUFTESPALTEN

For å kartlegge effekten av økt lufthastighet, er årsgjennomsnittlig relativ luftfuktighet for luftespaltens omsluttende flater studert. Fra resultatene, gitt i vedlegg 4.4, ser en at taktroas underside og undertakets overside opplever omtrent 2 % økning i relativ luftfuktighet, ved en økning i luftskiftet, fra 25 til 50 luftomsetninger i timen.



Figur 6.3.6. Relativ luftfuktighet for taktroas underside, ved varierende luftskifte (h^{-1})

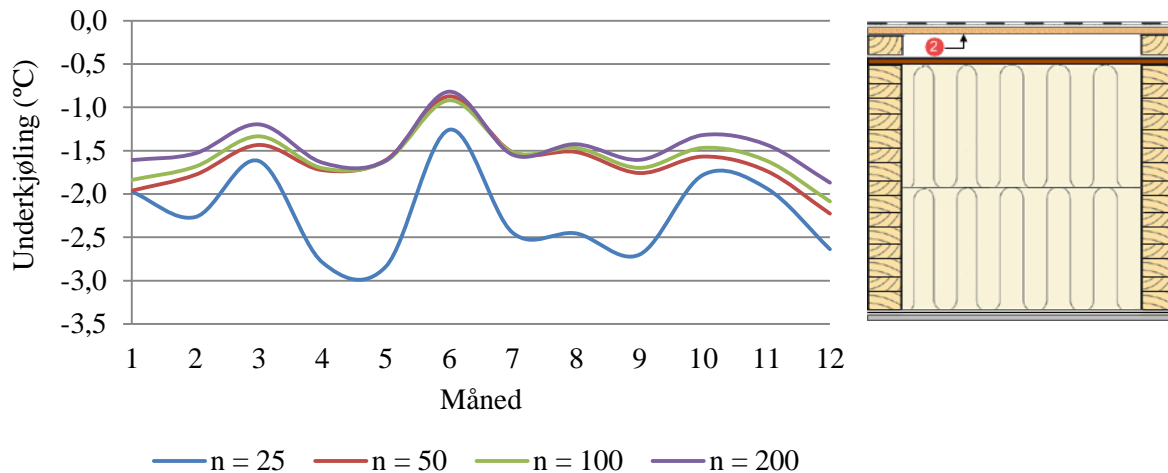
Slik det fremgår av figur 6.3.6, vil amplituden for relativ luftfuktighet øke, ved økende luftskifte i luftespalten i et skrått tretak. Dette grunnet at fukttilskuddet i luftespalten øker i enkelte perioder, gitt av fuktinnholdet i uteluften, som strømmer gjennom luftespalten.

TEMPERATURFORHOLD I LUFTESPALTEN

Lufthastighet er sammen med spaltehøyde ansett som faktorer av størst betydning, vedørende temperaturforskjeller over luftespalten. Dersom en ser på årsgjennomsnittlig temperatur, i tilfellene hvor utetemperaturen er over null grader, medfører økt lufthastighet en lavere spaltetemperatur. For tilfellene hvor utetemperaturen er under null grader, medfører økt lufthastighet en varmere spalte. En detaljert fremvisning av resultatet er gitt i vedlegg 4.4.

UNDERKJØLING

I tilfeller med underkjøling av takflaten, domineres flaten av en negativ strålingsutveksling mot atmosfæren. Det er videre interessant å studere effekten av økt lufthastighet i spalten, og dets effekt på underkjølingens størrelsesorden og varighet. Slik figur 6.3.7 viser, vil underkjølingen størrelse reduseres betraktelig, ved økt lufthastighet i spalten.



Figur 6.3.7. Månedsgjennomsnittlig underkjøling av taktroas underside ved varierende luftskifte i luftespalten (h^{-1}).

Det kan observeres at underkjølingen reduseres markant fra et luftskifte tilsvarende 25 omsetninger i timen, til et luftskifte på 50 omsetninger i timen. Videre observeres en begrenset effekt ved ytterligere økt luftomsetning i luftespalten. For å kunne kartlegge effekten mer detaljert, er årsgjennomsnittlig underkjøling studert ytterligere. Slik det fremgår av aktuelt parameterstudie, vil økt lufthastighet i luftespalten bidra både til å redusere underkjølingens varighet og dets størrelse.

Underkjøling av takflaten medfører, slik nevnt i oppgavens kapittel 4, at takflatens temperatur kjøles ned under utetemperaturen. Desto større opptredende underkjøling, jo større differanse kan observeres mellom takflatens temperatur og utetemperaturen. Følgelig vil uteluften som strømmer gjennom raftekassen og opp gjennom takflaten, være varmere enn flatene som underkjøles. Derfor kan en si at utetemperaturen vil bidra til å varme opp flatene som underkjøles. Mer presist sagt, vil konvektiv varmetransport fra spalteluften til spaltens omsluttende flater medfører oppvarming av flatene. Det kan gjennom dette, og foregående parameterstudie vedrørende varierende spaltehøyde, observeres at underkjølingens størrelse og varighet reduseres, i takt med økt lufthastighet og økt spaltehøyde.

POTENSIAL FOR KONDENS

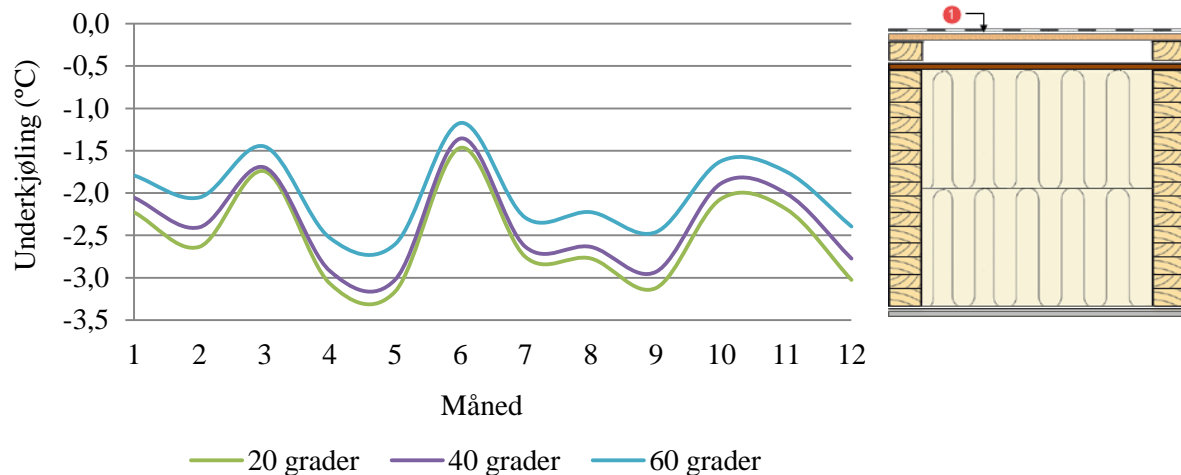
Lufthastighetens effekt på kondenspotensialets varighet, vil på sin side variere gjennom et år. Eksempelvis vil effekten av økt lufthastighet i spalten være forlenget varighet av underkjølingen under vår og høst. Det kan observeres at potentialets størrelse reduseres i betraktelig større grad enn dets varighet, ved økt lufthastighet i luftespalten. En mer detaljert kvantifisering av lufthastighetens effekt på kondenspotensialet er gitt i vedlegg 4.4

6.3.4. EFFEKTEN AV ØKT TAKHELNING

I det følgende er takhelningens innvirkning på fukt- og temperaturforhold i et skrått tretak studert. Aktuelt parameterstudie og dets resultater er ytterligere omhandlet i vedlegg 4.5.

UNDERKJØLING

I henhold til det fysikalske grunnlaget i oppgavens kapittel 4, som beskriver underkjøling, er underkjølingens størrelse avhengig av takets vinkel. Slik det fremgår av figur 6.3.8, vil underkjølingen av et skrått tretak reduseres i takt med økende takvinkel.



Figur 6.3.8. Månedsgjennomsnittlig underkjøling av taktroas overside, ved varierende takhelning.

I likhet med underkjølingens størrelse, vil underkjølingens varighet reduseres i takt med økende takhelning. Det bemerkes at denne effekten er mindre betydelig, sammenlignet med underkjølingens størrelse. Tak med liten helning vil oppleve et større netto strålingstap, hvilket medfører økt underkjøling, sammenlignet med tak med stor helning.

POTENSIAL FOR KONDENS

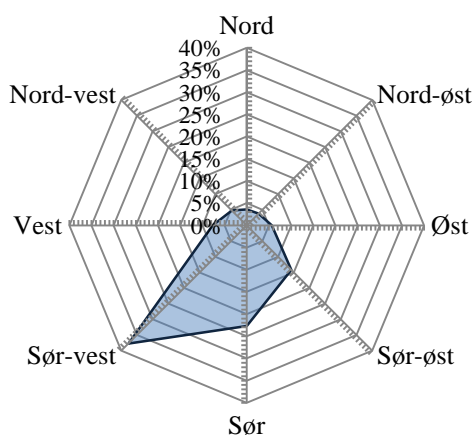
Potensialet for kondens vil som for underkjøling av takflaten, reduseres ved økt takhelning. Det bemerkes at effekten av økt takhelning er størst under våren og sommeren. Likeledes vil kondenspotensialets varighet reduseres ved økt takhelning. Reduksjonen i potensialets varighet observeres størst for sommerhalvåret. Ved en årsgjennomsnittlig betraktning, ser en at reduksjonen i kondenspotensialets størrelse er betydelig større enn dets varighet.

6.4. MÅLINGER VED ZEB – TEST CELL

Lufthastighet i luftespalten i skrå tretak, er en viktig parameter, for slike takkonstruksjoners fukt- og varmetekniske ytelse. Ettersom det per dags dato eksisterer begrenset med felldata fra lufthastighet i luftespalter i skrå tretak, var det av interesse å studere dette i inneværende oppgave. Måleperioden som fremstilles er (22.03.2016 – 01.04.2016). Måleutstyr som benyttes er omtalt i kapittel 5.3, mens en detaljtegning av det skrå tretaket i ZEB Test Cell er å finne som vedlegg 5.1

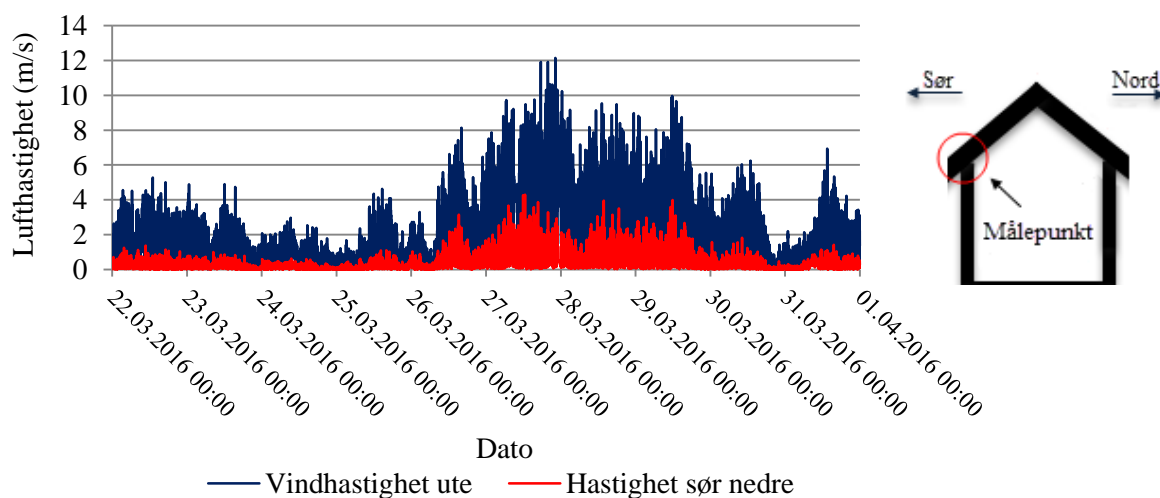
6.4.1. LUFTHASTIGHET I TAKETS LUFTEPALTE

Slik figur 6.4.1. viser, kommer majoriteten av vindbelastningen fra sør-vest. Det er i det følgende valgt å fremstille måledata fra luftespalten på søndre side av bygget. Sensoren som ligger til grunnlag for måledata i luftespalten, er plassert 500 mm opp fra raftekassen. Videre står klimastasjonen, som logger vindhastigheten ute, i en 10 meters høyde, målt fra terrenget.



Figur 6.4.1. Vindretning i måleperioden.

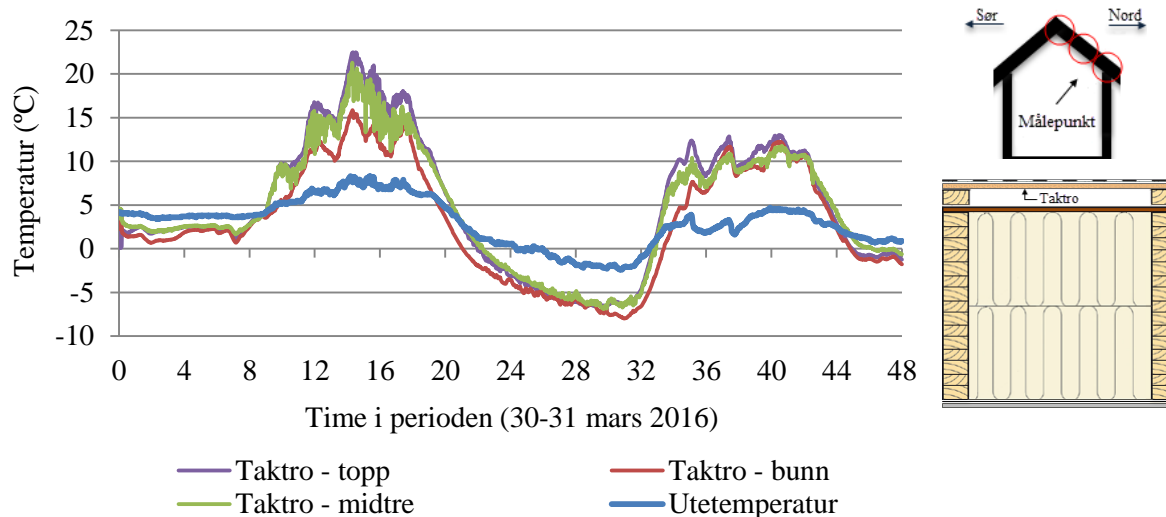
Figur 6.4.2. viser vindhastigheten ute, sammen med lufthastighet i luftespalten. Det bemerkes at det mangler en time, (22.00-23.00) den 27.03.2016.



Figur 6.4.2. Vindhastighet ved nedre del av taket på søndre side av bygget. Figuren viser vindhastighet ute målt i en høyde på 10 meter, og samtidig opptrедende lufthastighet i luftespalten.

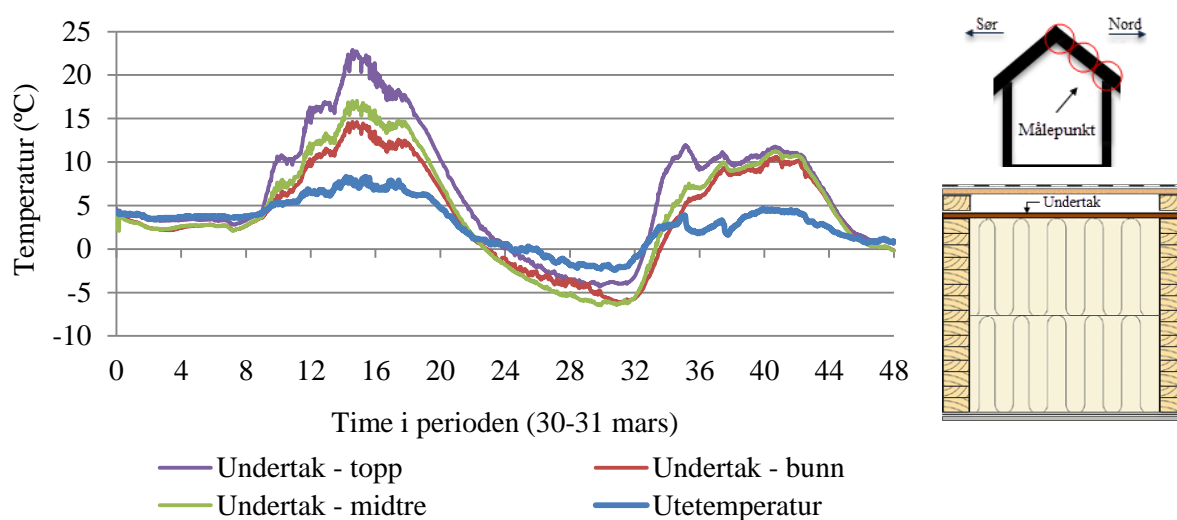
6.4.2. TEMPERATURFORHOLD I LUFTESPALTEN

I det følgende er nordre takflate grunnlaget for fremstillingen. Nordre flate er valgt på grunnlag av at denne takflaten er mer kritisk rent fuktteknisk, sammenlignet med takflater mot sør. Dette grunnet at takflater mot nord ikke opplever oppvarming i samme grad som takflater mot sør. Ringvirkningen av redusert oppvarming, er økt relativ luftfuktighet for undertak og taktro mot nord. Videre observeres en variasjon i taktroas og undertakets temperatur langs takplanet, fra raft til møne, slik illustrert i figur 6.4.3 og 6.4.4.



Figur 6.4.3. Temperatur for taktroa på nordre del av taket, ved ulike plasseringer i takplanet.

Fra figur 6.4.3 ser en at nedre del av taket er mer preget av uteklimaet, mens midtre og øvre del av taket er varmere. I likhet med taktro og undertak, vil spalteluftens temperatur øke langs takplanet fra raft mot møne, hvilket ikke fremkommer av figurene i dette kapittelet.

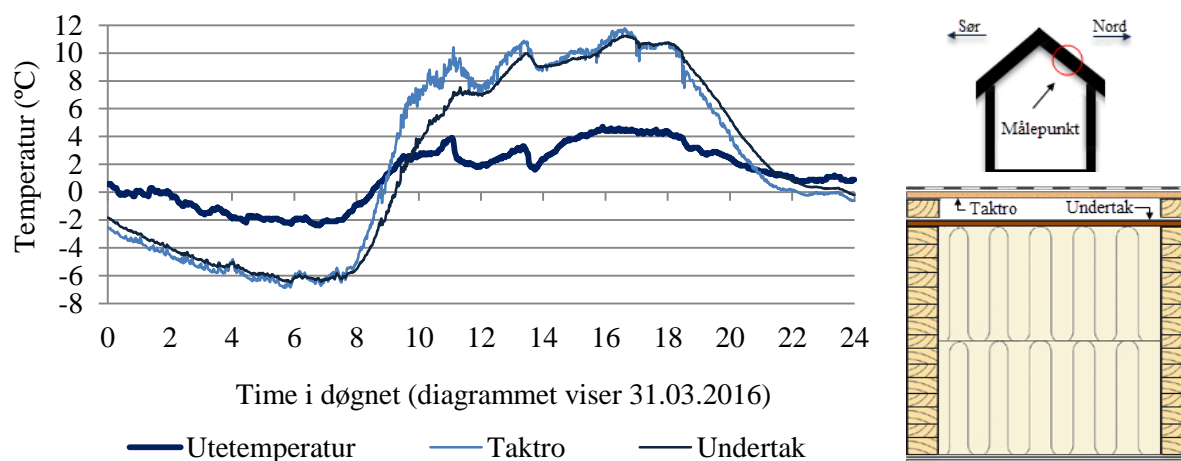


Figur 6.4.4. Temperatur for undertaket på nordre del av taket, ved ulike plasseringer i takplanet.

Slik det fremgår av henholdsvis figur 6.4.3 og 6.4.4, observeres en større forskjell langs takplanet for undertaket, sammenlignet med taktroa. Dette kan ha sin årsak i at undertaket er i mindre grad påvirket av solstråling, og forskjellen langs takplanet i større grad påvirkes av luftstrømningen i luftespalten for undertaket.

6.4.3. UNDERKJØLING AV TAKFLATEN

Ettersom underkjøling av takflaten er av interesse i dette prosjektet, er dataen fremstilt mer fokusert i det følgende. Slik figur 6.4.5 viser, vil taktroa og undertaket midt på takplanet på den nordre siden av bygget, underkjøles med ca 4,5 °C. Den største underkjølingen observeres for taktroa ved raftekassen på den nordre siden av bygget, hvor underkjølingen er avlest 6 °C.



Figur 6.4.5. Underkjøling av taktro og undertak. Plasseringen viser målepunktet i midten av takplanet mot nord.

Tabell 6.4.1 og 6.4.2 viser underkjølingens varighet og maksimale størrelse, henholdsvis for søndre og nordre takflate. En ser tydelig at taktroa preges i størst grad, i forhold til varighet og underkjølingens størrelse. Undertaket vil i likhet med taktroa underkjøles betydelig, men med mindre varighet og størrelse, sammenlignet med taktroa. Perioden som fremstilles er basert på målinger hvert minutt under aktuell måleperiode, som totalt er 240 timer/ 14 400 minutter.

Tabell 6.4.1. Sammenligning av underkjøling ved ulike posisjoner i taket, for søndre del av taket.

Sensor	Antall minutter	Andel av måleperioden	Største underkjøling (°C)
Sør (A) nede, undertak	6912	47,99 %	-4,22
Sør (A) midt, undertak	6937	48,16 %	-4,80
Sør (A) topp, undertak	6158	42,75 %	-4,34
Sør (A) nede, taktro	8205	56,97 %	-5,93
Sør (A) midt, taktro	7617	52,88 %	-5,29
Sør (A) topp, taktro	7363	51,12 %	-4,43

Tabell 6.4.2. Sammenligning av underkjøling ved ulike posisjoner i taket, for nordre del av taket.

Sensor	Antall minutter	Andel av måleperioden	Største underkjøling (°C)
Nord (A) nede, undertak	7284	50,57 %	-4,83
Nord (A) midt, undertak	7147	49,62 %	-5,13
Nord (A) topp, undertak	5704	39,60 %	-4,09
Nord (A) nede, taktro	8297	57,61 %	-5,94
Nord (A) midt, taktro	7428	51,57 %	-4,82
Nord (A), topp, taktro	7624	52,93 %	-5,17

7. DISKUSJON

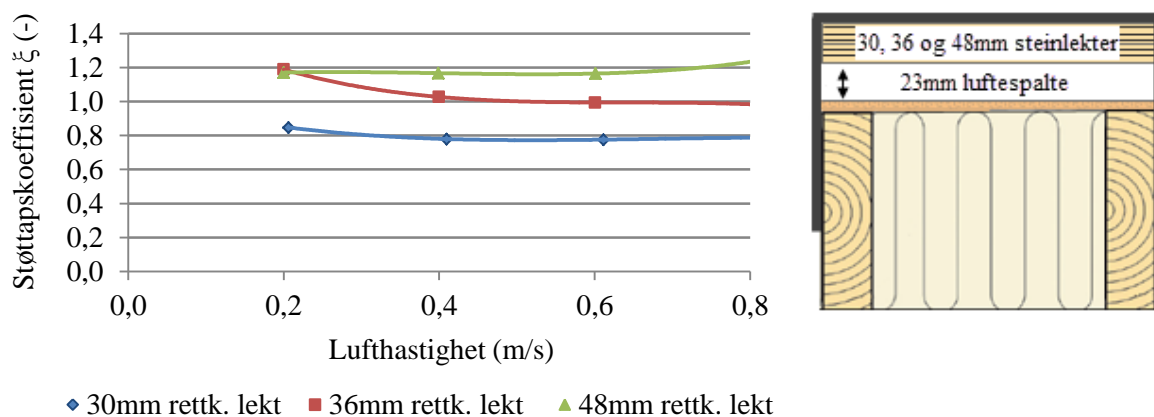
7.1. SAMMENLIGNING AV MÅLINGENE PÅ TESTMODELLEN

7.1.1. FRIKSJONSTAP

Ettersom det ikke har latt seg gjøre å finne sammenligningsgrunnlag for friksjonstapet i luftespalten, er friksjonstapet ikke ytterligere omhandlet. En alternativ metode ville vært og sammenlignet friksjonstapet mot empiriske formler, som baserer seg på spaltens geometri og ruhet. Ruhet for spaltens omsluttende flater er ikke målt i dette prosjektet, hvilket er grunnlaget for at en videre sammenligning mot empiriske formler utelates i denne oppgaven.

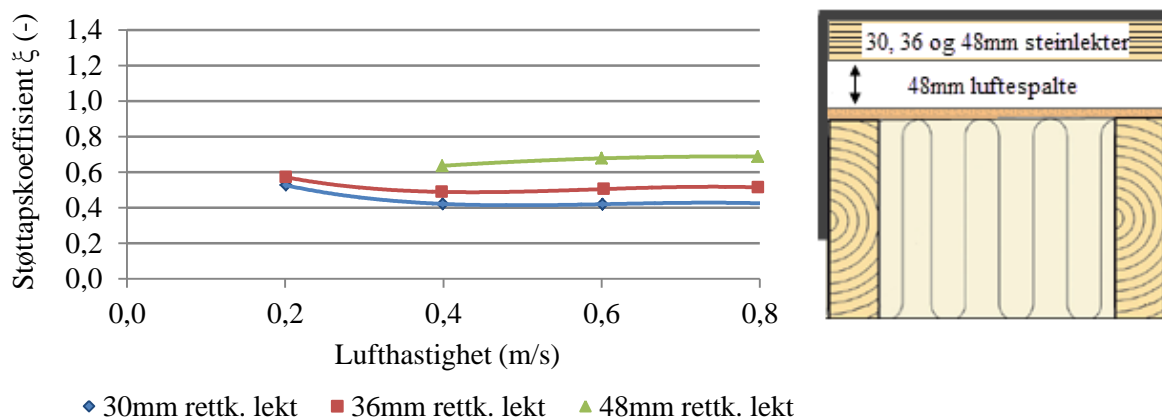
7.1.2. STØTTAP FOR RETTKANTEDE STEINLEKTER

Slik det fremgår av figur 7.1.1, vil effekten av å øke steinlektenes høyde medføre en økning i støttapskoeffisienten. Således forstås effekten av å øke steinlektenes høyde, i tilfellene hvor spaltehøyden er fastsatt, som uten eller med begrenset effekt med tanke på luftstrømningens størrelsesorden.



Figur 7.1.1. Støttapskoeffisient ξ (-) for varierende lektehøyder ved 23 mm luftespalte.

Videre viser figur 7.1.2 at økningen i støttapskoeffisienten ved økt høyde på steinlektene reduseres, sammenlignet med mindre steinlekker.



Figur 7.1.2. Støttapskoeffisient ξ (-) for varierende lektehøyder ved 48 mm luftespalte.

Dersom tabell 6.1.2 legges til grunn, kan effekten av å øke spaltehøyden sammenlignes med effekten av å øke steinlektenes høyde. Videre er det av interesse å studere effekten av å øke luftespaltens høyde, i tilfellene hvor steinlektenes høyde er fastsatt. I tabell 7.1.1 er økningen i støttapskoeffisienten ved økte spaltehøyder studert. Sagt på en måte, viser tabell 7.1.1 endringen i trykktapet over en steinlekt, for spaltene som er 36 og 48 mm høyde, sammenlignet med luftespaltene som er 23 mm høye.

Tabell 7.1.1. Effekten av å øke luftespaltens høyde, ved ulike rettkantede steinlekter. Tabellen viser reduksjon i støttapskoeffisient ξ (-) for de ulike lektedimensjonene, når spaltehøyden økes utover 23 mm.

Lufthastighet	30 mm rettkant steinlekt			36 mm rettkant steinlekt			48 mm rettkant steinlekt		
	23 mm	36mm	48mm	23 mm	36mm	48mm	23 mm	36mm	48mm
0,2	-	-	-37,9 %	-	-40,2 %	-51,9 %	-	-42,2 %	-
0,4	-	-26,0 %	-45,9 %	-	-46,7 %	-58,9 %	-	-33,6 %	-45,7 %
0,6	-	-31,7 %	-46,1 %	-	-45,5 %	-57,5 %	-	-31,1 %	-42,1 %
0,8	-	-34,1 %	-45,5 %	-	-38,2 %	-56,7 %	-	-29,4 %	-41,2 %
Snitt	-	-30,6 %	-43,9 %	-	-42,6 %	-56,3 %	-	-34,1 %	-43,0 %

Det bemerkes at tabell 7.1.1. må sees i sammenheng med tabell 6.1.2, hvor støttapskoeffisientenes størrelsesorden fremgår. Fra tabell 7.1.1 kan en se at effekten av å øke spaltehøyden er størst dersom det benyttes 36 mm rettkantede steinlekter. Dersom en ser på gjennomsnittet for de tre ulike steinlektene, er effekten av å øke spaltehøyden fra 23 mm til 36 mm, en reduksjon i støttapskoeffisienten på 36 %. Effekten av å øke spaltehøyden fra 23mm til 48 mm er på sin side en reduksjon tilsvarende 48 %. Følgelig forstås effekten av å øke spaltehøyden lønnsomt, dersom målet er å oppnå størst mulig luftstrømning i luftespalten.

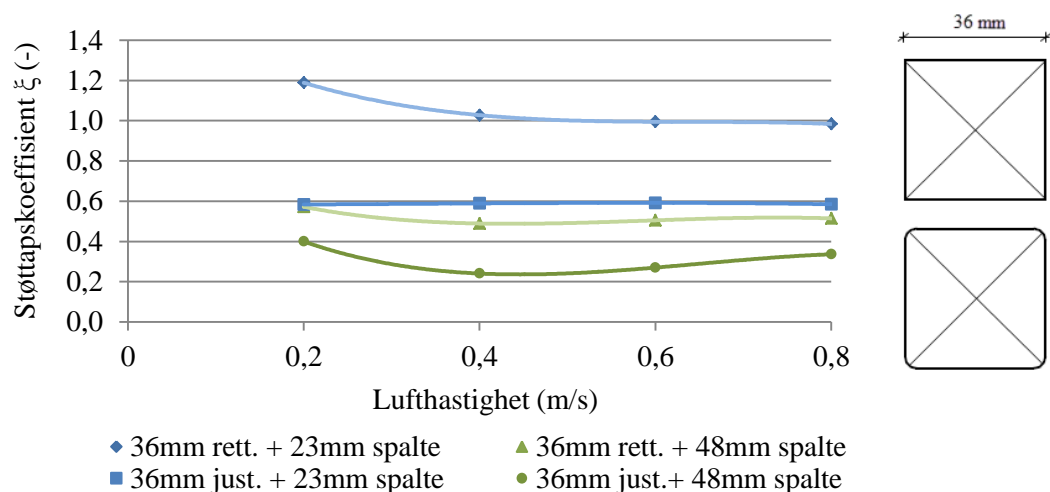
Dersom tabell 6.1.2 legges til grunn for en sammenligning, kan en se at den gjennomsnittlige effekten av å øke steinlektenes høyde fra 30 mm til 36 mm, er en økning i støttapskoeffisienten på 24 %. Tilvarende er effekten av å øke steinlektenes høyde fra 30 mm til 48 mm, en gjennomsnittlig økning i støttapskoeffisientene på 52 %.

En økning i steinlektenes høyde medfører altså at det totale trykktapet over steinlektene øker i større grad, sammenlignet med å øke spaltehøyden. Desto større steinlekter som benyttes, jo større blir trykktapet over steinlektene. Et høyere trykktap over en steinlekt medfører i sin tur at det totale trykktapet over takplanet, bestående av et flertalls steinlekter øker. Et stort trykktap over takplanet medfører at motstanden mot lufting øker, og at luftstrømningen reduseres, sammenlignet med et takplan med et mindre trykktap. Derfor forstås effekten av å øke spaltehøyden mer gunstig, enn å benytte større steinlekter, med tanke på å oppnå størst mulig luftstrømning i luftespalten i et skrått tretak.

Et yttertaks evne for uttørking, henger tett sammen med luftstrømningen i luftespalten, ettersom uttørkingen er knyttet til konvektiv fukttransport. Derfor kan det sies at en ønsker å oppnå et skrått tretak med størst mulig luftstrømning fra dette perspektivet. Videre må det tas til betraktning at økt luftstrømning i luftespalten medfører et økt fukttilskudd, gitt av uteluftens fuktinnhold. Følgelig må flere effekter enn trykktapet over takplanet hensyntas, dersom et overordnet uttørkingspotensial for et skrått tretak skal kartlegges.

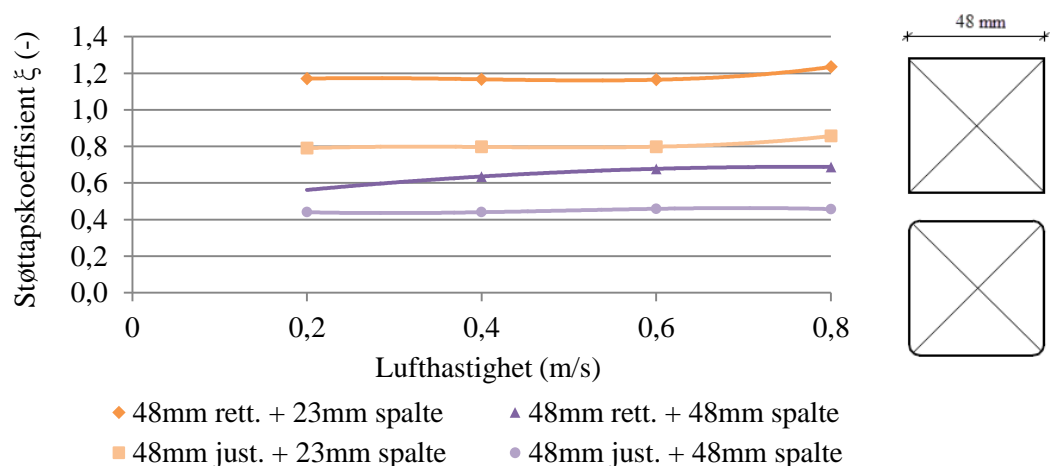
7.1.3. RETTKANTEDE LEKTER SAMMENLIGNET MED JUSTERTE LEKTER

I det følgende er effekten av å benytte justerte steinlekter vurdert. Fra strømningsmeknikken er det kjent at rundkantede rørkomponenter gir et lavere støttap, sammenlignet med rettkantede rørkomponenter. Det var således av interesse å se om en opplevde tilsvarende trend for støttapet over steinlekter. Resultatet fra denne testen er gitt i figur 7.1.3 og 7.1.4. I figurene er justerte steinlekter forkortet til just., og rettkantede til rett.



Figur 7.1.3. Sammenligning av støttapskoeffisient ξ (-) for justerte og rettkantede 36 mm steinlekter.

Dersom en sammenligner figur 7.1.3 og 7.1.4, kan en se at gevinsten med å benytte justerte steinlekter er størst for de minste spaltetverrsnittene. Sagt på en annen måte, vil forskjellen i trykktapet over en steinlekt bli større for 23 mm luftespalte, sammenlignet med en 48 mm luftespalte.

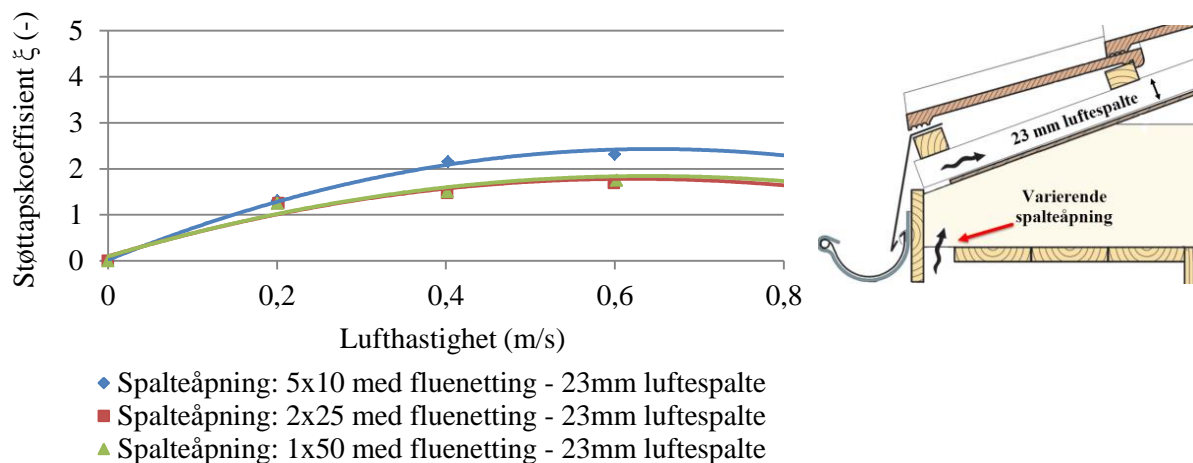


Figur 7.1.4. Sammenligning av støttapskoeffisient ξ (-) for justerte og rettkantede 48 mm steinlekter.

Dersom en sammenligner støttapskoeffisienten for 36 mm justerte steinlekter, med 36 mm rettkantede steinlekter, oppnås en gjennomsnittlig reduksjon på 42 %. Dette gjennomsnittet gjelder dersom en sammenligner samtlige spaltehøyder. Tilsvarende oppnås en gjennomsnittlig reduksjon på 28 %, dersom en sammenligner 48 mm steinlektene. Således kan det sies at effekten av å benytte justerte steinlekter øker med redusert høyde på steinlektene. Overordnet er effekten av å benytte justerte steinlekter markant, sammenlignet med å benytte rettkantede steinlekter.

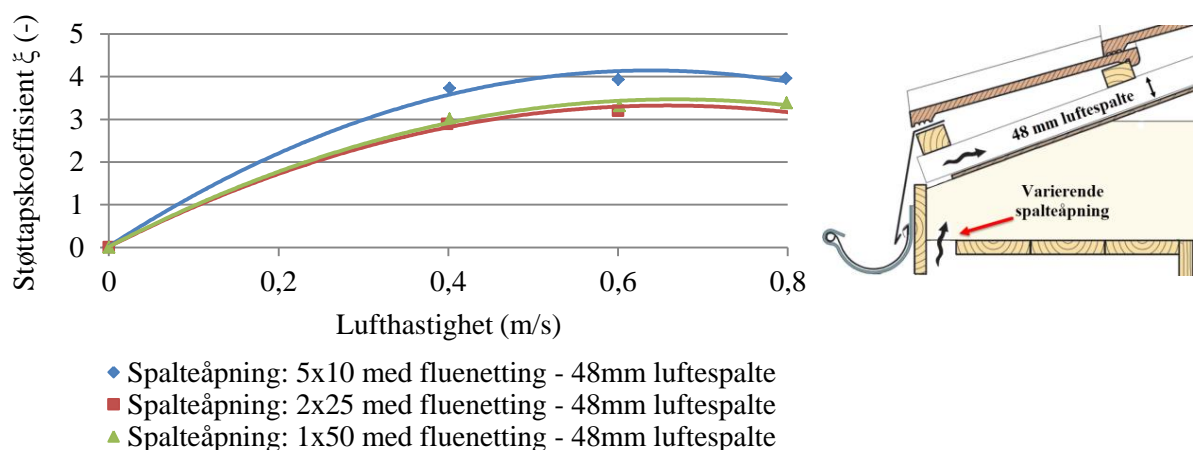
7.1.4. SAMMENLIGNING AV RAFT-ALTERNATIVENE

I det følgende er ulike utførelser av spalteåpningen i en tradisjonell raftekasse studert. Det skiller mellom løsningen hvor det er benyttet en 50 mm bred spalteåpning, 2x25 mm spalteåpninger og 5x10 mm spalteåpninger.



Figur 7.1.5. Støttapskoeffisient ξ (-) for raft-alternativ 1, med fluenetting og 23 mm luftespalte. Resultatene viser ulike spalteåpninger i raftekassen. Spalteåpningene (2x25) mm og (5x10) mm er sentrisk plassert mellom forkantbordet og vegglivet. Spalteåpningen (1x50) mm er plassert i flukt med forkantbordet.

Slik det fremgår av figur 7.1.5 og 7.1.6, vil støttapskoeffisienten for raftekassen økes i takt med økende spaltetverrsnitt. En ser at løsningen med fem spalteåpninger på 10 mm, gir et større trykktpap, sammenlignet med de andre utførelsene av spalteåpningen i raftet.

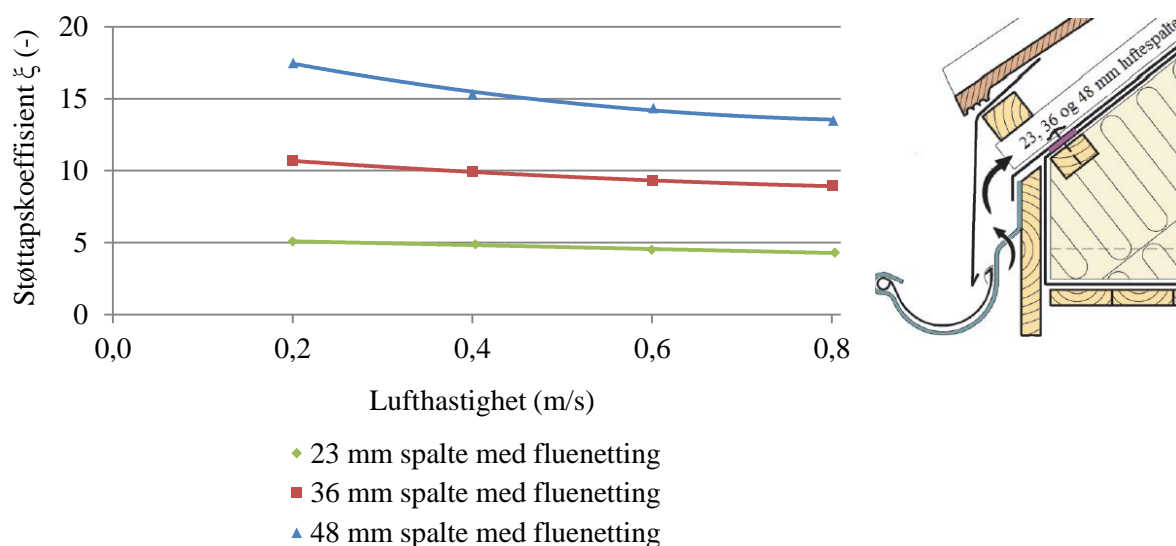


Figur 7.1.6. Støttapskoeffisient ξ (-) for raft-alternativ 1, med fluenetting og 48 mm luftespalte. Resultatene viser ulike spalteåpninger i raftekassen. Spalteåpningene (2x25) mm og (5x10) mm er sentrisk plassert mellom forkantbordet og vegglivet. Spalteåpningen (1x50) mm er plassert i flukt med forkantbordet.

Dersom tabell 6.1.4, 6.1.5 og 6.1.6 sammenlignes, kan fluenettingens effekt på støttapskoeffisienten vurderes. En ser at fluenettingens innvirkning er størst for utførelsene med to og fem spalter på henholdsvis 25 og 10 mm, hvor støttapskoeffisienten øker i snitt med 68 %. For spalteutførelsen med en spalte på 50 mm, er økningen i snitt 55 %. Det fremkommer av figur 7.1.5 og 7.1.6 at spalteutførelsen med fem spalter på 10 mm, medfører

størst trykktap over raftekassen. Videre kan en se at å benytte to spalter på 25 mm, gir en reduksjon på 21 % i støttapskoeffisienten, sammenlignet med fem spalter på 10 mm. En spalteåpning på 50 mm gir på sin side en reduksjon på 18 %, sammenlignet med en spalteåpning bestående av fem spalter på 10 mm.

I likhet med raft-alternativ 1, har fluenettingen en markant innvirkning på raft-alternativ 2. Figur 7.1.7 viser støttapskoeffisienten for alternativ 2, ved ulike spaltehøyder. Dersom alternativet sammenlignes med og uten fluenetting, observeres en større forskjell mellom de ulike spaltehøydene med fluenetting monterert.



Figur 7.1.7. Støttapskoeffisient ξ (-) for raft-alternativ 2 (med fluenetting), og varierende spaltehøyde.

Slik illustrert i figur 7.1.7 har fluenettingen en betydelig innvirkning på støttapskoeffisienten for raftekassen. Dersom tabell 6.1.3 legges til grunn, ser en at støttapskoeffisienten øker med 90 % i gjennomsnitt, sammenlignet med raftekassen uten fluenetting. Videre kan en ved å sammenligne alternativ 1 og alternativ 2, se at raft-alternativ 2 gir en gjennomsnittlig økning i støttapskoeffisienten på 231 %, sammenlignet med raft-alternativ 1. Resultatene fra raft-alternativ 1, med fem spalter i raftekassen på 10 mm, er grunnlaget for sammenligningen. Økningen ligger for øvrig i intervallet (80 – 420) %, avhengig av hvilken lufthastighet som legges til grunn for sammenligningen. Det kan derfor sies at en tradisjonell raftekasse med lufting gjennom spalter i raftekassens underside er fordelaktig, sett i lys av å oppnå minst motstand mot luftstrømning i luftespalten i et skrått tretak.

7.1.5. MØNELØSNING

I likhet med sammenligningen av friksjonstapet, har det ikke lyktes å innhente sammenligningsgrunnlag for møneløsningen. Videre omtale gjelder følgelig kun for møneløsningen som er testet i inneværende prosjekt. Dersom en benytter gjennomlufting i møne, hvilket normalt utføres for tak med shingel eller membran, bør en unngå unødvendige tverrsnittsreduksjoner i møne. Dette grunnet at tverrsnittsreduksjoner i møne vil øke støttapskoeffisienten og følgelig trykktapet over møne.

7.1.6. USIKKERHET VED MÅLINGENE PÅ TESTMODELLEN

Slik nevnt i kapittel 5.2, er det knyttet usikkerhet til målingene i laboratoriet. Ettersom det er utført et stort antall målinger i laboratoriet, og en tidkrevende prosess relatert til statistisk behandling av måledata, måtte mengden begrenses. I dette prosjektet er den største usikkerheten tilknyttet støttapskoeffisientene for steinlektene. Dette grunnet at beregningen er sammensatt av to og tre uavhengige målinger i laboratoriet. Støttapskoeffisientene for møne og raft-alternativene, er på sin side kun sammensatt en måling. For steinlektene er det målt totalt trykktap, som inkluderer selve støttapet og friksjonstapet over steinlektene. I neste omgang er det målt friksjonstap for henholdsvis største og minste tverrsnitt. Beregning av støttapskoeffisienter for steinlektene blir således resultatet av tre målinger. For enkelte tverrsnitt lot det seg ikke gjøre å måle friksjonstapet, grunnet viftens kapasitet. Dette blir derfor en feil/usikkerhet i seg selv.

Usikkerhetsberegningen er i neste omgang begrenset til rettkantede steinlekt, grunnet at det er benyttet tre ulike dimensjoner, mot to ulike dimensjoner for de justerte steinlektene. Det antas i denne oppgaven at usikkerheten knyttet til de justerte lektene kan overføres til samme dimensjon for de rettkantede steinlektene. Beregnet støttapskoeffisient og tilhørende usikkerhet for 30, 36 og 48 mm rettkantede steinlekt, er gitt henholdsvis i tabell 7.1.2 – 7.1.4.

Tabell 7.1.2. Usikkerhet tilknyttet støttapskoeffisienter ved 30 mm rettkantet steinlekt.

23 mm spalte				48 mm spalte			
Hastighet	ξ	$\Delta\xi$	$\Delta\xi$ (%)	Hastighet	ξ	$\Delta\xi$	$\Delta\xi$ (%)
0,8 m/s	0,80	$\pm 0,09$	10,7 %	0,8 m/s	0,43	$\pm 0,02$	4,4 %
0,2 m/s	0,88	$\pm 0,10$	10,3 %	0,2 m/s	0,58	$\pm 0,03$	5,0 %

Tabell 7.1.3. Usikkerhet tilknyttet støttapskoeffisienter ved 36 mm rettkantet steinlekt.

23 mm spalte				48 mm spalte			
Hastighet	ξ	$\Delta\xi$	$\Delta\xi$ (%)	Hastighet	ξ	$\Delta\xi$	$\Delta\xi$ (%)
0,8 m/s	0,98	$\pm 0,10$	10,1 %	0,8 m/s	0,51	$\pm 0,02$	4,4 %
0,2 m/s	1,19	$\pm 0,12$	9,9 %	0,2 m/s	0,63	$\pm 0,03$	4,4 %

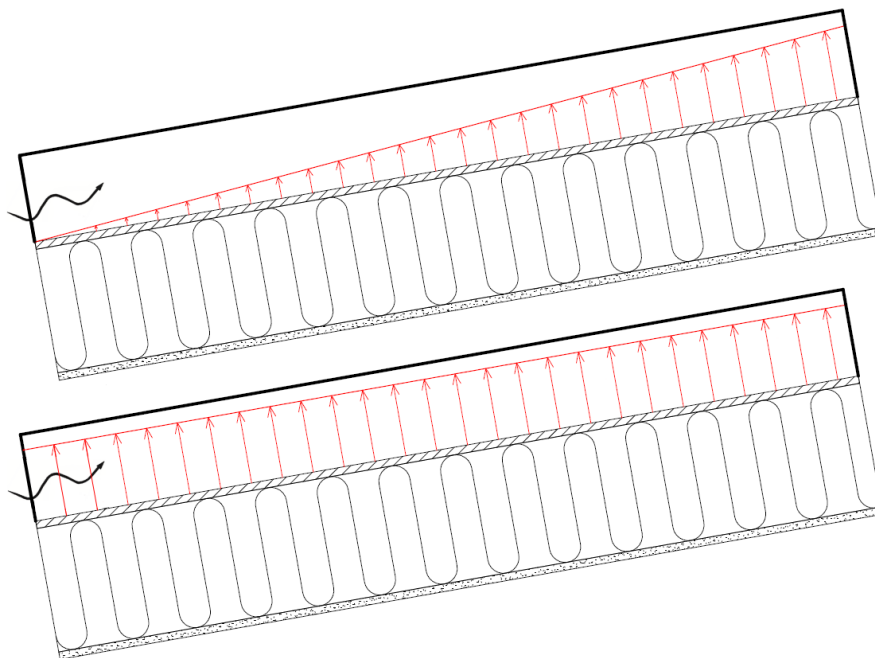
Tabell 7.1.4. Usikkerhet tilknyttet støttapskoeffisienter ved 48 mm rettkantet steinlekt.

23 mm spalte				48 mm spalte			
Hastighet	ξ	$\Delta\xi$	$\Delta\xi$ (%)	Hastighet	ξ	$\Delta\xi$	$\Delta\xi$ (%)
0,8 m/s	1,23	$\pm 0,11$	9,1 %	0,8 m/s	0,69	$\pm 0,03$	4,3 %
0,4 m/s	1,17	$\pm 0,12$	9,9 %	0,4 m/s	0,66	$\pm 0,03$	4,2 %

Slik det fremgår av tabell 7.1.2 – 7.1.4, ligger usikkerheten i intervallet [4, 11] %. Angitt usikkerhet ekskluderer manglende måleusikkerhet for laminærstrømsmåleren, som er omhandlet i det følgende, gjennom en sensitivitetsanalyse.

Slik nevnt i kapittel 5.2, manglet kalibreringsdata for laminærstrømsmåleren. Dette er kompensert for ved å utføre en sensitivitetsanalyse av usikkerhetene for målingene, etter at selve utførelsen av usikkerhetsberegningene. Det er tatt høyde for måleusikkerhet/feil for laminærstrømsmåleren, ulikt absoluttrykk og testmodellens lekkasje. Testmodellens lekkasje er testet underveis i arbeidet med testmodellen våren 2016, og blir følgelig ikke antatt.

For angitte lekkasjer på testmodellen, er trykkforskjellen i øvre del av testmodellens takboks grunnlag. I virkeligheten vil trykkforskjellen langs takboksen være null helt ned og ytterst mot innløpet, og størst ved utløpet i møne. Derfor vil lekkasjen trolig fordele seg lineært fra null i innløpet, til målt verdi for lekkasjen i møne. Det blir derfor konservativt å benytte angitt lekkasje. Videre finnes det potensielle lekkasjer videre ned i rørsystemet, som er delvis utfordrende å måle. Det er ved et flertalls tester kontrollert at det ikke forekom markante lekkasjer, med en røykpinne. Oppsummert, kan det sies at å benytte målt lekkasje er konservativt, men på den sikre side i forhold til at andre lekkasjer viste seg vanskelig å måle i praksis. Figur 7.1.8 illustrerer reell lekkasje, og hvordan lekkasjen er hensyntatt i usikkerhetsberegningene.



Figur 7.1.8. Reell lekkasje for testmodellen (øverst) og lekkasjen slik hensyntatt i usikkerhetsberegningene.

De resterende usikkerhetene knyttet til laminærstrømsmåleren må antas, som er omtalt i det følgende. Ettersom det er knyttet et betydelig merarbeid til sensitivitetsanalysen, er sensitivitetsanalysen begrenset til alternativ 1, med 30 mm steinlekt og 23 mm luftespalte. Dette alternativet hadde størst usikkerhet, hvilket går tydelig frem av tabell 7.1.5. Det bemerkes at det er noe konservativt at dette alternativet skal gjelde overordnet.

Innledningsvis, før sensitivitetsanalysen, ble det utført en studie på usikkerheten knyttet til volumstrømmen i måledataen. Her er samtlige usikkerheter tilknyttet måleblenden testet, samt at testmodellens lekkasje er hensyntatt. Resultatene fra parameterstudiet er å finne i tabell 7.1.5. Det bemerkes at de nye usikkerhetene ikke er et påslag på usikkerheten gitt i tabell 7.1.2, men et sluttresultat etter henholdsvis en parameterstudie og to sensitivitetsanalyser.

Tabell 7.1.5 Parameterstudie for alternativ 1. 30 mm rettkantet steinlekt og 23 mm luftespalte.

Parameter	Lufthastighet og usikkerhet	
	0,2 m/s	0,8 m/s
1. Endret absoluttrykk (+1 % i volumstrøm)	10,6 %	11,0 %
2. Testmodellens lekkasje	10,3 %	10,9 %
3. Feil i tverrsnitt = $\pm 0,5$ mm	5,3 %	5,4 %
4. Målefeil i laminærstrømsmåleren (+2,5 %)	11,9 %	12,4 %
5. Målefeil i laminærstrømsmåleren (+5 %)	15,7 %	16,4 %

Sensitivitetsanalyse 1 er satt sammen følgende parametere:

- Ulikt absoluttrykk i måleblenden (+ 1 % i volumstrøm)
- Testmodellens lekkasje (målte verdier benyttes)
- Feil i avlesning av luftespaltens tverrsnitt ± 1 mm
- Målefeil for laminærstrømsmåleren (+ 2,5 % i volumstrøm)

Tabell 7.1.6. Resultater fra sensitivitetsanalyse 1.

23 mm luftespalte	
Lufthastighet	Ny usikkerhet
0,2 m/s	12,1 %
0,8 m/s	12,8 %

Sensitivitetsanalyse 2 er sammensatt av følgende parametere:

- Ulikt absoluttrykk i måleblenden (+ 1 % i volumstrøm)
- Testmodellens lekkasje (målte verdier benyttes)
- Feil i avlesning av luftespaltens tverrsnitt ± 1 mm
- Målefeil for laminærstrømsmåleren (+ 5 % i volumstrøm)

Tabell 7.1.7. Resultater fra sensitivitetsanalyse 2.

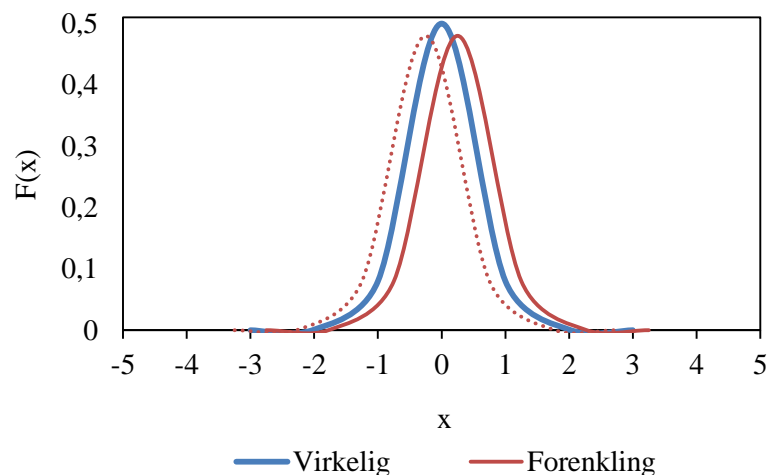
23 mm luftespalte	
Lufthastighet	Ny usikkerhet
0,2 m/s	15,8 %
0,8 m/s	16,7 %

Slik det fremgår av parameterstudiet, er usikkerheten mest sensitiv ovenfor feil i måleblenden, samt feilmåling av tverrsnittsareal. Det er derfor valgt å kontrollere et tilfelle med en feil i måleblenden tilsvarende 5 %, som ansees konservativt.

I denne oppgaven var det formålstjenlig å foreta en forenkling vedrørende fremstilling av støttapskoeffisientene for steinlektene. Forenklingen som er foretatt viser seg å avvike i mindre grad fra en korrekt beregning i usikkerhetsanalysen. Dersom en sammenligner beregning av støttapskoeffisientene gjennom usikkerhetsanalysen, sammenlignet med en forenklet beregning av støttapskoeffisienten, observeres en øvre feil i beregnet støttapskoeffisient på $\pm 0,05$ (-). Dette tilsvarer 5 % for aktuelt tilfelle. Feilen ved en forenklet fremstilling ligger generelt i intervallet $\pm [0,5 - 5]$ %. Sagt på en annen måte er støttapskoeffisientene i denne oppgaven både mindre og større, enn de som fremkommer av beregningen gjennom usikkerhetsanalysen. Forskjellen på den forenklete beregningen og beregningen i usikkerhetsanalysen kan forklares på følgende måte:

- Temperaturen for de ulike målingene varierer
- Hastigheten og volumstrømmen for de ulike målingene varierer
- Testmodellens lekkasje varierer for de ulike målingene

Dette hensyntas i usikkerhetsberegningen, mens det neglisjeres i fremstillingen av støttapskoeffisientene for steinlektene i denne oppgaven. Visuelt kan forenklingen fremstilles slik vist i figur 7.1.9. En forenklet fremstilling av måledata er vist å avvike både positivt og negativt fra beregnet verdi i usikkerhetsanalysen. Dette forklarer ulike høyde på grafenes y-akse. Videre vil en forenklet kunne si at usikkerhetsintervallet forflytter seg i samme trend, sammenlignet med virkeligheten.



Figur 7.1.9 Forenkling i fremstilling av støttapskoeffisienter for lekter.

Den endelige usikkerheten kan antas å ligge i intervallet, som fremkommer av tabell 7.1.2 – 7.1.4, og sensitivitetsanalysen. Svært forenklet og konservativt, kan en si at støttapskoeffisientene for steinlektene i dette prosjektet har en usikkerhet tilvarende ± 17 %. Sammenlignet med usikkerhetsberegningene, viser sensitivitetsanalysen er påslag tilsvarende 6 %, når en hensyntar manglende kalibreringsdata for måleblenden og inkluderer testmodellens lekkasje. Usikkerheten for raft og møne alternativene er antatt å være betydelig mindre, ettersom disse er sammensatt at en måling, og ikke to eller tre, slik som for steinlektene. Ringvirkningene av manglende friksjonstap for de største tverrsnittene, er at støttapskoeffisienten for steinlektene blir overestimert.

7.1.7. USIKKERHET VED BEREGNING AV STØTTAPSKOEFFISIENTER

Det er kjent fra strømningsmeknikken at støttapene følger en kvadratisk form i det laminære området, mens en lineær trend forekommer i det turbulente området. Grunnlaget for at det i strømningsmeknikken benyttes en konstant K-verdi for ulike rørkomponenter, er at det antas turbulent strømming.

Det bemerkes at målingene i dette prosjektet primært er i det laminære området, og overgangsområdet mot turbulent strømming. I de største tverrsnittene er strømmingene turbulent for de øvre lufthastighetene. Dette påvirker delvis fremstillingen av støttapskoeffisientene, og må tas med i betraktningen av resultatene. I resultatene er det benyttet en kvadratisk regresjon, slik at overgangen mot det turbulente området og den lineære trenden, ikke synliggjøres slik det burde. For å bøte på dette må det utføres målinger med høyere hastigheter, enn hva som er testet i dette prosjektet. Det er likevel nærliggende å tro at innværende data er svært nyttig når årsgjennomsnittlig lufthastighet i luftspalten betraktes, hvor hastighetsintervallet som er testet i dette prosjektet er av større betydning.

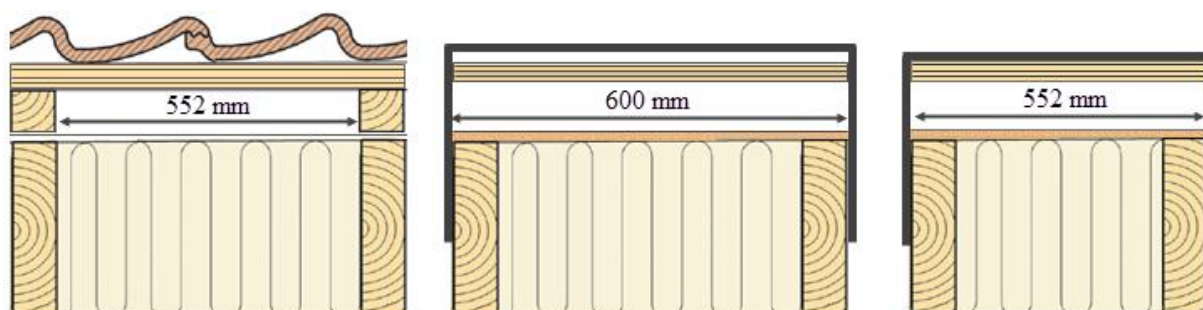
Ettersom friksjonstap for de største tverrsnittene mangler, vil støttapskoeffisientene som er fremstilt i denne oppgaven være overestimert. I tillegg til manglende friksjonstap, må måledataens usikkerhet hensyntas, når grafenes trend analyseres. Det bemerkes at regresjonskurven i fremstillingen av støttapskoeffisientene ikke passer måledataen perfekt, hvilket blant annet skyldes at en måler trykktap i flere strømningsregimer.

Støttapskoeffisienter for raft og møne distanserer seg fra steinlektene, ved at grunnlaget for beregningen kun er en måling, og ikke to eller tre målinger. Dette vil redusere usikkerheten knyttet til støttapskoeffisientene betraktelig, sammenlignet med usikkerheten tilknyttet steinlektene. Det er ikke utført beregning av usikkerhet for møne og raft, ettersom usikkerheten er størst for steinlektene. Med dette i tanke, kan en svært konservativt og forenklet sagt, si at usikkerheten for støttapskoeffisientene for møne og raft ligger i intervallet [0 – 17] %.

7.1.8. SAMMENLIGNING MED TIDLIGERE STUDIER

Det er tidligere utført studier på trykktap over både steinlektet og møne ved NTNU (Hofseth, 2003) og (Eian og Lyngestad, 1989). Førstnevnte studie omhandlet støttapskoeffisienter for både raft, møne og steinlektet. Studiet som er skissert i (Blom, 1990), med henvisning til (Eian og Lyngestad, 1989), hadde på sin side som hensikt å studere hvilken effekt ulike løsninger for raftekassen og møne hadde på luftstrømningen i spalten. Det har ikke lyktes undertegnede å innhente en utskrift eller digital kopi av (Eian og Lyngestad, 1989), slik at sammenligning mot tidligere studier i sin helhet rettes mot (Hofseth, 2003).

Hofseth (2003) bygde en modell av et skrått tretak, som skiller seg fra testmodellen som er bygd i løpet av høsten 2015/våren 2016. Det bemerkes at steinlektene i dette prosjektet er montert helt opp mot taktekkingen/takboksen, mens steinlektene ble montert med en 10 mm avstand til tekkingen i (Hofseth, 2003). De prinsipielle forskjellene mellom de ulike testmodellene og en reell utførelse, er illustrert i figur 7.1.10.



Figur 7.1.10. Virkelig utførelse (til venstre), Hofseth (2003) – testmodell, og testmodellen i inneværende prosjekt (høyre). Figurene er basert på (Byggforsk 525.102), og er videreutviklet av Espen Hansen 2016.

Det er nærliggende å tro at trykktapet over en steinlekt blir større for konfigurasjonen gitt i (Hofseth, 2003), enn utførelsen i dette prosjektet. Dette grunnet at utførelsen i (Hofseth, 2003) medfører at luftvolumet mellom steinlektene øker. Videre er Hofseth sin modell noe bredere enn testmodellen i inneværende prosjekt, hvilket også medfører at luftvolumet øker. Grunnlaget for sammenligningen mellom modellene, er tilfellet med 30 mm steinlekt og en 36 mm høy luftespalte. Resultatet fra testmodellen i dette prosjektet gav en støttapskoeffisient ved 0,8 (m/s) på $0,51 \pm 0,09$ (-). Resultatene fra Hofseth (2004) gav en støttapskoeffisient på 0,66. Hofseth (2004) behandlet ikke usikkerheten for målingene i laboratoriet spesifikt, hvilket må tas til betraktning i en sammenligning.

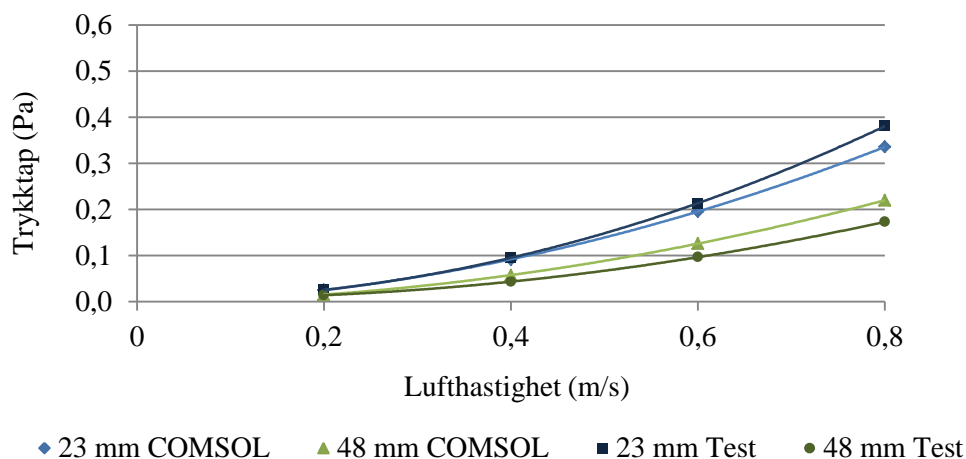
Tabell 7.3.1. Sammenligning av støttapskoeffisient ved 36 mm luftespalte og 30 mm steinlekt.

Studie	Hastighet (m/s)	Støttapskoeffisient ξ [-]
Inneværende prosjekt	0,79	$0,51 \pm 0,09$
(Hofseth, 2004)	0,95	0,66

Sluttvis bemerkes det at det for de ulike studiene er benyttet ulikt måleutstyr, ulik lufthastighet i luftespalten, og noe ulik utforming. Grunnlaget blir derfor for grovt til å kunne sammenlignes direkte, generelt kan si at resultatene samsvarer til en viss grad.

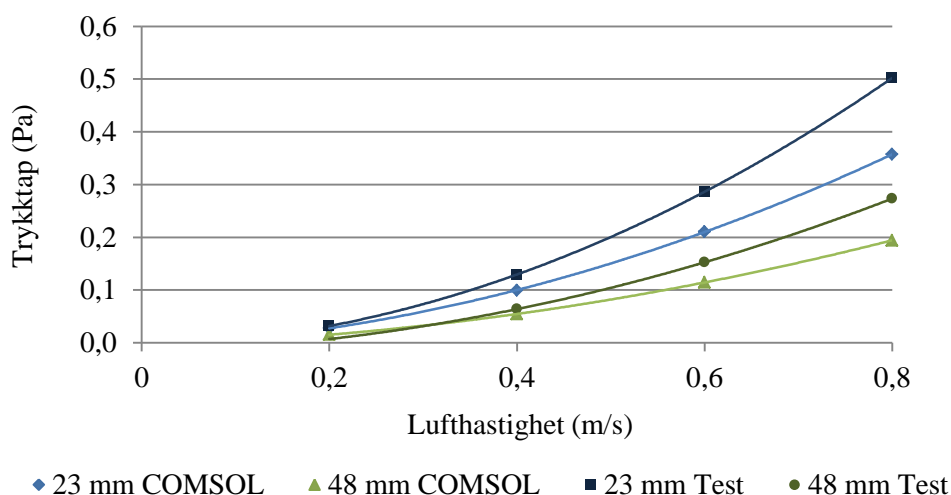
7.2. SAMMENLIGNING AV MÅLT OG BEREGNET TRYKKTAP

I det følgende er beregninger i COMSOL sammenlignet med resultatene fra testmodellen. Det bemerkes at forskjell i statisk trykk legges til grunn, sammenlignet med støttapskoeffisienter i det foregående i kapittel 6. Det er valgt å sammenligne resultatene med testene hvor det ble benyttet 30 mm og 48 mm steinleker. I figur 7.2.1 og 7.2.2 representerer grafene, som er betegnet (Test), resultatene fra testmodellen i laboratoriet.



Figur 7.2.1. Sammenligning av trykktap over en 30 mm rektkant steinlekt ved varierende spaltehøyde.

Slik det fremgår av figur 7.2.1 øker forskjellen mellom COMSOL og resultatene fra testmodellen, ved økende lufthastighet i luftespalten. Det bemerkes at forskjellen mellom COMSOL og testresultatene er relativt små, for lufthastigheter mindre enn 0,6 m/s.



Figur 7.2.2. Sammenligning av trykktap over en 48 mm rektkant steinlekt ved varierende spaltehøyde.

Dersom figur 7.2.1 og 7.2.2 sammenlignes, observeres best samsvar mellom COMSOL og målingene for de laveste spaltehøydene. Dette er logisk, ettersom en for de lave hastighetene beveger seg over i det laminære området, hvilket (Low Re, $k-\omega$) - modellen i COMSOL er ment for.

Resultatene er sammenlignet med tanke på totalt trykktap over en steinlek, hvilket inkluderer friksjonstapet. Dette grunnet at en kan sammenligne en enkeltstående måling fra testmodellen, og ikke tre enkeltstående målinger, slik ved beregning av støttapskoeffisient over en lekt. Følgelig vil usikkerheten i en slik sammenligning være mindre, enn for en sammenligning hvor tre enkeltstående målinger fra testmodellen legges til grunn. Derfor er tabellene og grafene som fremstilles på bakgrunn av resultater fra COMSOL relatert til trykktap (Pa), og ikke til støttapskoeffisient ξ (-).

I dette prosjektet er modellen (Low Re k - ω) benyttet. Ettersom differansen mellom testresultatene og COMSOL er minst ved lave lufthastigheter i luftespalten, antas denne modellen best egnet for strømming i det laminære området. Trykktapene som er målt på testmodellen er målt både i det laminære, turbulente området, samt overgangsområdet mellom strømningsregimene. Ettersom det er benyttet en modell ment for lave Reynolds tall, bør modellen benyttes deretter. Ideelt sett skulle en ha byttet til en modell ment for høye Reynoldstall midtveis, i overgangsområdet. Dette er dels utfordrende, ettersom ulike spaltetverrsnitt har ulikt Reynolds tall, ved varierende lufthastigheter i spalten. Det ble derfor valgt å benytte en modell gjennomgående, for å lette sammenligningen. I tillegg ville en mer komplett sammenligning ha tatt vesentlig lengre tid, ettersom en er avhengig av å beregne nye initialverdier, når ligningstype byttes. Således skal det sies at det fulle potensialet i COMSOL vedrørende respektiv beregning, ikke kommer til syne i denne oppgaven.

COMSOL benytter en konstant densitet, som fremgår av initialverdien for lufttemperaturen i spalten. Snittverdien for lufttemperaturen i laboratoriet var 18,5 °C, hvilket er valgt som initialverdi for temperaturen i COMSOL. Videre modelleres et uniformt hastighetsprofil ved innløpet i COMSOL, hvilket beveger seg noe vekk i fra virkeligheten i laboratoriet. Det er nærliggende å tro at dette har en innvirkning på avlesning av trykket i punktet nærmest innløpet, både for testmodellen og i COMSOL.

For å få en overkommelig beregningstid, har modellen blitt forkortet ved bruk av symmetriplan midt i spalten. Symmetriplanet har ingen innvirkning på differansen i dette tilfellet, men det kan tenkes at verdiene vil avvike noe, ettersom det er modellert tre lekter og ikke alle 11 i COMSOL.

Dersom en hensyntar usikkerhetene i testresultatene, sammen med forenklingene utført i COMSOL, kan det sies at COMSOL beregner virkeligheten tilsynelatende godt.

7.3. PARAMETERSTUDIE I WUFI

I oppgavens fuktsimuleringer er et skrått tretak vendt mot nord i en 50 grader helning vurdert. Det kan følgelig diskuteres om angitt oppbygning er et fornuftig valg i parameterstudier, som omhandler fukt- og temperaturforhold i skrå tretak. Ettersom både luftespaltens høyde og takhelning er studert spesifikt, antas den konstruktive oppbygningen av modellen i WUFI, som et dels fornuftig valg i denne oppgaven. Slik det fremgår av aktuell modell, ekskluderes steinlektene i modelleringen, hvilket er en begrensning som fremkommer av å benytte et endimensjonalt simuleringsprogram. I en endimensjonal beregning hensyntas heller ikke fuktinnhold i taksperrene, hvilket vil påvirke enkelte deler av resultatene. Alternativt kunne fukt ha blitt addert isolasjonssjiktet, for å kompensere for dette. Av hensiktsmessige årsaker er denne effekten neglisjert i oppgavens parameterstudier, ettersom denne effekten er ansett å ha en mindre betydelig innvirkning på fukt- og temperaturforhold i en luftespalte i et skrått tretak. En forenkling som er av stor betydning for innværende resultater, er modellering av luftsjiktet i luftespalten. Dette er delvis omfattende, og står som et eget vedlegg i denne oppgaven. Forenklingene og begrensningene ved modellen som er benyttet, er omhandlet ytterligere i vedlegg 4.1.

7.3.1. LUFTESPALTENS VENTILASJONSEVNE

Luftespaltens ventilasjonsevne avhenger, slik vist i kapittel 4.4, både av uteklima og spalteutforming. Differansen mellom spalteluftens og utetemperaturens fuktinnhold, er videre avgjørende for hvorvidt luftespalten opplever et fukttilskudd eller fuktventilering. Ved vurdering av ventilasjonsevnen for et skrått tretak, må følgelig varmeventilering sammen med fuktventilering sees i lys av andel tilskudd og ventilert mengde varme/fukt. Fra aktuelle parameterstudier i denne oppgaven, forstås effekten av spaltehøyde som parameteren av størst betydning for ventilasjonens kapasitet. Lufthastigheten i spalten er på sin side avgjørende for ventilasjonens størrelse. Ved lave lufthastigheter i luftespalten, minimeres ventilasjonens størrelse, og motsatt. Ventilasjonens størrelse er følgelig avhengig av massestrømmen i luftespalten, som i sin tur henger sammen med lufthastighet og spaltens størrelse. For værharde steder i Norge, vil det derfor kunne forsvares å benytte mindre luftespalter, grunnet høyere årsgjennomsnittlig vindhastighet ute, og motsatt. Ideell spaltehøyde må følgelig vurderes ut fra aktuelt uteklima, og effektene diskutert i det følgende.

7.3.2. FUKTFORHOLD I LUFTESPALTEN

Fuktforholdet for undertakets underside er vist å preges i størst grad av takkonstruksjonens isolasjonstykkelse. Forholdene for luftespaltens omsluttende flater, her omtalt taktroas underside og undertakets overside, vil på sin side preges i størst grad av lufthastigheten i spalten og spaltehøyden. Det er vist at ved økte spaltetverrsnitt, vil uteklimate få en mer betydelig innvirkning på fuktforholdene i luftespalten. Størst økning i relativ luftfuktighet observeres for undertakets overside, ved økte spaltetverrsnitt. Derfor forstås det hensiktsmessig, sett i lys av fuktforholdene i en luftespalte, å begrense spaltehøyden i geografiske plasseringer med høy årsgjennomsnittlig luftfuktighet ute.

7.3.3. TEMPERATURFORHOLD I LUFTESPALTEN

Temperaturforhold i luftespalten er som nevnt tidligere, studert gjennom parameterstudiene som omhandler variabel spaltehøyde og lufthastighet i luftespalten. Det er tidligere vist at taktroas underside vil bli kaldere når utetemperaturen øker, i takt med økende spaltehøyde. Dette grunnet at luftvolumet som lagrer og transporterer ut varmen øker, i takt med økende spaltetverrsnitt. Resultatet av økt spaltetverrsnitt kan derfor sies å være en redusert temperaturamplitude for taktroas underside, sammenlignet med små spaltetverrsnitt. Lav lufthastighet i luftespalten, medfører i likhet med et lite spaltetverrsnitt en varmere spalte, dersom en betrakter årsgjennomsnittlig temperatur for spalten. Dersom temperaturforholdet i spalten studeres mer detaljert, kan det observeres at økt lufthastighet medfører en lavere spaltetemperatur under sommerperioden. Under vinterperioden medfører på en annen side økt lufthastighet en varmere spalte, grunnet redusert underkjøling ved økt lufthastighet. Til sammenligning vil effektene av økt isolasjonstykkelse bevege seg i forskjellige retninger. Ettersom takets varmegjennomgang reduseres i takt med økende isolasjonstykkelser, vil luftespaltens temperatur reduseres på vinterstid. På sommerstid vil en redusert varmegjennomgang for takkonstruksjonen medføre økt spaltetemperatur. Effekten av økte isolasjonsmengder på sommertid er på sin side svært begrenset, sammenlignet med spaltehøydens og lufthastighetens innvirkning på temperaturforholdene i luftespalten. Derfor ansees lufthastighet i luftespalten sammen med spaltehøyden, som parametere av størst betydning for temperaturforholdene i en luftespalte i et skrått tretak. I tillegg vil ulike taktekkinger medføre temperaturforskjeller seg i mellom. Denne effekten er på sin side utelatt av hensyn til omfanget av respektiv del i oppgaven.

7.3.4. UNDERKJØLING AV TAKFLATEN

Dersom en sammenligner underkjølingens varighet og størrelse på årsbasis, ser en tydelig at effekten av lufthastighet i luftespalten dominerer. Det fremgår av aktuelt parameterstudie, at redusert lufthastighet øker underkjølingens størrelse og varighet betydelig. Økt spaltehøyde medfører en økning i underkjølingens varighet, mens underkjølingens størrelse reduseres. Til sammenligning er effekten av økt isolasjonstykkelse i et skrått tretak, en økning i underkjølingens størrelse og varighet. Takhelning er også en faktor av betydning for underkjølingens størrelse og varighet. I likhet med effekten av økte isolasjonsmengder, er effekten av økt takhelning minimal, sammenlignet spaltehøydens og lufthastighetens innvirkning på underkjøling av takflaten. Lufthastighet i luftespalten forstås med dette som den mest betydningsfulle parameteren med hensyn på underkjøling i et skrått tretak, etterfulgt av takhelning, spaltehøyde og isolasjonstykkelse.

7.3.5. POTENSIAL FOR KONDENS I LUFTESPALTEN

Kondenspotensial i aktuelle parameterstudier er som nevnt tidligere kraftig forenklet fra virkeligheten. Kondenspotensialet er som nevnt tidligere, forenklet til situasjonene hvor overflatene i luftespalten opplever et fukttilskudd. Det fremgår av resultatene at potensialets størrelse reduseres i betraktelig større grad enn dets varighet, ved økt lufthastighet i luftespalten. Økte spaltetverrsnitt medfører på sin side at potensialets størrelse øker, og at dets varighet reduseres i mindre grad. Til sammenligning er effekten av økt isolasjonstykkelse og redusert takhelning, både en økning i kondenspotensialets størrelse, samt dets varighet. Faktorer av størst betydning for kondenspotensialets størrelse og varighet, forstås avslutningsvis som lufthastighet i spalten, samt spaltens høyde.

7.4. MÅLINGER VED ZEB TEST CELL

7.4.1. USIKKERHET

Ettersom det kun hentes ut en liten periode fra målingene på ZEB Test Cell, velges usikkerheten vedrørende disse målingene å behandles i svært begrenset grad. Behandling av usikkerheten i målingene er kun rettet mot angivelse av midlere lufthastighet i perioden. Generelle målenøyaktigheter for sensorene er kort omtalt i kapittel 5.3.

Tabell 7.4.1. Sammenligning av midlere lufthastighet i spalten.

Posisjon	Midlere lufthastighet (m/s)	Usikkerhet (m/s)
Sør, bunn	0,42	± 0,01
Sør, topp	0,38	± 0,01
Nord, bunn	0,44	± 0,01
Nord, topp	0,40	± 0,01
Vindhastighet ute	2,10	± 0,04

Slik det fremgår av tabell 7.4.1, er gjennomsnittlig lufthastighet i luftespalten som er presentert 0,4 m/s. Midlere lufthastighet ute under perioden som er fremstilt er på sin side 2,1 m/s. Dersom en ser på forholdet mellom lufthastighet i spalten og lufthastighet ute, samsvarer midlere lufthastighet godt, for januar og perioden i mars.

7.4.2. LUFTHASTIGHET I SPALTEN

Det var i neste omgang ønskelig å sammenligne beregnet lufthastighet i luftespalten, med feltdata fra perioden i mars. Beregning av lufthastighet i luftespalten er utført med et internt regneark i SINTEF Byggforsk, som baserer seg på formfaktorer, samt spaltens og takets geometri. Gjennom en iterativ prosess med inputdata tilsvarende taket i ZEB Test Cell, fås resultatene slik vist i tabell 7.4.2.

Tabell 7.4.2. Sammenligning mellom beregnet og målt lufthastighet i luftespalten.

Vindhastighet ute (m/s)	Hastighet i luftespalten (m/s) Beregnet	Hastighet i luftespalten (m/s) Målt
0,8	0,17	0,17
1	0,21	0,18
2	0,42	0,41
4	0,85	0,82
6	1,28	1,11

Ettersom spaltetverrsnittet i ZEB Test Cell ikke inneholder tverrgående steinleker, er trykktapet dominert av raftekassens og møneløsningens støttapskoeffisient, samt friksjonstapet i spalten. Dersom en sammenligner beregnet og målt lufthastighet i spalten, slik vist i tabell 7.4.2, ser en at beregningene samsvarer relativt godt med målingene. Det bemerkes at målt hastighet oppgis som snittverdien av samtlige målepunkt i taket. Målt og beregnet lufthastighet avviker noe for de øvre hastighetene, som kan ha sin årsak i at det totale trykktapet i systemet endrer seg noe i takt med økende lufthastighet. Det er vist i kapittel 7.1, at støttapskoeffisienten for et lignede raft øker i takt med lufthastigheten i spalten, hvilket kan ha en innvirkning på differansen mellom målt og beregnet lufthastighet i luftespalten.

7.4.3. UNDERKJØLING AV TAKFLATEN

Slik det fremgår av resultatene fra ZEB Test Cell, observeres størst underkjøling ved luftespaltens innløp, både på søndre og nordre side av bygget. Underkjølingen av taktroa ved takets nedre del, er både på søndre og nordre side er målt til 5,9 °C. Dette er en større underkjøling enn hva som var forventet innledningsvis, med tanke på geografisk plassering og aktuell takoppbygning. En dels overraskende stor underkjøling, kan delvis forklares ved en lav lufthastighet i luftspalten under perioden med underkjøling som er studert. Midlere lufthastighet for aktuell periode var 0,14 m/s. Det kan ikke observeres en tydelig forskjell i underkjølingens varighet for nordre og søndre takflate, dersom en sammenligner plasseringene raft, møne og midt i takplanet. Dersom en ser på snittverdien av disse målepunktene for nord og sør, kan en forskjell observeres. Eksempelvis vil taktroa på søndre side i snitt underkjøles i mindre grad og oppleve en kortere varighet, sammenlignet med taktro mot nord. Tilsvarende trend observeres for undertaket.

Ettersom måleperioden ved ZEB Test Cell er delvis kort, sett i lys av et helt år, kan ikke resultatene sammenlignes med trendene som fremgår av kapittel 6.3. Videre må det skilles mellom reelt uteklima, og en såkalt MDRY-klimafil, som ligger til grunn for beregningene i WUFI. I neste omgang er det forskjeller mellom et Oslo-klima og klimaet i Trondheim, som vil påvirke resultatene i større grad. Dersom en skal sammenligne trender som fremgår av en parameterstudie i WUFI, med målingene ved ZEB Test Cell, bør parameterstudiet utføres med Trondheim som klima. Dersom det lar seg gjøre, kan en klimafil med fordel genereres fra klimadata som måles ved ZEB Test Cell, for å oppnå en bedre sammenligning. Sluttvis bemerkes det at hensikten med inneværende del i oppgaven var å vise til reelle forhold i et skrått tretak, og ikke utføre en verifisering av trender/effekter, som fremgår av simuleringene i WUFI.

8. KONKLUSJON

I denne oppgaven er luftstrømning i skrå tretak, sammen med fukt- og varmetekniske konsekvenser ved utforming av luftespalter i skrå tretak studert. Oppgavens hensikt er på sin side å danne økt forståelse av spalteutforming, og dets innvirkning på luftstrømning i skrå tretak. Kartlegging av spalteutformingens innvirkning på fukt- og temperaturforhold i luftespalter, er videre et delmål i oppgaven. Økt forståelse og faglig grunnlag er innarbeidet gjennom relevant teori, eksperimentelle målinger, og numeriske beregninger.

Eksperimentelle målinger i laboratoriet viste en større effekt ved å øke spaltehøyden i luftespalten, sammenlignet med å øke steinlektenes høyde. Videre ble det målt et mindre trykktap over steinlektene, dersom justerte lekter benyttes fremfor rettkantede lekter. En økning av steinlektenes høyde, medfører at det totale trykktapet over steinlektene øker i større grad, sammenlignet med å øke spaltehøyden. Ved å sammenligne raft-alternativene, fremgår det at alternativet med lufting bak takrenna medfører et betydelig større trykktap og støttapskoeffisient, sammenlignet med alternativet med spalter i underkant av raftekassen. Møneløsningen er i denne oppgaven vist å utgjøre et større trykktap, enn raft-alternativet med luftespalter i raftekassens nedre del. Møne i skrå tretak bør om mulig utformes med mulighet for gjennomlufting under mønekammen. Et stort trykktap over takplanet medfører at motstanden mot luftstrømning øker, og at luftstrømningen reduseres, sammenlignet med et takplan med et mindre trykktap.

Dersom en hensyntar usikkerhetene ved målingene i laboratoriet, og forenklingene som er gjort i COMSOL, oppleves relativ god overensstemmelse mellom målt og beregnet trykktap over steinlekter. Samsvar mellom beregnet og målt trykktap, betinger på sin side at programmet benyttes med varsomhet og omtanke, vedrørende valg av ligningsvarianter og inputverdier.

Fra respektive parameterstudier i denne oppgaven, fremstår luftespaltens høyde, som parameteren av størst betydning for ventilasjonens kapasitet. Lufthastigheten i spalten er på sin side avgjørende for ventilasjonens størrelse. Fuktforholdene i luftespalten vil preges i størst grad av lufthastigheten, og dermed luftskiftet i spalten, samt luftespaltens høyde. Fuktforholdet for undertakets underside, preges på sin side i størst grad av takets isolasjonstykkelse. Økt spaltehøyde medfører en redusert temperaturamplitude for taktroas underside, sammenlignet med små spaltetverrsnitt. Lufthastighet og spaltehøyde ansees med dette som parametere av størst betydning for temperaturforholdene i en luftespalte. Videre medfører redusert lufthastighet en økning i underkjølingens størrelse og dets varighet. Økt spaltehøyde medfører på sin side en økning i underkjølingens varighet, mens underkjølingens størrelse reduseres. Lufthastighet i luftespalten forstås med dette som den mest betydningsfulle parameteren, med hensyn på underkjøling i et skrått tretak, etterfulgt av spaltehøyde, takhelning og isolasjonstykkelse.

Lufthastighet og temperaturforhold i et skrått tretak er studert gjennom feltmålinger i ZEB Test Cell, under siste del av mars måned. Målingene viser at en antakelse om et midlere luftskifte for luftespalten i intervallet (50 – 100) luftomsetninger i timen, er et fornuftig valg for aktuell takkonstruksjon og geografisk plassering. For aktuell måleperiode, ble en maksimal underkjøling av taktroa tilsvarende seks grader observert.

Avslutningsvis bemerkes det at videre forskning er essensielt, for å kunne danne mer nyanserte og konkretiserte retningslinjer for lufting av skrå tretak.

9. VIDERE ARBEID

VIDERE BRUK AV TESTMODELLEN

I enkelte tilfeller må raftekassen utføres som en branncellebegrensende bygningsdel. I slike tilfeller er montering av takfotventiler en mulig løsning. Ettersom det eksisterer begrenset med data om støttapskoeffisienter for slike ventiler, anbefales å innhente data gjennom eksperimentelle undersøkelser på testmodellen. Det er også av interesse å studere takhelningens innvirkning på støttapskoeffisientene for aktuelle komponenter i testmodellen.

VIDERE STUDIER I COMSOL

I denne oppgaven er arbeidet i COMSOL begrenset til trykktap over steinlekter, av tidsmessige årsaker. Det anbefales videre å sammenligne trykktapene som er målt over raft og møne, med resultater i COMSOL. Dette for å kunne verifisere beregninger av mer komplekse geometrier i COMSOL.

VIDERE STUDIER I WUFI

Det anbefales at forenklingene og begrensningene med modellen som er benyttet, studeres ytterligere. Dette for å kunne uttale seg om respektiv modell gir et for grovt bilde av virkeligheten, eller om metodikken viser seg tilfredsstillende for en fuktteknisk evaluering av et skrått tretak. En slik sammenligning kan tenkes utført ved å utarbeide klimadata fra målingene ved ZEB Test Cell, og deretter benytte dataen som uteklime i WUFI. I neste omgang muligjgjøres en sammenligning av resultater fra WUFI, med målingene som pågår i ZEB Test Cell.

GENERELT

Til nå er effekten av krysslufing utelatt i nevnte studier, som omhandler luftstrømning i skrå tretak. Det hadde på sin side vært interessant og dannet økt kunnskap om dets størrelse og innvirkning på luftstrømning i skrå tretak. Det eksisterer samtidig begrenset kunnskap vedrørende støttapskoeffisienter for lufting gjennom gavl i skrå tretak, som anbefales studert ytterligere.

I en eventuell fremtidig revidering av dagens retningslinjer for lufting av skrå tretak, bør geografisk betinget relativ luftfuktighet innarbeides. Dette ettersom relativ luftfuktighet er en avgjørende parameter for fuktforholdene i skrå tretak, og følgelig forholdene for mikrobiologisk vekst.

REFERANSER

Belleghem, M.V., Steeman, M., Janssens, A. and Paepe, D. M. (2015) *Heat, air and moisture transport modelling in ventilated cavity walls*. Journal of Building Physics. Vol. 38 (4) 317-349. SAGE.

BIBSYS. *Om BIBSYS*. Udatert. Tilgjengelig fra:
<http://www.bibsys.no/om-bibsys/organisasjon/> (hentet 20.09.2015)

Birkeland, Ø. (1960) *Ikke-bærende yttervegger – håndbok 11*. Norges Byggeforskningsinstitutt, Oslo.

Blom, P. (1990) *Ventilasjon av isolerte, skrå tretak*. Doktoravhandling. Institutt for husbygningsteknikk. Norges tekniske høgskole, Trondheim.

Blom, P. og Uvsløkk, S. (2012) *Bygg tett*. Prosjektrapport 98. SINTEF Byggeforsk.

Bludau, C., Zirkelbach, D. and Künzle, H.M. (2008) *Surface Temperatures on Flat Roofs and Hygrothermal Consequences*. In: Proceedings of the 8th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, Copenhagen, June 16-18, 2008, p. 213-220.

BS 5250: 2002: Code of practice for control of condensation in buildings. British Standard.

Byggeforskserien. *Om Byggeforskserien*. Udatert.
Tilgjengelig fra: <http://bks.byggeforsk.no/PortalPage.aspx?pageid=44> (hentet 20.09.2015).

Byggeforskserien (1999) 471.111. Beregningsmetode for å unngå kondens eller muggvekst på innvendige overflater. SINTEF Byggeforsk.

Byggeforskserien (2003) 471.013. *U-verdier – tak*. SINTEF Byggeforsk

Byggeforskserien (2005) 525. 106. *Skrå tretak med kaldt loft*. SINTEF Byggeforsk.

Byggeforskserien (2005) 525.107. *Skrå tretak med oppholdsrom på deler av loftet*. SINTEF Byggeforsk.

Byggeforskserien (2007) 525. 101. *Isolerte skrå tretak med lufting mellom vindsperre og undertak*. SINTEF Byggeforsk.

Byggeforskserien (2012) 525.102. *Isolerte skrå tretak med kombinert undertak og vindsperre*. SINTEF Byggeforsk.

COMSOL(a) – *COMSOL Multiphysics*, 2016. Tilgjengelig fra:
<https://www.comsol.com/comsol-multiphysics> (hentet 13.03.2016).

COMSOL (b) – *Which Turbulence Model Should I Choose for My CFD Application*, 2013.
Tilgjengelig fra: <http://www.comsol.com/blogs/which-turbulence-model-should-choose-cfd-application/> (hentet 13.03.2016).

Cengel, Y.A., Cimbala, J.M. and Turner, R.H. (2012) *Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences*. New York, McGraw-Hill.

- DAIM. *Om DAIM – Digital Arkivering og Innlevering av Masteroppgaver*. Udatert. Tilgjengelig fra: <https://daim.idi.ntnu.no/> (hentet 20.09.2015).
- Direktoratet for byggkvalitet. Forskrift om tekniske krav til byggverk. *Byggteknisk forskrift med veiledning TEK 10*. VTEK § 11-8. Brannceller.
- Delphin Technology. *Expert Key*. Udatert. Tilgjengelig fra: <http://www.delphin.com/hardware/expert-key/technical-specifications.html>
- Eian, P. og Lyngestad, T. (1989) *Strømningsmotstand for luftespalte i tak*. Prosjektoppgave i husbygningsteknikk, Institutt for husbygningsteknikk, Norges Tekniske Høgskole, Trondheim.
- ELSEVIER. Om *ELSEVIER*, 2015. Tilgjengelig fra: <http://www.elsevier.com/about/company-information> (hentet 20.09.2015).
- Falk, J. (2010) *Ventilert luftespalte i yttervegg; luftomsetning og konvektiv fukttransport*. Doktoravhandling. Lunds tekniske høgskole, Lunds universitet, avd. bygningsmaterialer. 2010.
- Falk, J. and Sandin, K. (2013) *Ventilated rainscreen cladding: A study of the ventilation drying process*. Journal of Building and Environment (2013), 173 – 184.
- Furness Controls. *Differential Pressure Transmitter – type FCO0352*. Udatert. Tilgjengelig fra: <http://www.furnesscontrols.com/pdf/FCO352.pdf> (hentet 25.10.2015).
- Geving, S. (1997) *Moisture design of building constructions – Hygrothermal analysis using simulation model. Part 1*. PhD Thesis. Department of Civil and Transport Engineering. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim. Norway.
- Geving, S. og Torgersen, S.E. (1997) *Klimadata for fuktregninger. Referanseår for 12 steder i Norge og klimadata for konstruksjoner mot grunnen*. Prosjektrapport 227, 1997. Norges byggforskningsinstitutt, Trondheim.
- Geving, S og Holme, J. (2010) *Høyisolerte konstruksjoner og fukt*. Prosjektrapport 53, SINTEF Byggeforsk.
- Gullbrekken, L. (2015) *Prosjektbeskrivelse for doktoravhandling - klimatilpasning av tretak*. Institutt for bygg, anlegg og transport, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet – NTNU, Trondheim.
- Gustavsen, A., Uvsløkk, S., Oustad, M., Hofseth, V., Thiis, T., Barfoed, P., Delpech, P. og Dufresene de Virel, M. (2005) *Snøinndrev i kalde luftede tak – vindtunnelforsøk*. Prosjektrapport 382. Norges byggforskningsinstitutt – Byggeforsk.
- Hagentoft, C. E. (2001) *Introduction to building physics*. Lund, Studentlitteratur.
- Hansen, H.E. red. (2013) *Varme og klimateknikk – Danvak*. Danmark, Danvak ApS.
- Hietaniemi, J., Hakkarainen, T., Huhta, J., Jumppanen, U.M., Kouhia, I., Vaari, J. and Weckman, H. (2003) *Fire safety of cavity spaces – Prevention of fire spread in building voids*. Vuorimiehentie 5, VTT Technical Research Centre of Finland.

- Hofseth, V. (2003) *Studie av luftede takkonstruksjoner – luftstrømninger i luftede skrå isolerte tak og snøinndrift i raftkonstruksjoner*. Masteroppgave. Institutt for bygg, anlegg og transport, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet – NTNU, Trondheim.
- Hofseth, V. (2004) *Lufting av skrå isolerte treaktak*. Prosjektoppgave. Institutt for bygg, anlegg og transport, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet – NTNU, Trondheim.
- Holme, J. (2010) *Mould growth in buildings*. PhD Thesis. Department of Civil and Transport Engineering. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim. Norway.
- Hörup Sørensen, H. red. (2004) *Ventilation ståbi* (2. udgave). Köpenhamn, Nyt Teknisk Forlag.
- IEA. International Energy Agency – *Energy efficiency*, 2016. Tilgjengelig fra: <https://www.iea.org/aboutus/faqs/energyefficiency/> (hentet 21.02.2016).
- Illig, W. (1952) *The magnitude of the water vapour transfer value during diffusion processes in walls of housing units, stables and cold storage rooms*. *Gesundheits-Ingenieur* 73 (1952), H. 7/8, S. 124-127.
- Ingebrigtsen, S. (2015) *Ventilasjonsteknikk – Del 1*. Oslo, Skaland Press AS.
- Janssens, A. (1998) *Reliable control of interstitial condensation in lightweight roof systems – calculation and assessment methods*. Doctoral dissertation. Faculty of applied science - Katholieke University of Leuven.
- Jelle, B.P., Breivik, C. and Røkenes, H.D. (2012) *Building integrated photovoltaics products – A state of the art review and future research opportunities*. *Journal of Solar Energy Materials & Solar Cells*, 100, 69-96.
- Johansson, P. (2014) *Determination of the Critical Moisture Level for Mould Growth on Building Materials*. Doctoral thesis. Lund university, department for building physics.
- Journal of Building and Environment. Om Journal of Building and Environment*, 2015. Tilgjengelig fra: <http://www.journals.elsevier.com/building-and-environment/> (hentet 20.09.2015).
- Journal of Building Physics. Om Journal of Building Physics*, 2016. Tilgjengelig fra: <https://uk.sagepub.com/en-gb/eur/journal/journal-building-physics> (hentet 20.02.2016).
- Kehrer, M. and Schmidt, T. (2008) *Radiation Effects on Exterior Surfaces*. In: *Proceedings of the 8th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries*, Copenhagen, June 16-18, 2008, p. 207-212.
- KIMO Instruments – *C 310 Multifunctional transmitter*. Udatert. Tilgjengelig fra: <http://www.kimouk.com/C310-multi-function-transmitter> (hentet 08.05.2016)
- KIMO Instruments – *Air Velocity and temperature probes for class 210 transmitters*. 2016. Tilgjengelig fra: http://www.kimo.fr/produits/1310/ctv_210.html (hentet 08.05.2016)
- Klima 2050. *About Klima 2050*. Udatert. Tilgjengelig fra: <http://www.klima2050.no/what-we-do/> (hentet 29.08.2015)

- Kronvall, J. (1980) *Air flows in building components*. Doctoral dissertation. Division of building technology – Lund institute of technology, Sweden.
- Künzel, H.M. (1995) Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. A paper based on the authors PhD-thesis. Fraunhofer Institute for Building Physics in Holzkirchen.
- Lisø, K.R. og Kvande, T. (2007) *Klimatilpasning av bygninger*. Oslo, SINTEF Byggforsk.
- Meteorologisk institutt. *Å måle været*. Udatert. Tilgjengelig fra: http://met.no/Meteorologi/A_male_varet/Observasjoner_fra_land/Varstasjoner/Automatiske_varstasjoner/Maleinstrumenter/Vindmaler/ (hentet 10.10.2015).
- Miljødirektoratet (2013) *FNs klimapanelers femte hovedrapport: Klima i endring*. Tilgjengelig fra: http://www.miljodirektoratet.no/Documents/publikasjoner/M97/M97_web.pdf
- Moffat, R.J. (1988) *Describing the Uncertainties in Experimental Results*. Experimental Thermal and Fluid Science 1988; 1:3-17. New York. Elsevier Science Publishing Co.
- Myklebost, I og Jansen, E. (2007) *Studie av muggsoppvekst på bygningsmaterialer – risiko for vekst av muggsopp på vindspærre*. Masteroppgave. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet - NTNU.
- National instruments - NI9205. 2016. Tilgjengelig fra: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/208800> (hentet 08.05.2016)
- NS-EN 1991-1-4: 2005: *Vindlaster*. Standard Norge.
- NT Build 304. *Building materials: Ability to prevent dripping of condensation water*. NORDTEST, 2014. Tilgjengelig fra: <http://www.nordtest.info/index.php/methods/building/item/building-materials-ability-to-prevent-dripping-of-condensation-water-nt-build-304.html>
- ORIA. *Om ORIA*. Udatert. Tilgjengelig fra: http://bibsysprimo.hosted.exlibrisgroup.com/primo_library/libweb/action/search.do?vid=BIBSYS (hentet 20.09.2015)
- Pyrocontrol. *Termoelementer*. 2004. Tilgjengelig fra: <http://www.pyrocontrol.no/temperaturkatalogen/46-47.pdf> (hentet 18.10.2015).
- SAGE. *Om SAGE*, 2016. Tilgjengelig fra: <https://uk.sagepub.com/en-gb/eur/company-information> (hentet 20.02.2016).
- SINTEF Byggforsk. *Om SINTEF Byggforsk*. Udatert. Tilgjengelig fra: <http://www.sintef.no/byggforsk/om-oss/#/> (hentet 20.09.2015).
- Sunwoo, Lee., Hoon, P., Myong, S. Y. and Woo. K. (2008) *An experimental study on airflow in the cavity of a ventilated roof*. Building and Environment (44), 1431 – 1439.
- UNEP SBCI (2009) *Buildings and Climate Change*. Tilgjengelig fra: <http://www.unep.org/sbci/pdfs/SBCI-BCCSummary.pdf>

Talev, G. (2011) *Convective moisture transfer coefficients for porous building material surfaces – Theory, wind tunnel design and measurements*. PhD Thesis. Department of Civil and Transport Engineering. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim. Norway.

Uvsløkk, S. (2005) *Tak med kaldt loft. Delrapport prosjekt 4 i FoU-programmet «Klima 2000»*. SINTEF Byggforsk

Uvsløkk, S. og Vågen, M. (2012) *Dampåpne undertak – fuktegenskaper ved vinterforhold*. Rapportnummer 3D1142. Trondheim, SINTEF Byggforsk.

WUFI (a) WUFI Forum Topic: *Water Vapor Transfer Coefficients*, 2015. Tilgjengelig fra: <https://www.wufi-forum.com/viewtopic.php?t=1127> (hentet 01.03.2016).

WUFI (b) – *Water Vapor Transfer Coefficients*. Datert 2008. Tilgjengelig fra <http://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php5/Details:WaterVaporTransfer> (hentet 01.03.2016).

WUFI (c) – *WUFI Pro 5.3 online help. Dialog: Edit Hygrothermal Sources*, udatert. Tilgjengelig gjennom programmet WUFI Pro 1D.

WUFI (d) - *What is WUFI?* 2016. Tilgjengelig fra: <https://wufi.de/en/software/what-is-wufi/> (hentet 13.03.2016).

Ødegaard, H. red. (2013) *Vann- og avløpsteknikk*. Hamar, Norsk Vann.

Økland, Ø. (1998) *Convection in Highly Insulated Building Structures*. PhD Thesis. Department of Civil and Transport Engineering. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim. Norway.

Östmann, B. (2012) *Brannsikre trehus 3: nordisk-baltisk kunnskapsoversikt og veiledning*. Stockholm, SP Sveriges Tekniske Forskningsinstitut.

VEDLEGG

Vedlegg 1. Masterkontrakt

Vedlegg 2. Teori

Vedlegg 2.1. Karakterisering av konvektiv varmeoverføring i luftespalten

Vedlegg 2.2. Omregningsfaktorer for konvektiv fuktoverføringskoeffisient

Vedlegg 3. Testmodell

Vedlegg 3.1. Beskrivelse av testmodellen

Vedlegg 3.2. Utførelse av raftekassene

Vedlegg 3.3. Utførelse av møne

Vedlegg 4. WUFI

Vedlegg 4.1. Forenklinger og begrensninger ved modellen i WUFI

Vedlegg 4.2. Parameterstudie 1. Effekten av økt isolasjonstykkelse

Vedlegg 4.3. Parameterstudie 2. Effekten av økt spaltehøyde

Vedlegg 4.4. Parameterstudie 3. Effekten av økt lufthastighet

Vedlegg 4.5. Parameterstudie 4. Effekten av økt takhelning

Vedlegg 5. ZEB Test Cell

Vedlegg 5.1. Detaljtegning - takkonstruksjonen i ZEB Test Cell

Vedlegg 5.2. Bilder av takoppbygningen og måleutstyret

Vedlegg 5.3. Resultater fra januar

LUFTSTRØMNING I SKRÅ TRETAK

- eksperimentelle undersøkelser og numeriske beregninger

VEDLEGG 1. MASTERKONTRAKT

MASTEROPPGÅVE

(TBA4905 Bygnings- og materialteknikk, masteroppgåve)

VÅREN 2016

for

Espen Hansen

Luftstrømning i skrå tretak

eller

Ventilation of pitched wooden roofs

BAKGRUNN

Tretak er ein velprøvd og mykje bruka konstruksjonstype i Norge. Dei ulike konstruksjonsprinsippa for tretak er grundig omtalt i Byggforskserien. Grunnprinsippet er at skrå tretak må luftast for å transportere bort:

1. fukt frå takkonstruksjonen og dermed hindre soppvekst og andre fuktskadar
2. varme og dermed hindre uønska snøsmelting og ising ved takfoten og i takrenner

Utført etter dei retningslinjene som er gitt i Byggforskserien, er tretak sett på som ein robust konstruksjonsmetode. Men retningslinjene er for lite nyanserte og konkrete, særleg for store takflater, tak med låge vinklar, tak med store vindauge og tak med integrerte solceller/solfangere.

OPPGÅVE

For å auke forståinga og kunnskapsgrunnlaget for lufting og uttørking av tretak ønsker vi å gjennomføre laboratoriemålingar på ein modell av eit skrått tretak. Målingane skal forsøkast verifisert med numeriske berekningar. Formålet med studien er å undersøke strømningsforholda i luftespalta mellom undertak og taktekning. I tillegg er det eit mål for oppgåva å framskaffe ei oversikt over fukt- og temperaturforhold i luftespalta i skrå tak.

GENERELT

Oppgåveteksten er meint som ei ramme for kandidatens arbeid. Justeringar vil kunne skje undervegs, når ein ser korleis arbeidet går. Eventuelle justeringar må skje i samråd med faglærer ved instituttet.

Ved vurderinga vert det lagt vekt på grundigheit i arbeidet og sjølvstendigheit i vurderingar og konklusjonar, samt at framstillinga er velredigert, klår, eintydig og ryddig utan å vere unødig voluminøs.

Det innleverte arbeidet skal innehalde:

- standard rapportframside (automatisk frå DAIM, <http://daim.idi.ntnu.no/>)
- tittelside med ekstrakt og stikkord (mal finn ein på sida <http://www.ntnu.no/bat/skjemabank>)
- samandrag på norsk og engelsk (studentar som skriv masteroppgåve på eit ikkje-skandinavisk språk og som ikkje handterer eit skandinavisk språk, treng ikkje skrive samandrag av masteroppgåva på norsk)
- hovudteksten
- oppgåveteksten (denne teksten signert av faglærer) som Vedlegg 1.

Besvarelsen kan evt. utformas som ein vitenskapelig artikkel for internasjonal publisering. Besvarelsen inneheld da de same punktane som beskrivi over, men der hovudteksten omfattar ein vitenskapelig artikkel og ein prosessrapport.

Instituttets råd og retningslinjer for rapportskriving ved prosjektarbeid og masteroppgåve oppheldar seg på <http://www.ntnu.no/bat/studier/oppgaver>

Kva skal innleverast?

Rutinar knytt til innlevering av masteroppgåva er nærare forklart på <http://daim.idi.ntnu.no/>.

Trykking av masteroppgåva skal tingast via DAIM direkte til Skipnes Trykkeri som leverer den trykte oppgåva til instituttkontoret 2-4 dagar seinare. Instituttet betalar for 3 eksemplar, der instituttet skal ha 2 eksemplar. Ekstra eksemplar må kostast av kandidaten/ ekstern samarbeidspartnar.

Ved innlevering av oppgåva skal kandidaten levere arbeidet i digital form i pdf- og word-versjon med underliggjande materiale (til dømes innsamla data) i digital form (t.d. excel-filer) til veileder. Vidare skal kandidaten levere innleveringsskjemaet (frå DAIM) der både Ark-Bibl i SB I og Fellestenester (Byggsikring) i SB II har signert på skjemaet. Innleveringsskjema med dei aktuelle signaturane skal underskrivast av instituttkontoret før skjemaet vert levert til Fakultetskontoret.

Dokumentasjon som med instituttets støtte er samla inn under arbeidet med oppgåva, skal leverast inn saman med oppgåva.

Arbeidet er etter gjeldande reglement NTNU sin eigedom. Eventuell bruk av materialet kan berre skje etter godkjenning frå NTNU (og ekstern samarbeidspartnar der dette er aktuelt). Instituttet har rett til å bruke resultatata av arbeidet til undervisnings- og forskingsformål som om det var utført av ein tilsett. Ved bruk ut over dette, som utgjeving og annen økonomisk bruk, må det inngåast særskilt avtale mellom NTNU og kandidaten.

(Evt) Avtalar om ekstern rettleiing, gjennomføring utanfor NTNU, økonomisk stønad m.m. gjer ein greie for her når dette er aktuelt. Sjå <http://www.ntnu.no/bat/skjemabank> for avtaleskjema.

Helse, miljø og sikkerheit (HMS):

NTNU legg stor vekt på tryggleiken til den enkelte arbeidstakar og student. Tryggleiken til den enkelte skal kome i første rekke og ingen skal ta unødige sjansar for å få gjennomført arbeidet. Studenten skal derfor ved uttak av masteroppgåva få utdelt brosjyren "Helse, miljø og sikkerheit ved feltarbeid m.m. ved NTNU".

Dersom studenten i arbeidet med masteroppgåva skal delta i feltarbeid, tokt, synfaring, feltkurs eller ekskursjonar, skal studenten setje seg inn i "Retningslinje ved feltarbeid m.m." Dersom studenten i arbeidet med oppgåva skal delta i laboratorie- eller verkstadarbeid skal studenten setje seg inn i og følgje reglane i "Laboratorie- og verkstedhåndbok". Disse dokumenta finn ein på fakultetet sine HMS-sider på nettet, sjå <http://www.ntnu.no/ivt/adm/hms/>.

Studentar har ikkje full forsikringsdekning gjennom sitt forhold til NTNU. Dersom ein student ønskjer same forsikringsdekning som tilsette ved universitetet, vert det tilrådd at han/ho teiknar reiseforsikring og personskadeforsikring. Meir om forsikringsordningar for studentar finn ein under same lenke som ovanfor.

Oppstart og innleveringsfrist:

Oppstart og innleveringsfrist er i samsvar med informasjon i DAIM.

Faglærer ved instituttet: Tore Kvande

Institutt for bygg, anlegg og transport, NTNU
Dato: 14.01.2016, (revidert 04.05.2016)

Underskrift



Faglærer

LUFTSTRØMNING I SKRÅ TRETAK

- eksperimentelle undersøkelser og numeriske beregninger

VEDLEGG 2. TEORI

VEDLEGG 2. TEORI

2.1. KARAKTERISERING AV VARMEOVERFØRING I EN LUFTEPALTE

I det følgende gis grunnlaget for å karakterisere varmeoverføringen i en luftespalte. Denne delen tjener som et supplement til masteroppgavens kapittel 4.2. De ulike definisjonene og deres sammenhenger er gitt i den følgende (Hansen, red., 2013).

$$Re = \frac{u_m \cdot d_h \cdot \rho}{\eta} = \frac{u_m \cdot d_h}{\nu} \quad (1)$$

Hvor:

- u_m = Luftens middelhastighet [m/s]
- d_h = Hydraulisk diameter [m]
- η = Luftens dynamiske viskositet [Ns/m²]
- ρ = Luftens densitet [kg/m³]
- ν = Luftens kinematiske viskositet [m²/s]

$$Pr = \frac{\rho \cdot c_p \cdot \nu}{\lambda} \quad (2)$$

Hvor:

- ρ = Luftens densitet [kg/m³]
- c_p = Luftens varmekapasitet
- ν = Luftens kinematiske viskositet [m²/s]
- λ = Varmekonduktivitet for luft

$$Gr = \frac{|g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot l^3|}{\nu^2} \quad (3)$$

Hvor:

- g = Tyngdeakselerasjonen, [9,81 m²/s]
- β = Romutvidelseskoeffisient [K⁻¹]
- Δt = Temperaturdifferanse over spaltetverrsnittet [K]
- l = Spaltens lengde [m]
- ν = Luftens kinematiske viskositet [m²/s]

Tabell 1. Sammenhenger for karakterisering av varmeoverføring i en spalte (COMSOL, 2016c)

Navn	Symbol	Uttrykk	Betydning
Reynolds tall	Re	Formel 1.	Forhold mellom treghet og viskøse krefter Re > 4000 indikerer turbulent strømning
Prandtls tall	Pr	Formel 2.	Forhold mellom viskositet og termisk diffusjon Lav Pr – diffusjons dominert varmeoverføring Høy Pr – konveksjons dominert varmeoverføring
Grashofs tall	Gr	Formell 3.	Forhold mellom termisk oppdrift og viskøse krefter Gr > 10 ⁸ indikerer turbulens
Rayleighs tall	Ra	Gr · Pr	Lav Ra – konduksjon dominerer Høy Ra – konveksjon dominerer Veldig høy Ra (>10 ⁸) – Turbulent konveksjon
Grashofs og Reynolds tall	Gr/Re ²	$\frac{Gr}{Re^2}$	>> 1 – indikerer naturlig konveksjon 0 (1) – indikerer blandet konveksjon << 1 – indikerer tvungen konveksjon

2.2. KONVEKTIV FUKTOVERFØRINGSKOEFFISIENT

HAGENTOFT (2001):

Vanndampmotstand for en overflate brukes ofte i stedet for en konvektiv fuktoverføringskoeffisient, sammenhengen er som følger:

$$Z_{vs} = \frac{1}{\beta} \quad (4)$$

$Z_{vi} = 360 \text{ s/m}$ – vanndampmotstand for innvendige overflater

$Z_{ve} = 60 \text{ s/m}$ – vanndampmotstand for innvendige overflater

KÜNZEL (1995) GIR FØLGENDE SAMMENHENG:

Varmeoverføringskoeffisient			Vanndampoverføringskoeffisient	
Inne:	8	(7,6923) $\text{W/m}^2\text{K}$	$25 \cdot 10^{-9}$	$\text{kg/m}^2\text{sPa}$
Ute:	17	(17,8571) $\text{W/m}^2\text{K}$	$75 \cdot 10^{-9}$	$\text{kg/m}^2\text{sPa}$

GEVING OG THUNE (2002), VISER TIL FAKTORER FOR OMREGNING:

$$x \text{ m/s} = x \cdot 7,407 \cdot 10^{-6} \text{ kg/(m}^2\text{sPa)}$$

$$x \text{ kg/(m}^2\text{sPa)} = x \cdot 1,35 \cdot 10^5 \text{ m/s}$$

$$25 \cdot 10^{-9} \text{ kg/m}^2\text{sPa} \cdot 1,35 \cdot 10^5 = 0,003375 \text{ m/s} \quad Z_e = 1/0,003375 \text{ m/s} = 296,3 \text{ s/m}$$

$$75 \cdot 10^{-9} \text{ kg/m}^2\text{sPa} \cdot 1,35 \cdot 10^5 = 0,0101 \text{ m/s} \quad Z_i = 1/0,0101 \text{ m/s} = 98,76 \text{ s/m}$$

WUFI:

$$\beta = 7 \cdot 10^{-9} \cdot \alpha_c$$

$$\text{Standard overgangsmotstand inne: } 0,13 \text{ m}^2\text{K/W} = 7,6923 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\text{Standard overgangsmotstand ute: } 0,056 \text{ m}^2\text{K/W} = 17,8571 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\text{Ute: } 7 \cdot 10^{-9} \cdot ((1/0,056) - 6,5) = 7,95 \cdot 10^{-8} \text{ kg/m}^2\text{sPa} \quad (0,011 \text{ m/s})$$

$$\text{Inne: } 7 \cdot 10^{-9} \cdot ((1/0,13) - 4,5) = 2,2 \cdot 10^{-8} \text{ kg/m}^2\text{sPa} \quad (0,003 \text{ m/s})$$

Grunnen til at det foretas en subtraksjon av overgangskoeffisienten, er at WUFI oppgir en overgangsmotstand som inkluderer både den konvektive delen og strålingsbidraget.

Overgangskoeffisienten i WUFI ser følgelig slik ut:

$$\alpha = \alpha_r + \alpha_c \quad (5)$$

Hvor:

α	=	Varmeoverføringskoeffisient [$\text{W/m}^2\text{K}$]
α_r	=	Konvektiv varmeoverføringskoeffisient [$\text{W/m}^2\text{K}$]
α_c	=	Koeffisient for strålingsutveksling [$\text{W/m}^2\text{K}$]

KILDER:

COMSOL – 2016c. *Heat Transfer with COMSOL Multiphysics - convection*. COMSOL Multiphysics training course. Trondheim, march 2016.

Geving, S og Thune, J. V (2002) *Fukt i bygninger*. Håndbok 50. Norges byggforskningsinstitutt, Oslo.

Hagentoft, C. E. (2001) *Introduction to building physics*. Lund, Studentlitteratur.

Hansen, H.E. red. (2013) *Varme og klimateknikk – Danvak*. Danmark, Danvak ApS.

Künzel, H.M. (1995) Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. A paper based on the authors PhD-thesis. Fraunhofer Institute for Building Physics in Holzkirchen.

WUFI (b) – *Water Vapor Transfer Coefficients*. Datert 2008. Tilgjengelig fra <http://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php5/Details:WaterVaporTransfer> (hentet 01.03.2016).

LUFTSTRØMNING I SKRÅ TRETAK

- eksperimentelle undersøkelser og numeriske beregninger

VEDLEGG 3. TESTMODELL

VEDLEGG 3. TESTMODELLEN

Økt forståelse av luftstrømning i skrå tretak, er blant annet innhentet ved målinger på en testmodell. Det er høsten 2015 bygget en testmodell av et skrått tretak i SINTEF Byggforsk sitt laboratorium. I planleggingsprosessen av modellen våren 2015, kom fleksibilitet frem som en viktig parameter vedrørende utførelsen av modellen. Modellen er planlagt med tanke på å kunne teste ulike parametere, slik som takhelning, raft- og møneløsninger, og ulike undertak. Videre var det det essensielt i planleggingsprosessen at testmodellen enkelt kunne transporteres mellom rommet hvor testene utføres, og verkstedet hvor riggen modifiseres, i henhold til aktuelle tester. Hvordan testmodellen er bygget for å ivareta målene med prosjektet er omtalt i det følgende. Testmodellen er fullført våren 2016.

3.1. OPPBYGNING

3.1.1. NEDRE DEL

Testmodellen består av to hoveddeler. Nedre del fungerer som plattform og som en støtte for den øvre delen, videre omtalt takplanet. Testmodellen er utformet med en knevegg, som taket hengsles på. Kneveggen er målt fra rammens underside til toppen av kneveggen. For å få en større flate til å feste hengslene, er det på kneveggens topp montert en 48x198mm toppsvill. Taket støttes av lekter, som er plassert 2535 mm fra kneveggens ytre side. Rammen er utstyrt med seks svingbare hjul, hvorav de fremste og bakerste hjulene har lås. Den nedre delen er illustrert i figur 1. Den nedre delens rammespesifikasjoner er gitt i tabell 1, mens materialvalg er gitt i tabell 2.



Figur 1. Testmodell - nedre del.

Tabell 1. Rammespesifikasjon.

Rammespesifikasjon	Dimensjon
Lengde	3000 mm
Bredde	850 mm
Kneveggens høyde	800 mm
Takstøttens høyde	1082 mm

Tabell 2. Materialvalg for nedre del.

Del av rammen	Dimensjon/material
Gulvbjelker	48x148mm bjelker
Knevegg	48x148mm bjelker
Kledning - knevegg	15 mm kryssfinerplater
Takstøtte	48x48 lekter

3.1.2. TAKPLANET

Øvre del av testmodellen utgjør takplanet. Denne delen hengsles til den nedre delen, slik at taket om ønskelig kan justeres til en annen takvinkel. Takvinkelen som er valgt for prosjektet er 10 grader. Valget av takvinkel er tatt på bakgrunn av at denne vinkelen gav en overkommelig arbeidshøyde, med tanke på utforming av takets øvre del. Takplanet består av to K-bjelker, med tverrgående bjelker henholdsvis i topp, bunn og i midten av takplanet. Takplanet er isolert med Glava proff 35. Takplanets øvre side er kledd med sponplater, for å oppnå en glattest mulig overflate. Av praktiske årsaker er også takets underside kledd med sponplater. Takplanets spesifikasjoner er å finne i tabell 3, mens takplanets materialvalg er gitt i tabell 4. Takplanet montert på nedre del av rammen er illustrert i figur 2.



Figur 2. Testmodell med takplanet montert.

Tabell 3. Takplanets spesifikasjoner.

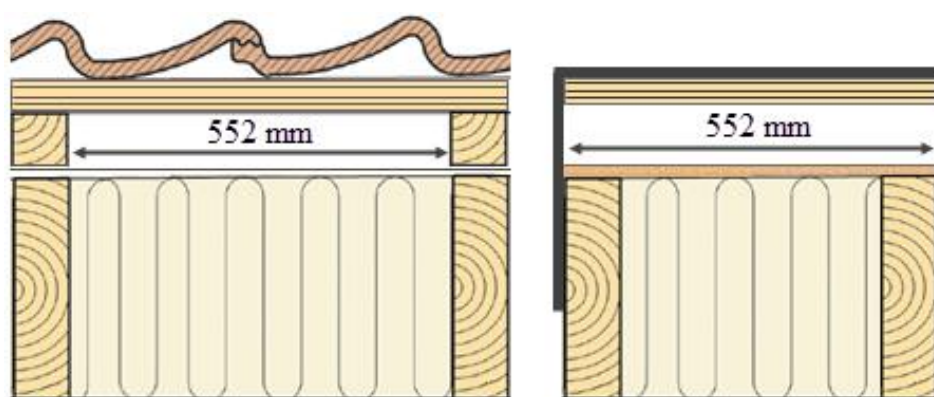
Rammespesifikasjon	Dimensjon
Lengde	3000 mm
Bredde	850 mm
Høyde	800 mm

Tabell 4. Materialvalg for takplanet.

Del av rammen	Dimensjon/material
Overflater	12 mm sponplater
Bjelker	45x200 mm K-bjelke

3.1.3. TAKBOKS

En av hensiktene i inneværende oppgave, var å bygge en modell som var fleksibel og praktisk utformet. For å fremme dette ble det valgt å utføre øvre del av taket, som utgjør selve luftespalten, som en kanal. Kanalen blir så tredd over takplanet, og former således en luftespalte med takplanet. Innledningsvis i planleggingsfasen våren 2015, var kanalen tenkt utført i plexiglass, slik at takboksen ble transparent. Lexan-plater, som er et aktuelt transparent produkt, er på sin side et relativt fleksibelt materiale. For sammenligningens del, er det viktig med en kontinuerlig luftespalte, uten buler eller in-kontinuerligheter. På bakgrunn av dette ble takboksen valgt utformet i aluminium, som utgjør en meget stiv takboks. Ettersom takboksen skal utgjøre selve luftespalten i ett skrått tretak, ble innvendig bredde valgt lik 552 mm. Det var ønskelig å kunne teste en høyde på luftespalten inntil 100 mm, slik at takboksen måtte utformes med sidekanter som tillater festing av en slik høyde over takplanet. Tankegangen bak utformingen av takboksen er visualisert i figur 3.



Figur 3. Tverrsnitt av et tak med forenklet undertak (til venstre) og utførelse av takboksen. Illustrasjonen er basert på (Byggforskserien 525.102, figur 42), og er videreutviklet av Espen Hansen 2016.

Takboksen er utført med sidevegger og et topplokk av 6 mm tykke aluminiumsplater. For avstiving, er det langs hele takboksen, og på tvers av takboksen, montert (6x65x65) mm vinkler av aluminium. Boksens spesifikasjoner er gitt i tabell 5.

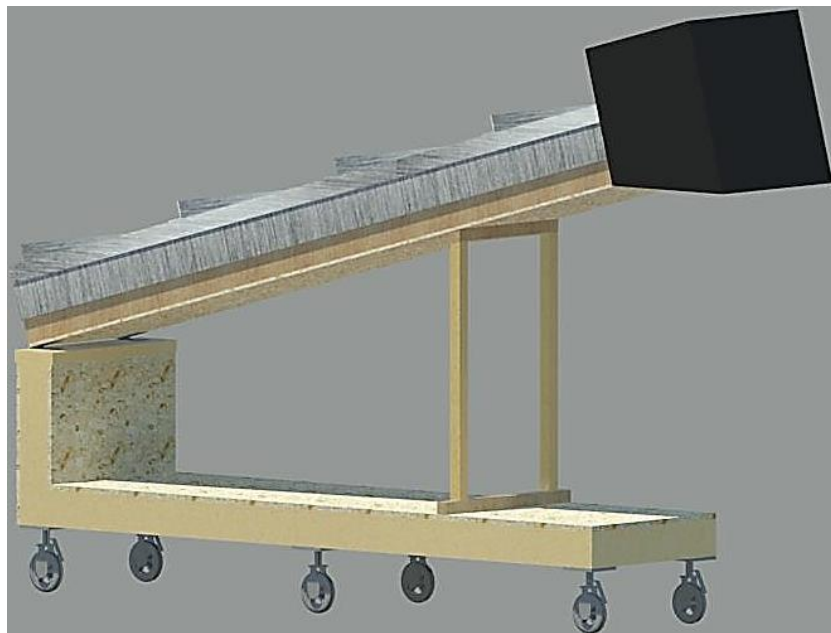
Tabell 5. Takboksens spesifikasjoner.

Takboks	Dimensjon
Lengde	3550 mm
Bredde	552 mm
Høyde	305 mm
Godstykkelse	6 mm

Takboksen kan enkelt monteres av takplanet, om annen spaltehøyde eller undertak skal testes. For å lette arbeidet med å løfte av takboksen, justeres takplanet horisontalt. Når taket eller takboksen er ferdig endret, løftes takboksen tilbake, og støtten som gir en 10 graders helning monteres så fast.

3.1.4. MØNEHETTE

Øverst på takplanet er det bygget en mønehette. Dette er en del som omslutter konstruksjonen helt, hvor luften vil strømme ut av takkonstruksjonen og ned gjennom rørsystemet. Mønehetta består av sidevegger, topplokk, fremre og bakre vegg og et bunnlokk med ett hull til PVC-røret. De ulike delene er utført i vannfast 18 mm tykke kryssfinerplater. Samtlige deler unntatt den nedre delen er festet til takboksen. Således vil mønehetta følge takboksen, når spaltehøyden justeres. Bunnen er montert fast til takplanet, og vil forbli i sin posisjon, uavhengig av spaltehøyde. Fastmontert bunn ble bestemt på grunnlag av et ønske om å lette arbeidet med rørføringen, fra mønehetta til vifta. Mønehetta teipes etter hver justering av spaltehøyden til takboksen, for å oppnå tilstrekkelig lufttetthet. En illustrasjon av mønehetta er gitt i figur 4.

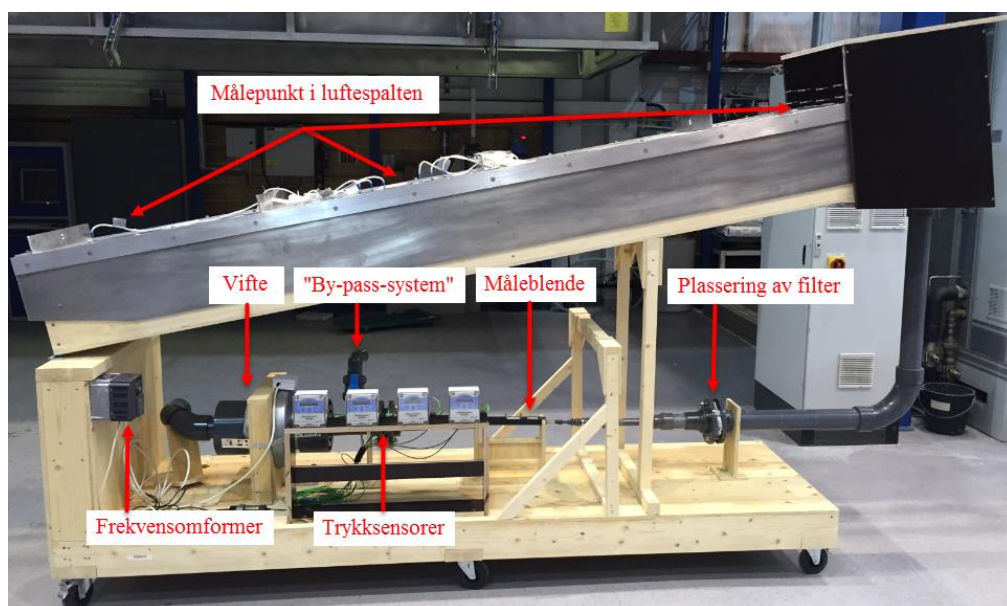


Figur 4. Testmodell med påmontert mønehette.

3.1.5. RØRSYSTEMET

Luftstrømning i prosjektet er basert på tvungen konveksjon, forårsaket av en kanalvifte som drar lufta gjennom luftspalten, ut i mønehetta, og videre ned i rørsystemet. For å kunne måle lufthastigheten i luftspalta, måtte et rørsystem fra mønehetta til vifta som driver luftstrømningen monteres. I dette prosjektet er det valgt 90 mm PVC-rør, som limes med PVC-lim i skjøtene. En illustrasjon av rørsystemet med de ulike delene er vist i figur 5.

Lufthastighet i luftspalta er en essensiell parameter i prosjektet. Lufthastighet kan eksempelvis måles ved bruk av et anemometer, eller ved bruk av en måleblende, som måler volumstrøm i kanalen. I dette prosjektet er det valgt å benytte måleblende/laminærstrømsmåler, da dette er en mer praktisk løsning for angitt utforming. Et anemometer ville blitt vanskelig å montere i spalten, og valget falt derfor på bruk av måleblende.



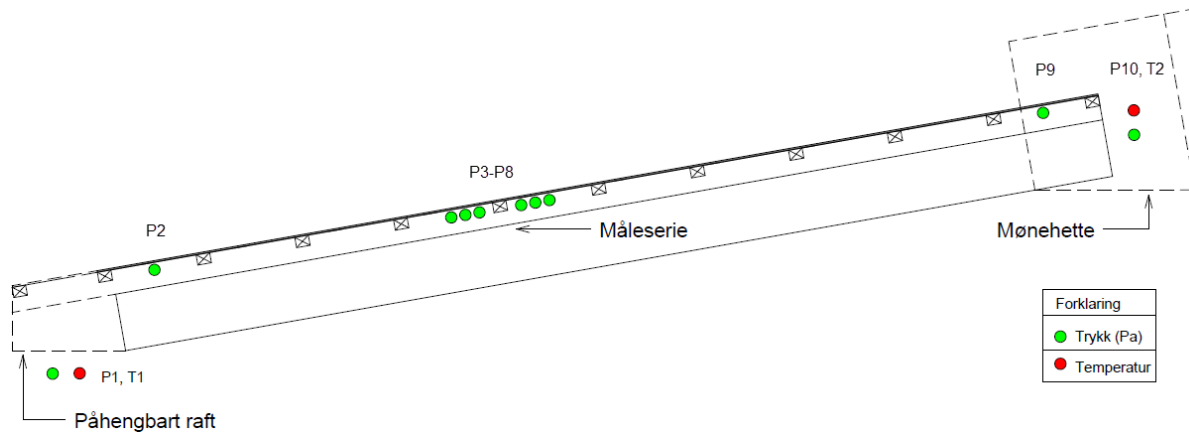
Figur 5. Testmodellens rørføring med tilhørende komponenter og sensorer.

SINTEF Byggforsk har tre måleblender som benyttes under testing av lufttetthet og luftgjennomgang for bygningskomponenter. Måleblenden kunne således ikke monteres fast på testmodellen. På bakgrunn av dette, måtte en fleksibel løsning for montering av måleblenden utarbeides. Slik rørføringen fra mønehetta til vifta er utført, muliggjøres et raskt og effektivt bytte av måleblenden. På bakgrunn av aktuelle spaltetverrsnitt og de respektive lufthastighetene som skal testes, var det være tilstrekkelig å benytte den største måleblenden SINTEF Byggforsk besitter. Det bemerkes at figur 5 viser en mindre måleblende, enn hva som er benyttet.

For å kunne lage et system hvor en enkelt kan montere av og på måleblenden, må en basere seg på løse skjøter uten bruk av PVC-lim. For å oppnå tilstrekkelig lufttette skjøter, teipes skjøtene mellom rørføringen og måleblenden. Måleblendene er sensitive for smuss, hvilket betinger montering av et filter før måleblenden. Filteret i prosjektet er plassert i mutterskjøten på den nedre delen av rammen.

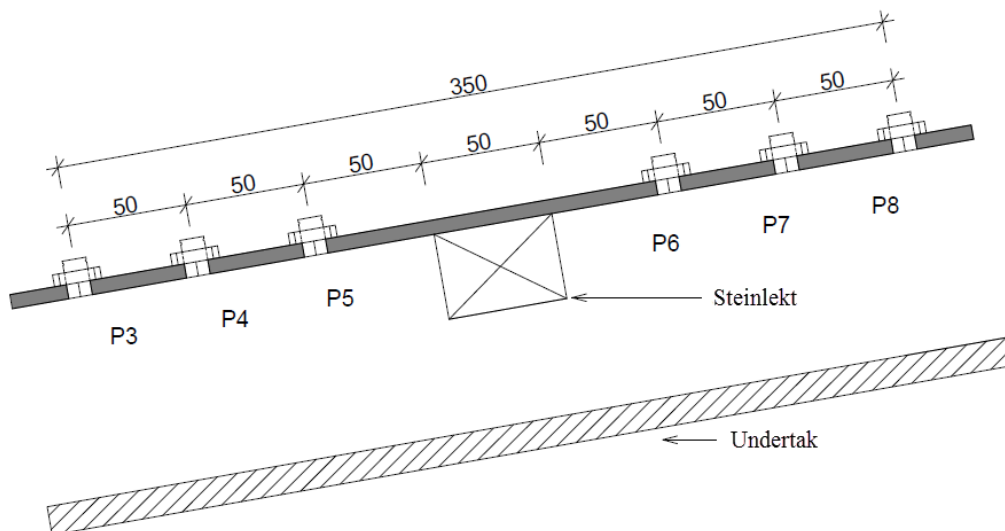
3.1.6. SENSORPLASSERING

Beregning av støttapskoeffisienter betinger måling av trykktapet over enkeltmotstandene i systemet. Ettersom det skal måles trykktap over raft, steinleker og møne, måtte taket utstyres med et flertalls målepunkt. Slik testmodellen er bygd opp, er det 10 sensorplasseringer som er av interesse. Det er investert i fire nye trykksensorer, som videre må benyttes til å måle 10 punkter i testmodellen. En illustrasjon av sensorplasseringene i takplanet er vist i figur 6.



Figur 6. Illustrasjon av sensorplasseringer.

Det var innledningsvis knyttet usikkerhet til hvilke målepunkter som gir et mest korrekt bilde på trykktapet over steinleker i takkonstruksjonen. For å innhente tilstrekkelig data, ble en steinlekt valgt testet mer detaljert, slik illustrert i figur 7.



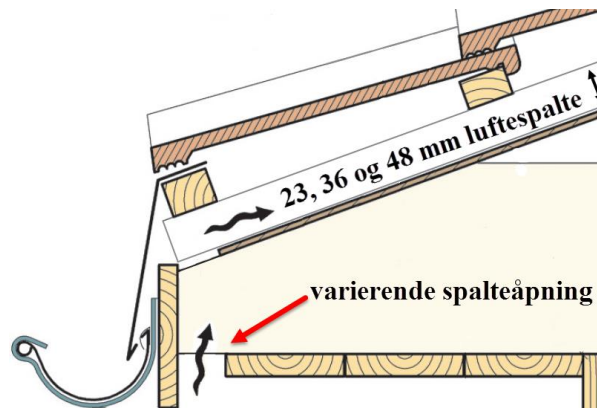
Figur 7. Detalj av måleserie.

I tillegg til å måle trykk i posisjonene gitt i figur 6, velges det å måle trykktapet over et større antall steinleker, mellom trykksensor P3 og P9. Således kan trykktapet midles over antallet steinleker, og sammenlignes med støttapet målt over en enkelt steinlekt.

3.2. UTFØRELSE AV RAFT-ALTERNATIVENE

3.2.1. RAFT – ALTERNATIV 1

Det var innledningsvis ønskelig å måle trykktapet over et raft, ettersom det i dag eksistere begrenset med data vedrørende støttapskoeffisienter for raftekasser. Raft-alternativ 1 er utført med spalteåpninger i raftets underside, slik vist i figur 8.



Figur 8. Tradisjonell utførelse av en raftekasse, med spalteåpninger i raftekassens nedre del. Illustrasjonen er basert på (Byggforskserien 525.102, figur 713a), og er bearbeidet av Espen Hansen 2016.

Utførelse av aktuelt raft i laboratoriet, er delvis forenklet fra virkeligheten. I laboratoriet er undertaket avsluttet ved vegglivet, og ikke ført ut jevnt med spalten i raftet, slik illustrert i figur 8. Dette medfører at trykktapet over raftekassen blir noe mindre enn i virkeligheten. Til gjengjeld er luftstrømning gjennom taksteinenes panner neglisjert i laboratoriet, slik at dette vil kunne veie opp for den forenklete utførelsen av undertaket. Utførelse av aktuelt raft i laboratoriet er illustrert i figur 9.

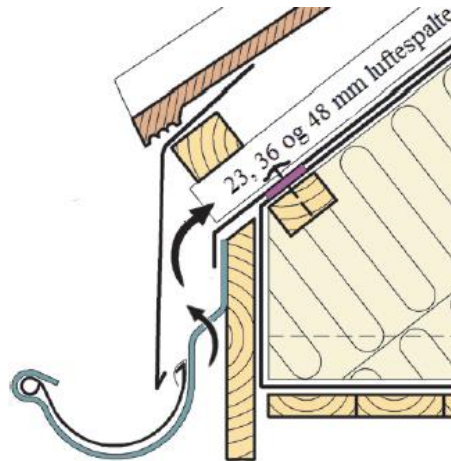


Figur 9. Utførelse av raft-alternativ 1, med spalteåpninger i raftekassens nedre del. Figuren viser alternativet med 1x50 mm spalteåpning, uten fluenetting.

Fluenettingen som benyttes har en maskevidde på 1,6 mm og en trådtykkelse på 0,28 mm.

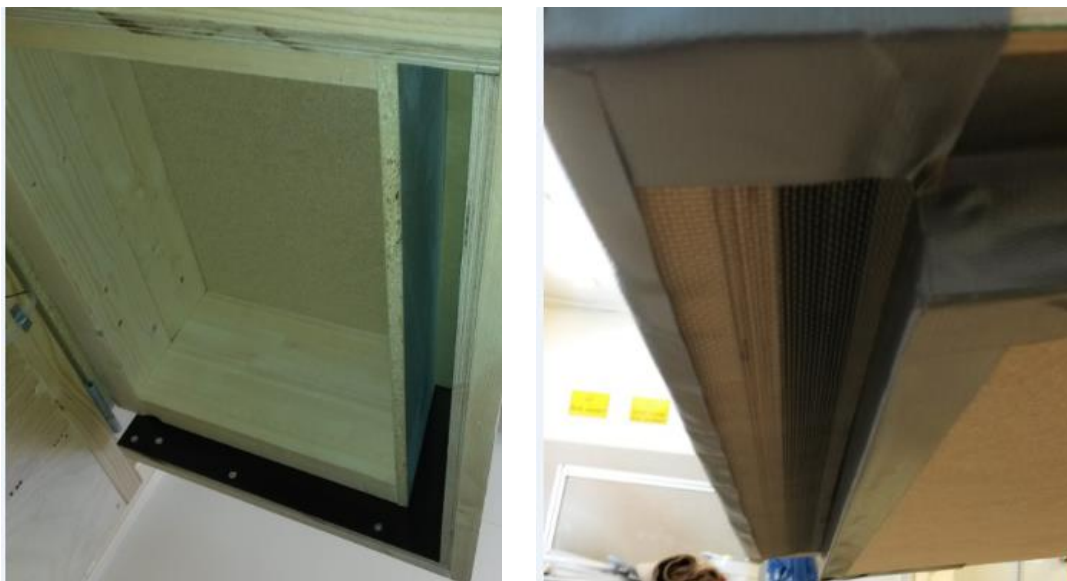
3.2.2. RAFT – ALTERNATIV 2

I tillegg til en tradisjonell utførelse av raftekassen, ble en løsning hvor lufting foretas bak takrenna testet. Løsningen er delvis forenklet fra virkeligheten, ved at luftingen bak takrenna kun foretas fra dets underside. I realiteten vil uteluften kunne strøme gjennom taksteinens panner, og medføre at trykktapet over aktuell løsning for raftekassen reduseres, sammenlignet med resultatene som fremgår i dette studiet.



Figur 10. Utførelse av en raftekasse hvor luftingen i sin helhet foretas mellom takrenne og forkantbord. Illustrasjonen er basert på (Byggforskserien 525.102, figur 712b), og er bearbeidet av Espen Hansen våren 2016.

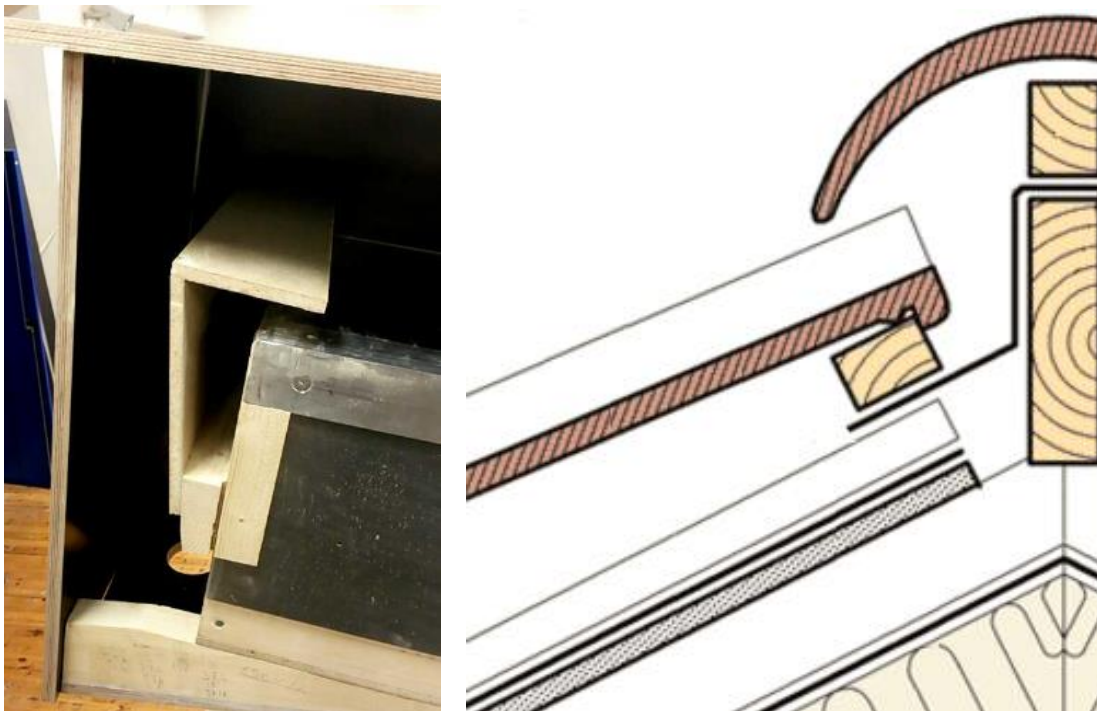
Figur 11 viser utførelse av raft-alternativ 2 i laboratoriet. Her er en forlengelse av takplanet montert, slik at en oppnår en avstand på 25 mm fra forkantbordet, til raftekassens fremre side, ment å representere takrenna og tilhørende blekk. Det bemerkes at bunnplaten og teiping ikke vises i illustrasjonen til venstre i figur 11.



Figur 11. Utførelse av raft-alternativ 2, med lufting mellom forkantbord og takrenne. Figuren viser alternativet uten fluenetting (til venstre) og med fluenetting montert.

3.3. UTFØRELSE AV MØNE

For å begrense arbeidsmengden i laboratoriet, er testene kun utført med en møneløsning, slik illustrert i figur 12. Møneløsningen kan sies å være en typisk for skrå tretak utført med takstein som tekking. Figur 12 viser mønehetta før siste sidevegg ble montert. Det bemerkes at møneløsningen går over hele bredden av mønehetta, slik at luften tvinges gjennom tverrsnittsendringene som representerer møne.



Figur 12. Utførelse av møneløsningen (venstre), og prinsipiell utførelse i henhold til (Byggforskserien 525. 101, figur 82a). Illustrasjonen til høyre er bearbeidet av Espen Hansen våren 2016.

Utførelse av møneløsningen i laboratoriet måtte forenkles fra virkeligheten. Det bemerkes at trykkmotstanden gitt av luftstrømning gjennom taksteinens panner, og motstanden gitt av mønebånd, vil øke trykktapet betydelig. I realiteten blir møneløsningen utført med mulighet for gjennomlufting under mønebordet, som medfører at trykkmotstanden over mønet reduseres. Ettersom muligheten for gjennomlufting ikke er hensyntatt i testene, er det nærliggende å tro at dette vil veie opp for noe av trykkmotstanden gitt av mønebånd og takstein.

3.4. BEHANDLING AV USIKKERHET VED MÅLINGENE

I dette prosjektet blir støttapskoeffisienter målt og beregnet ut fra målinger i laboratoriet. Dette medfører at støttapskoeffisientene blir et resultat av flere uavhengige variabler. Støttapskoeffisientene kan følgelig skrives:

$$\xi = f(x, y, z, w)$$

Formel for beregning av støttapskoeffisient:

$$\xi = \frac{\Delta P \cdot 2}{\rho \cdot u_m^2}$$

Usikkerheten for støttapskoeffisienten kan beregnes som:

$$\Delta \xi = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \cdot \Delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial y} \cdot \Delta y\right)^2 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial z} \cdot \Delta z\right)^2 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial w} \cdot \Delta w\right)^2}$$

Vi får følgende usikkerheter:

$$\Delta \xi = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial \xi}{\partial (\Delta P)} \cdot \Delta (\Delta P)\right)^2 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial T} \cdot \Delta T\right)^2 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial A} \cdot \Delta A\right)^2 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial q} \cdot \Delta q\right)^2}$$

Enkeltelementene er sammensatt slik:

$$\Delta P = P_1 - P_2$$

$$\rho = \frac{293,15 \text{ K} \cdot 1,205 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{(273,15 \text{ K} + \theta_{\text{spalte}} \text{ } ^\circ\text{C})} = \frac{a}{T}$$

$$u_m^2 = \left(\frac{q}{A}\right)^2 = \frac{\left(\frac{1}{\text{min}}\right)^2}{(\text{m}^2)^2} = \frac{\left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \frac{1}{60} \frac{1}{1000}\right)^2}{(\text{m}^2)^2} = \frac{\left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \frac{1}{60\,000}\right)^2}{(\text{m}^2)^2}$$

Ved å skrive om formelen for støttapskoeffisient fås følgende uttrykk:

$$\xi = \frac{2 \cdot \Delta P \cdot T \cdot A^2 \cdot 60000^2}{a \cdot q^2}$$

En støttapskoeffisient er ubenevnt. Det er ved en modifisering av formelverket hensiktsmessig å kontrollere at benevningen stemmer:

$$\xi = \frac{2 \cdot \Delta P \cdot T \cdot A^2}{a \cdot q^2} = \frac{\text{Pa} \cdot \text{K} \cdot \text{m}^2}{\text{K} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)^2} = \frac{\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \text{s}^2}{\text{kg} \cdot \text{m}} = \frac{\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2 \cdot \text{m}} \cdot \text{s}^2}{\text{kg}} = [-]$$

Input blir følgende:

ΔP	= Målt trykkdifferanse	Pa
T	= Temperatur i spalten	K
A	= Spaltens tverrsnitt	m ²
a	= Luftens densitet ved 20 °C multiplisert med 293,15 K	(K·kg)/m ³
q	= Målt volumstrøm	l/min
$\Delta(\Delta P)$	= Usikkerhet for målt trykkforskjell	Pa
ΔT	= Usikkerhet for målt temperatur	K
ΔA	= Usikkerhet for målt tverrsnitt	m ²
Δq	= Usikkerhet for målt volumstrøm	l/min

Formel for usikkerhet etter partielt derivert formel:

$$\Delta \xi = \pm \sqrt{\left(\frac{2 \cdot T \cdot A^2 \cdot 60000^2}{a \cdot q^2} \cdot \Delta(\Delta P)\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot \Delta P \cdot A^2 \cdot 60000^2}{a \cdot q^2} \cdot \Delta T\right)^2 + \left(\frac{4 \cdot \Delta P \cdot T \cdot A \cdot 60000^2}{a \cdot q^2} \cdot \Delta A\right)^2 + \left(\frac{(-4) \cdot \Delta P \cdot T \cdot A^2 \cdot 60000^2}{a \cdot q^3} \cdot \Delta q\right)^2}$$

KILDE:

Moffat, R.J. (1988) *Describing the Uncertainties in Experimental Results*. Experimental Thermal and Fluid Science 1988; 1

LUFTSTRØMNING I SKRÅ TRETAK

- eksperimentelle undersøkelser og numeriske beregninger

VEDLEGG 4. WUFI

VEDLEGG 4.1. FORUTSETNINGER OG FORENKLINGER I WUFI

4.1.1. FORUTSETNINGER

WUFI er benyttet til å studere effekten av ulike parametere, relatert til utformingen av luftespalter i skrå trectak. Det må bemerkes at hensikten her er å studere trenden av resultatene, som fremgår gjennom de ulike parameterstudiene. For samtlige simuleringer er Oslo benyttet som uteklima. Inneklima er gjennomgående 20 °C med fuktklasse 2, i henhold til ISO 13788. Inntrenging av regn gjennom taktekking er neglisjert i samtlige beregninger. Videre er byggfukt kun hensyntatt gjennom initialbetingelsene for takkonstruksjonen. Ekstra byggfukt gitt av taksperrer er ikke hensyntatt. Parameterstudiet er inndelt i ulike deler, med underordnede studier, som kan sammenfattes slik:

1. Effekten av økt isolasjonstykkelse i taket

- 1.1. Fuktforhold i taktro og undertak
- 1.2. Temperaturforhold i spalten
- 1.3. Underkjøling
- 1.4. Kondenspotensial
- 1.5. Luftespaltens ventilasjonsevne

2. Effekten av økt spaltehøyde

- 2.1. Fuktforhold i taktro og undertak
- 3.2. Temperaturforhold i spalten
- 3.3. Underkjøling
- 3.4. Kondenspotensial
- 3.5. Luftespaltens ventilasjonsevne

3. Effekten av økt lufthastighet i luftespalten

- 3.1. Fuktforhold i taktro og undertak
- 3.2. Temperaturforhold i spalten
- 3.3. Underkjøling
- 3.4. Kondenspotensial
- 3.5. Luftespaltens ventilasjonsevne

4. Effekten av ulik takhelning

- 3.1. Underkjøling
- 3.2. Kondenspotensial

De ulike delstudiene er å finne i en kronologisk rekkefølge. Deler av parameterstudiene og medfølgende delstudier er kommentert i masteroppgaven, i samme detalj. For majoriteten av delstudiene, fremstilles både års- og månedsgjennomsnittlige resultater, for å kunne se trendene mer overordnet. Det bemerkes at resultatene fremstilles for ulike perioder av året. Eksempelvis vil resultatene fra delstudiene som omhandler kondens og underkjøling, fremstilles ved en periode av året hvor det grunnet uteklimaet, høyst sannsynligvis vil forekomme underkjøling og kondens. For temperatur- og fukt betraktninger fremstilles typiske perioder av året, slik som høst, vinter, vår og sommer.

KVANTIFISERING AV FUKTFORHOLD FOR TAKTRO OG UNDERTAK

I tillegg til underkjøling og temperaturforhold i en luftespalte, er fuktforholdene av stor interesse. I enkelte av parameterstudiene er fuktforholdet for taktro og undertak studert. Fuktforholdet er kvantifisert gjennom beregning av årsgjennomsnittlig relativ luftfuktighet for sjiktene, samt en betraktning på månedsbasis, for å se trenden mer detaljert. Videre er eksempelvis effekten av økt isolasjonstykkelse på relativ luftfuktighet for undertaket underside, visualisert for en periode på to dager, for å fremheve trenden/effekten.

KVANTIFISERING AV TEMPERATURFORHOLD I LUFTESPALTEN

I denne oppgaven var temperatur i luftespalten under sommer- og vinterforhold av interesse. Dette grunnet et ønske om å tydeliggjøre effekten av ulike parametere på taktroas temperatur. Under sommerhalvåret ønsker en lavest mulig modultemperatur for bygningsintegreerte solceller. Ettersom modultemperaturen for slike solcelleanlegg er avhengig av temperaturen i øvre del av luftespalten, var dette av interesse å studere i inneværende prosjekt. Effekten er kvantifisert gjennom en årsgjennomsnittlig og månedsgjennomsnittlig betraktning av temperaturen for taktroas underside, alternativt modulenes underside. Videre er de to varmeste og kaldeste døgnene i klimafilen for Oslo fremstilt, for å kunne visualisere trenden i større grad.

KVANTIFISERING AV POTENSIELL MENGDE KONDENS I LUFTESPALTEN

Kondens kan som nevnt tidligere i oppgaven beskrives i henhold til formel 1. Slik det fremgår av formelen, er kondensering på en overflate avhengig av den konvekktive fuktoverføringskoeffisienten. Ettersom koeffisienten avhenger av en rekke faktorer, eksempelvis strømningsforhold, ruhet, og konvektiv varmeoverføringskoeffisient, må en foreta visse forenklinger i fuktberegninger.

$$g = \beta \cdot (v_a - v_s) \quad (1)$$

Hvor:	g	= Fukttransportrate [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]
	β	= Konvektiv fuktoverføringskoeffisient [m/s]
	v_a	= Fuktinnhold (metningsinnhold) i tilgrensende luft [kg/m^3]
	v_s	= Fuktinnhold (metningsinnhold) for overflaten [kg/m^3]

Det bemerkes at g ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$) kun kan betraktes som potensiell mengde kondens. Dette grunnet flatens kondensopptaksevne, fuktlagringsevne, og om duggpunktet nås. Videre medfører kondensasjon et varmetilskudd i form av et latent varmebidrag til overflaten, som i sin tur medfører økt overflatetemperatur og reduserer mengden kondensat (Hagentoft, 2001). For å kunne regne nyansert på kondensutfelling, er en avhengig av korrelasjoner mellom hygroskopiske overflater og forløpet av kondens, tilsvarende data for ikke-hygroskopiske overflater nevnt i (BS:5250). Dersom en kunne ha antatt at taktro og undertak er mettet, i det øyeblikket $g > 0$ ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$), er det nærliggende å tro at benyttet metodikk egner seg i større grad. I en mer omfattende betraktning, må materialenes fuktdiffusivitet og fuktinnhold hensyntas. Dette falt utenfor masteroppgavens tematikk og ble følgelig neglisjert. Av hensyn til omfang, er potensialet for kondens i en luftespalte kvantifisert i tilfellene hvor overflatene i luftespalten opplever en positiv fuktstrøm, g (kg/m^3).

4.1.2. FORENKLINGER OG BEGRENSNINGER VED MODELLEN I WUFI

Modellering av luftsjikt i WUFI er i første omgang ment for å kunne modellere luftsjiktens innvirkning på varme- og fukttransport i uventilerte sjikt. I denne oppgaven er luftsjiktene i WUFI benyttet til å studere effekten av ulike parametere, som følgelig medfører en usikkerhet, ettersom modellen i WUFI er en betydelig forenkling av virkeligheten. Forenklinger i WUFI av større betydning for resultatene er:

- Forenklet beregning av konvektiv fukt- og varmeoverføring i luftespalten
- Forenklet beregning av spalteluftens fuktinnhold
- Forenklet beregning av luftespaltens varmemotstand

BEGRENSNINGER VED MODELLERING AV LUFTSIKT I WUFI

I WUFI er materialparameterne for luftsjiktene representativt for uventilerte spalter. Luften i et stillestående sjikt, fraskriver seg fra materialparametere for luften i spalten ved tvungen konveksjon, hvor luften kan inneha samme materialparametere som for uteluften (WUFI, 2016a). Følgelig blir beregningen av temperatur- og fuktforhold i en luftespalte en forenklet fremstilling av virkeligheten. I det følgende omtales forenklinger med betydning for resultatene, som fremgår av arbeidet i WUFI.

FUKTINNHOOLD I LUFTSIKTENE I WUFI

Ettersom luftsjiktene med en standard fuktlagringsfunksjon inneholder 47 kg/m^3 vann ved metning, bør slike luftsjikt ikke velges ved evaluering av en takkonstruksjons fukttekniske ytelse (WUFI, 2016a). Luftsjiktet uten ekstra fuktlagring inneholder $0,017 \text{ kg/m}^3$ ved metning, og 0 kg/m^3 ved relativ luftfuktighet lik 0 %. Dette er følgelig en bedre tilnærming av virkeligheten, men fortsatt en tilnærming. En bør merke seg at fuktlagringsfunksjonen i WUFI er uavhengig av temperatur, hvilket er en forenkling fra virkeligheten av betydning. Dersom en ønsker å kunne studere effekten av kondens på flatene som omslutter luftlaget, anbefales luftlagene modellert ved bruk av luftsjiktene med standard fuktlagringsfunksjon (WUFI, 2016a).

MODELLERING AV LUFTLAG I WUFI

Det er ulike fremgangsmåter vedrørende modellering av en luftespalte i WUFI. I sin enkleste form, modelleres ett sjikt. En alternativ måte er å modellere tre sjikt, hvorav det ytterst og innerste sjiktet har en mindre tykkelse, eksempelvis 1 mm. Det er viktig å påse at luftespaltens totale varmemotstand ikke endres, dersom en benytter metodikken med flere luftsjikt i luftespalten. I WUFI er det observert et stort antall konvergensfeil, ved å benytte en forenklet metode med et luftsjikt uten ekstra fuktlagringsevne, dersom kondens forekommer i luftespalten. Dersom en benytter alternativ metode, med en luftespalte delt inn i flere luftsjikt, hvorav det ytterste og innerste sjiktet tilegnes en standard fuktlagringsfunksjon, unngås konvergensfeil. Til gjengjeld vil fuktinnholdet i henholdsvis taktro og undertaket bli urealistisk høyt, ettersom tilgrenset luftsjikt inneholder betydelig mer fuktighet enn utelufta.

Videre medfører det høye fuktinnholdet i luftsjiktene med standard fuktlagringsfunksjon, en høy hygroskopisk treghet (WUFI, 2016a). Dette medfører at det vil ta urealistisk lang tid å fjerne fukt fra luftespalten, når en fukt- og varmeteknisk kilde tilegnes slike sjikt. Derfor er det i denne oppgaven modellert to tynne luftsjikt mot henholdsvis taktro og undertak, med standard fuktlagringsfunksjon. Mellom disse luftsjiktene, i midten av spalten, er et luftsjikt uten ekstra fuktlagringsevne modellert. Dette for å få et mer virkelighetsrealistisk bilde av varme- og fuktventileringen i luftespalten. Det er videre nærliggende å tro at det høyde fuktinnholdet i de to tynne luftsjiktene mot taktro og undertak, medfører et økt fuktinnhold i det midtre luftsjiktet.

KONVEKTIV VARME- OG FUKTOVERFØRING I LUFTEPALTEN

Som nevnt benytter WUFI varmemotstand for luftsjikt, som gjelder for uventilerte sjikt. For uventilerte sjikt er den totale varmeoverføringskoeffisienten sammensatt av konduksjon, stråling og konveksjon (Hagentoft, 2001). For tynne uventilerte spalter (0-20 mm) er det konvektive bidraget begrenset, og konduksjon dominerer. Bidraget fra konveksjon øker, med økende spaltetykkelse (Hagentoft, 2001).

Det blir følgelig en betydelig forenkling å modellere sjiktene på 1 mm, ettersom en ikke kjenner varmeoverføringskoeffisienten ved overflatene mot henholdsvis taktro og undertak. Det er derfor nærliggende å tro at varme og fuktoverføringen reelt sett er større, enn hva som fremgår i parameterstudiene. Dette grunnet at den konvektive varmeoverføringskoeffisienten øker i for det laminære og turbulente strømningsregime, sammenlignet med fri konveksjon. Følgelig er det nærliggende å tro at konvektiv fukttransport i spalten fraskriver seg i betydelig grad fra virkeligheten. Dette grunnet at konvektiv varmeoverføringskoeffisient påvirker fuktoverføringskoeffisientens størrelsesorden. Konvektiv fuktoverføringskoeffisient var tematikk i doktoravhandlingen (Talev, 2011), hvor det blant annet konkluderes med at:

- Når relativ luftfuktighet i lufta som strømmer over en flate reduseres, øker samtidig den konvektive fukttransportkoeffisientens størrelsesorden.
- Dersom grenselagets tykkelse mot overflaten reduseres, vil også den konvektive fukttransportkoeffisientens reduseres. Grenselagets tykkelse er videre avhengig av hastigheten over overflatene som studeres.

KILDER

BS 5250: 2002: Code of practice for control of condensation in buildings. British Standard.

Hagentoft, C. E. (2001) *Introduction to building physics*. Lund, Studentlitteratur.

Talev, G. (2011) *Convective moisture transfer coefficients for porous building material surfaces – Theory, wind tunnel design and measurements*. PhD Thesis. Department of Civil and Transport Engineering. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim. Norway.

WUFI (c) – *WUFI Pro 5.3 online help. Dialog: Air Layers*, udatert. Tilgjengelig gjennom programmet WUFI Pro 1D.

VEDLEGG 4.2. EFFEKTEN AV ØKT ISOLASJONSTYKKELSE

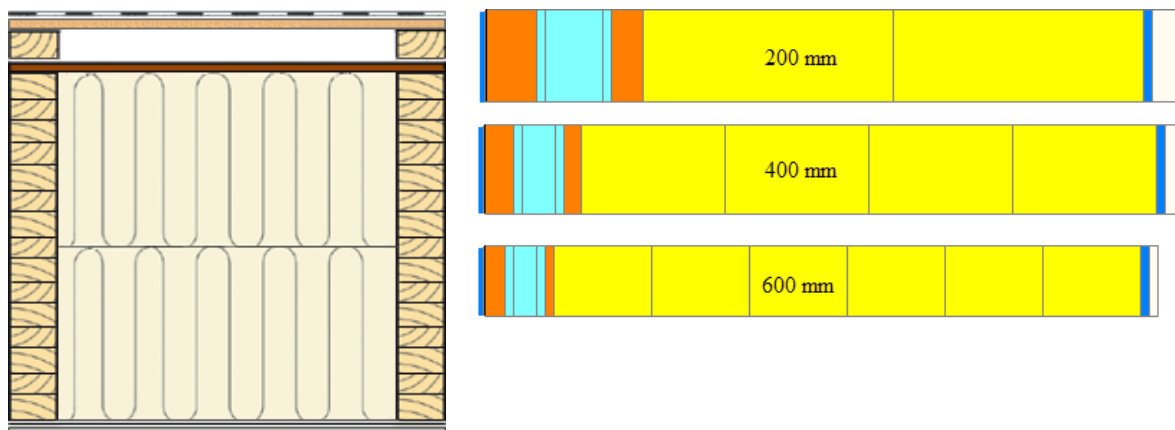
4.2.1. INTRODUKSJON

I det følgende er isolasjonstykkelsens innvirkning på fukt- og temperaturforhold i skrå treak studert. Innledningsvis presenteres forutsetningene som ligger til grunn for parameterstudiet. Deretter presenteres resultatene fra parameterstudiet, som er ansett av interesse i denne sammenheng. Begrensninger ved bruk av respektiv modell i WUFI, er å finne som vedlegg 4.1.

4.2.2. FORUTSETNINGER

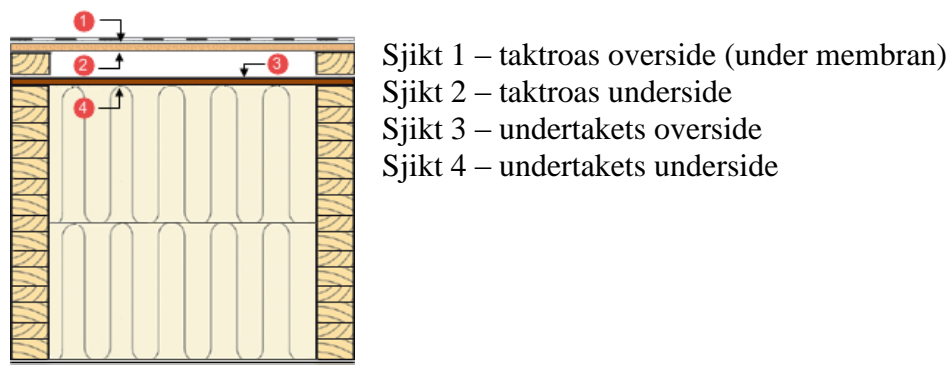
I samtlige simuleringer er taket i figur 1 benyttet, med varierende isolasjonstykkelse. Taket som vurderes er vendt mot nord, med en 50 graders helning. Klimafil for Oslo er benyttet i samtlige simuleringer. Taket består av følgende parametere:

- Bitumenbasert takmembran
- Taktro, bestående av 12,5 mm OBS-plate
- 23 mm klemløker/lufting
- Vindsperre bestående av 12,5 mm asfaltimpregnert trefiberplater
- *Variabel isolasjonstykkelse*
- Dampsperre - 0,2 mm
- 12,5 mm gipsplater



Figur 1. Prinsipiell utførelse av taket som er simulert (venstre) og oppbygningen av taket i WUFI.

Sjiktene som er studert i WUFI, som det henvises til i det følgende, er illustrert i figur 2.



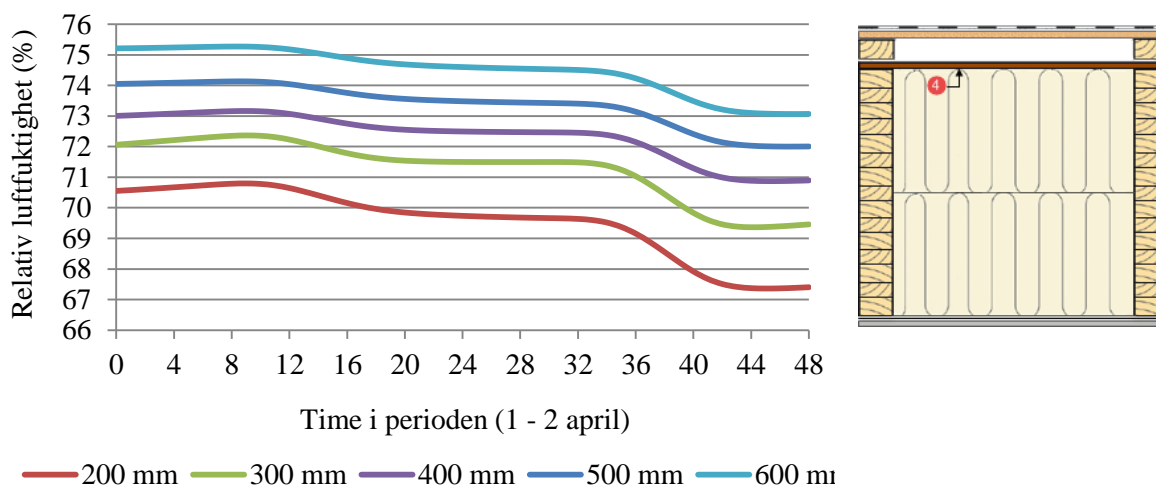
Figur 2. Definisjon av hvilke sjikt i taket som er studert.

4.2.3. RESULTATER

Isolasjonstykkelsen i et skrått tretak vil som nevnt tidligere påvirke fukt- og temperaturforhold i takkonstruksjonen. I det følgende presenteres resultatene som er av interesse, sett i lys av effekten av økt isolasjonstykkelse. Isolasjonstykkelsen har en neglisjerbar innvirkning på skrå tretaks ventilasjonsevne, hvilket er grunnen til at dette resultatet er ekskludert fra vedlegget.

FUKTFORHOLD I LUFTESPALTEN

Ringvirkningene av økte isolasjonstykkelser er en stadig kaldere vindsperre. Sett i lys av en stadig kaldere vindsperre, er fuktforholdene for undertakets underside av interesse.



Figur 3. Relativ luftfuktighet for undertakets underside ved varierende isolasjonstykkelse.

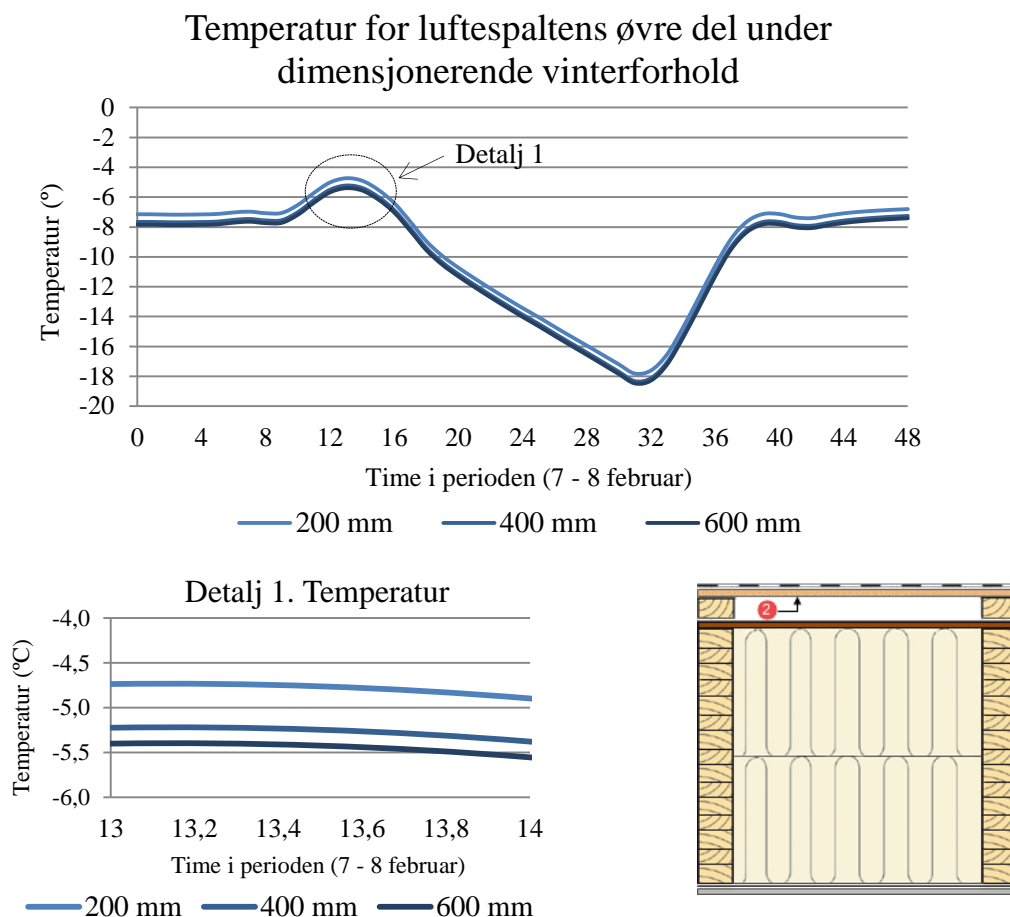
Slik figur 3 illustrerer, vil relativ luftfuktighet for undertakets underside økte i takt med økende isolasjonstykkelse i et skrått tretak. Perioden som vises i figur 3 er representativ for en vårperiode, som strekker seg over to dager. Figur 3 illustrerer et ekstremtilfelle, og må betraktes deretter. Dersom en skal tydeliggjøre effekten av økte isolasjonstykkelser med tanke på økt relativ luftfuktighet, bør en se på en bredere periode, eksempelvis årsgjennomsnittlig relativ luftfuktighet. Slik vist i tabell 1, vil effekten av å øke isolasjonstykkelsen fra 300 mm til 500 mm, resultere i en økning i relativ luftfuktighet for undertakets underside, tilsvarende 2 %.

Tabell 1. Årsgjennomsnittlig relativ luftfuktighet for undertakets underside, og endring utover 200 mm isolasjonstykkelse.

Isolasjonstykkelse	Endring fra 200 mm isolasjonstykkelse		
	Takro-underside	Undertak-overside	Undertak-underside
200 mm	65,32 % (RF)	63,49 % (RF)	61,27 % (RF)
300 mm	+ 0,96 %	+ 1,82 %	+ 2,11 %
400 mm	+ 1,45 %	+ 2,82 %	+ 3,28 %
500 mm	+ 1,74 %	+ 3,44 %	+ 4,09 %
600 mm	+ 1,96 %	+ 3,87 %	+ 4,75 %

TEMPERATURFORHOLD I LUFTESPALTEN

Under perioder med snø på taket, tjener luftespalten med hovedhensikt å hindre at snøen smelter på takflaten. Sagt på en annen måte, ønsker vi en kaldest mulig takflate, under perioder med snø på taket. Slik nevnt tidligere, vil vindspærren bli kaldere i takt med økte isolasjonstykkelser. Det er derfor interessant å se hvilken effekt økte isolasjonstykkelser har på taktroas temperatur, og eventuelt effektens størrelsesorden.



Figur 4. Temperatur for luftespaltens øvre del under dimensjonerende vinterforhold.

Figur 4 viser temperaturen på taktroas underside, alternativt luftespaltens øvre del, under en dimensjonerende periode på vinteren. Med dimensjonerende periode på vintertid, menes de dagene i året med lavest utetemperatur, samtidig hvor en antar at det er snø på taket. Det er verdt å bemerke at klimafilen (MDRY) for Oslo ligger til grunn for simuleringen, hvilket må tas til betraktning.

Slik det fremgår av den øvre illustrasjonen i figur 4, er differansen mellom temperaturen på taktroas underside små. Det er derfor tatt ut en detalj av den varmeste perioden under vinterperioden som er studert, slik vist i nedre illustrasjon i figur 4. Detalj 1 illustrerer forskjellen i temperaturen for taktroas underside, ved varierende isolasjonstykkelse. Videre må det gjentas at det for simuleringene i dette vedlegget er benyttet en 23 mm luftespalte. Effekten av å øke luftespalten, på temperaturforhold for taktroas underside, er ytterligere omtalt i respektive vedlegg. Effekten av økte isolasjonstykkelser på temperaturen for taktroas underside, er slik vist i figur 1 – detalj 1, en stadig kaldere taktro. Følgelig forstås faren for snøsmelting redusert, i takt med økende isolasjonstykkelser i et skrått tretak.

For å få et overordnet bilde av effekten av økt isolasjonstykkelse, er temperaturer for taktroas underside og undertakets overside gitt i henholdsvis tabell 2 og 3. Det er verdt å bemerke at ved økt isolasjonstykkelse i skrå tretak, reduseres temperaturen i luftespalten under de kalde periodene av året, hvor uteluftens temperatur er under null grader. Samtidig økes temperaturen i luftespalten, når uteluftens temperatur er over null grader. Det er på sin side valgt å fremstille netto effekt av økte isolasjonstykkelser, på årsgjennomsnittlig temperatur i luftespalten.

Tabell 2. Årsgjennomsnittlig temperatur for taktroas underside.

Isolasjonstykkelse	Årsgjennomsnittlig temperatur for taktroas underside (°C)	
	Temperatur	Endring (%)
200 mm	8,57	-
300 mm	8,44	- 1,54 %
400 mm	8,37	- 2,35 %
500 mm	8,33	- 2,85 %
600 mm	8,30	- 3,18 %

Slik det fremgår av tabell 2 og 3, påvirkes taktroas temperatur i mindre grad enn undertakets overside, ved økt isolasjonstykkelse. Dersom en ser på en månedsgjennomsnittlig betraktning, hvilket er utelatt her, observeres størst temperaturforskjell under juni og juli måned.

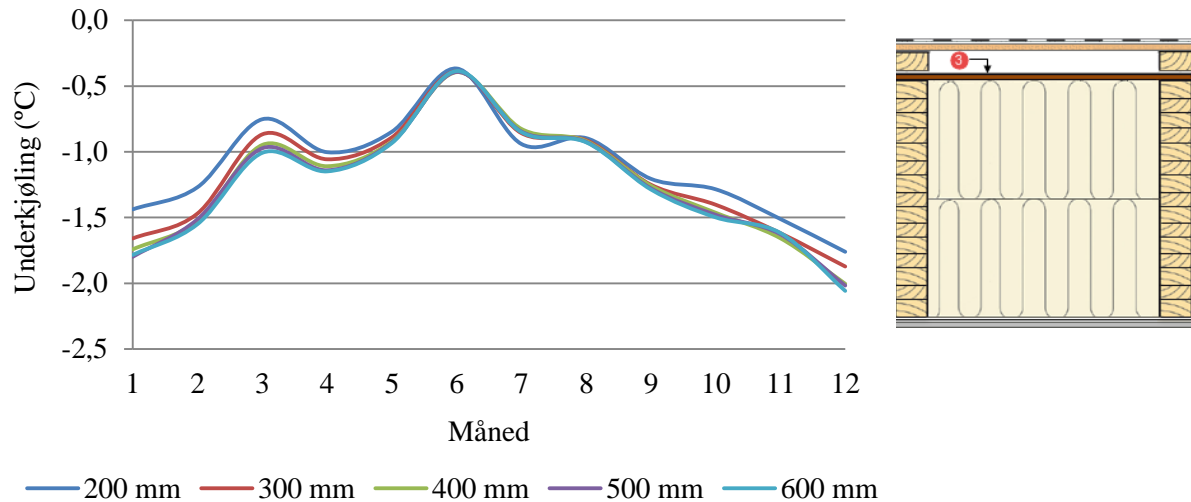
Tabell 3. Årsgjennomsnittlig temperatur for undertakets overside.

Isolasjonstykkelse	Årsgjennomsnittlig temperatur for undertakets overside (°C)	
	Temperatur	Endring (%)
200 mm	8,86	-
300 mm	8,63	- 2,61 %
400 mm	8,51	- 3,99 %
500 mm	8,43	- 4,84 %
600 mm	8,38	- 5,41 %

Et skrått tretak med 500 mm isolasjon medfører at temperaturen øker på undertakets overside, ettersom takets varmegjennomgang er betydelig redusert, sammenlignet med et tak med 300 mm isolasjon. Dette medfører at lufttemperaturen i luftespalten i et godt isolert tretak øker på sommeren, sammenlignet med en mindre godt isolert tretak. Ringvirkningene av økt temperatur i luftespalten grunnet økt isolasjonstykkelse, er blant annet økt underkjøling, hvilket omhandles i det følgende.

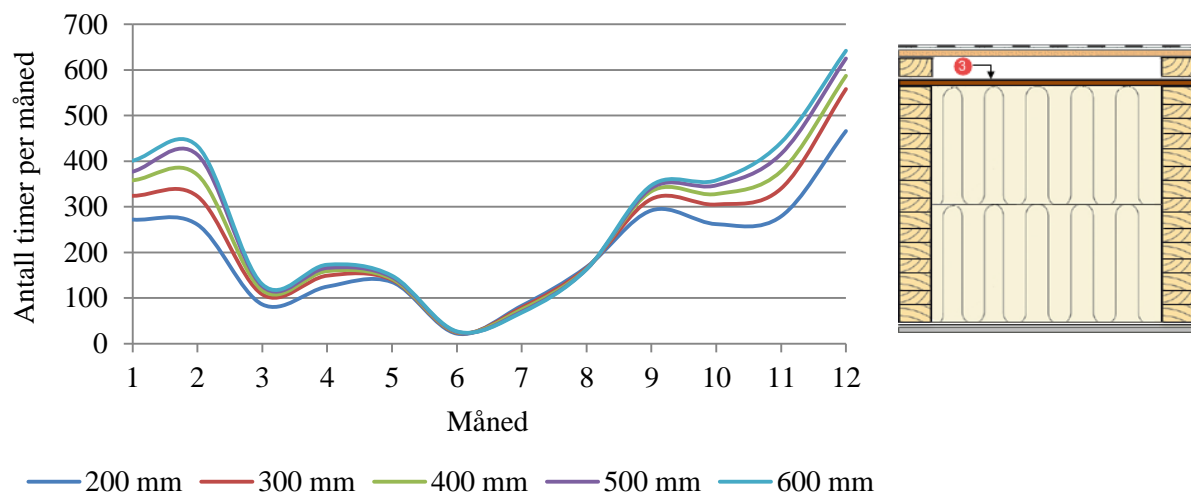
UNDERKJØLING AV TAKFLATEN

Ved økt isolasjonstykkelse vil undertaketets overside i tillegg til å bli kaldere, underkjøles i stadig større grad og omfang. Slik figur 5 viser, vil underkjølingens størrelsesorden øke i takt med økt isolasjonstykkelse i et skrått tretak.



Figur 5. Månedsgjennomsnittlig underkjøling av undertaketets overside ved varierende isolasjonstykkelse.

I likhet med underkjølingens størrelse, vil også underkjølingens omfang, alternativt varighet, øke i takt med økt isolasjonstykkelse i et skrått tretak. Trenden tydeliggjøres i større grad for henholdsvis vår og høst, slik figur 6 illustrerer.



Figur 6. Månedsgjennomsnittlig underkjøling av undertaketets overside, gitt som timer per måned, ved varierende isolasjonstykkelse.

Ved en en årsgjennomsnittlig betraktning, kan effekten av økt isolasjonstykkelse i et skrått tretak, kvantifiseres i større grad enn fremstillingen i figur 5 og 6. Slik vist i tabell 4, vil effekten av å øke isolasjonstykkelsen fra eksempelvis 300 mm til 500 mm, resultere i 15,7 % økning i underkjølingens varighet. Underkjølingens størrelse vil ved samme økning i isolasjonstykkelse øke med 6,6 %.

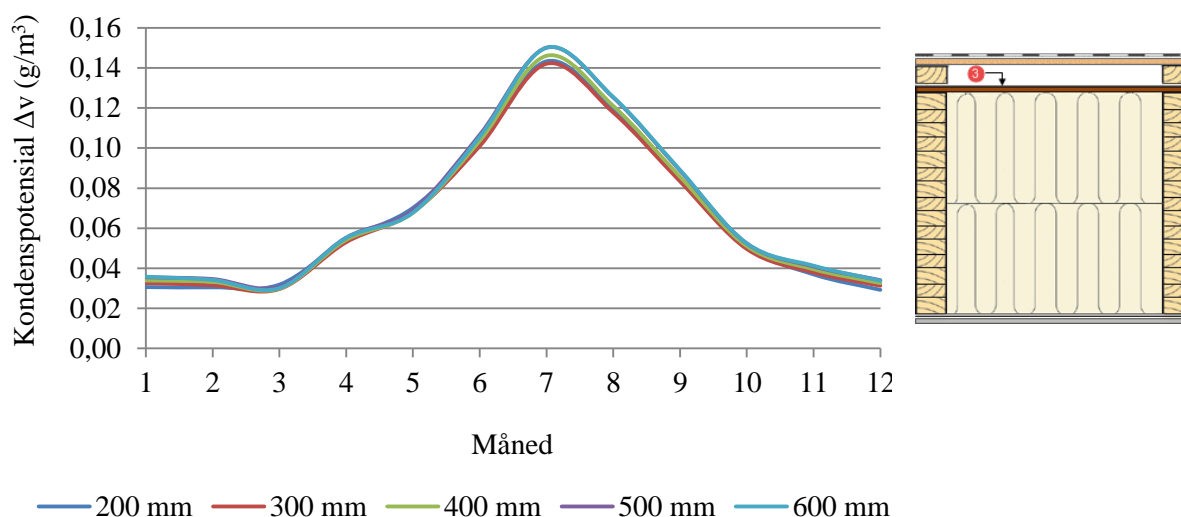
Tabell 4. Årsgjennomsnittlig underkjøling av undertakets overside.

Isolasjonstykkelse	Antall timer	Underkjøling av undertakets overside		
		Endring (%)	Underkjøling (°C)	Endring (%)
200 mm	2451	0	-1,30	0
300 mm	2833	15,59 %	-1,42	9,31 %
400 mm	3037	23,91 %	-1,49	14,49 %
500 mm	3217	31,25 %	-1,51	15,90 %
600 mm	3332	35,94 %	-1,53	17,27 %

Underkjøling av luftespaltens omsluttende flater, gitt av strålingsutveksling mot atmosfæren, medfører at duggpunktet nås hurtigere, sammenlignet med konvektiv nedkjøling av flatene. Dersom flatene i tillegg til å nå duggpunktet, opplever et positivt fukttillskudd, kan kondens forekomme. Dette betinger på sin side at forholdene for kondens opprettholdes i en tid som medfører at de omsluttende flatenes kondensopptaksevne overskrides. Potensialet for kondens er videre omhandlet i det følgende.

POTENSIAL FOR KONDENS

I det følgende er potensialet for kondens betydelig forenklet, hvor potensialet er valgt kvantifisert i tilfellene hvor luftespaltens omsluttende flater opplever et positivt fuktilskudd. Denne forenklete fremstillingen må følgelig sees i sammenheng med underkjøling, og duggpunktstemperatur for aktuelle sjikt som studeres. Til tross for at det er omfattende å beregne andel utfelt kondens korrekt, er fuktilskudd for et sjikt drivkraften for respektiv fysikk, og følgelig en betydningsfull parameter i en komplett betraktning av kondens.



Figur 7. Månedsgjennomsnittlig kondenspotensial for undertakets overside, ved varierende isolasjonstykkelse.

Figur 7 illustrerer månedsgjennomsnittlig positivt fuktilskudd for undertakets overside, hvilket er valgt omtalt potensial for kondens. Slik det fremgår av tabell 5, hvor årgjennomsnittlig kondenspotensial er fremstilt, er effekten av økt isolasjonstykkelse neglisjerbar. Dette grunnet at potensialet gitt som ($\text{g/m}^3\text{h}$) sett i praktisk sammenheng, er minimalt. Teoretisk sett vil effekten av å øke isolasjonstykkelsen fra 300 mm til 500 mm medføre 6,4 % økning av potensialets størrelse, og en reduksjon av potensialets varighet tilsvarende 1 %.

Tabell 5. Årgjennomsnittlig kondenspotensial for undertakets overside.

Isolasjonstykkelse	Årgjennomsnittlig kondenspotensial for undertakets overside (g/m^3)			
	Antall timer	Endring (%)	Potensial ($\text{g/m}^3\text{h}$)	Endring (%)
300 mm	5107	0	0,065	0
400 mm	5082	-0,49 %	0,067	2,84 %
500 mm	5057	-0,98 %	0,069	6,35 %
600 mm	5058	-0,96 %	0,069	6,01 %

VEDLEGG 4.3. EFFEKTEN AV ØKT SPALTEHØYDE

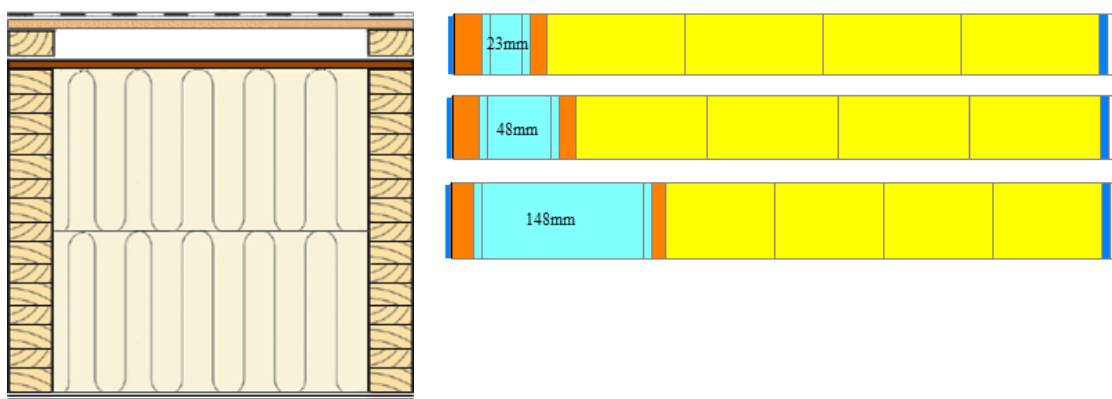
4.3.1. INTRODUKSJON

I det følgende er spaltehøydens innvirkning på fukt- og temperaturforhold i skrå tretak studert. Innledningsvis presenteres forutsetningene som ligger til grunn for parameterstudiet. Deretter presenteres resultatene fra parameterstudiet, som er ansett av interesse i denne sammenheng. Begrensninger ved bruk av aktuell modell i WUFI, er å finne som vedlegg 4.1.

4.3.2. FORUTSETNINGER

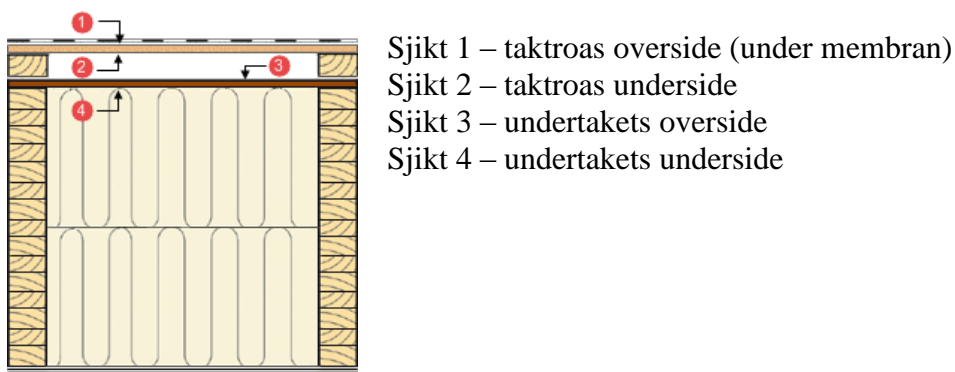
I samtlige simuleringer er taket i figur 1 benyttet, med varierende spaltehøyde. Taket som vurderes er vendt mot nord, med en 50 graders helning. Klimafil for Oslo er benyttet i samtlige simuleringer. Taket består av følgende parametere:

- Bitumenbasert takmembran
- Taktro, bestående av 12,5 mm OBS-plate
- *Variierende spaltehøyde (se figur 1)*
- Vindsperre bestående av 12,5 mm asfaltimpregnert trefiberplater
- 400mm isolasjon
- Dampsperre - 0,2 mm
- 12,5 mm gipsplater



Figur 1. Prinsipiell utførelse av taket som er simulert (venstre) og oppbygningen av taket i WUFI.

Sjiktene som er studert i WUFI, som det henvises til i det følgende, er illustrert i figur 2.

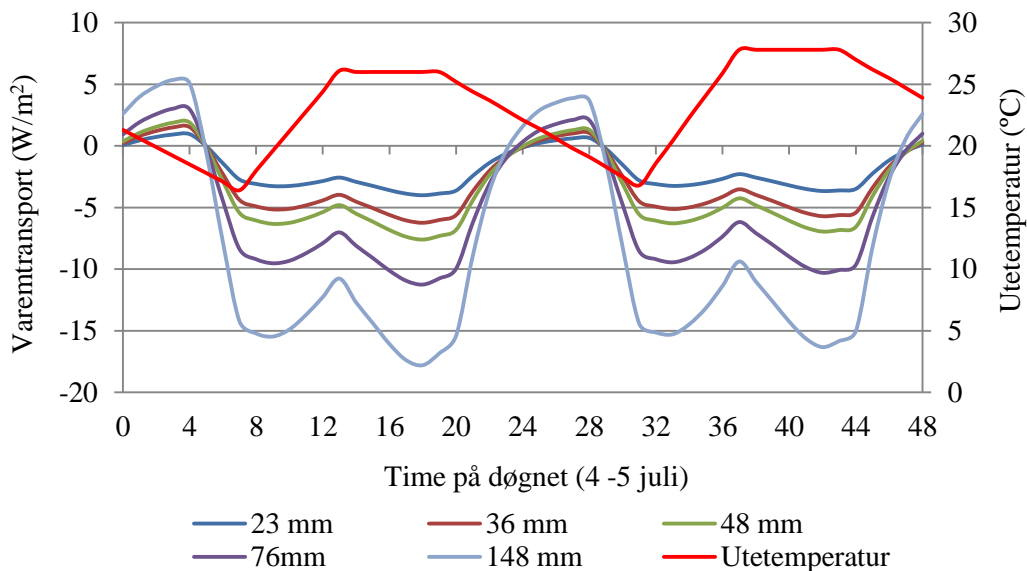


Figur 2. Definisjon av hvilke sjikt i taket som er studert.

4.3.3. RESULTATER

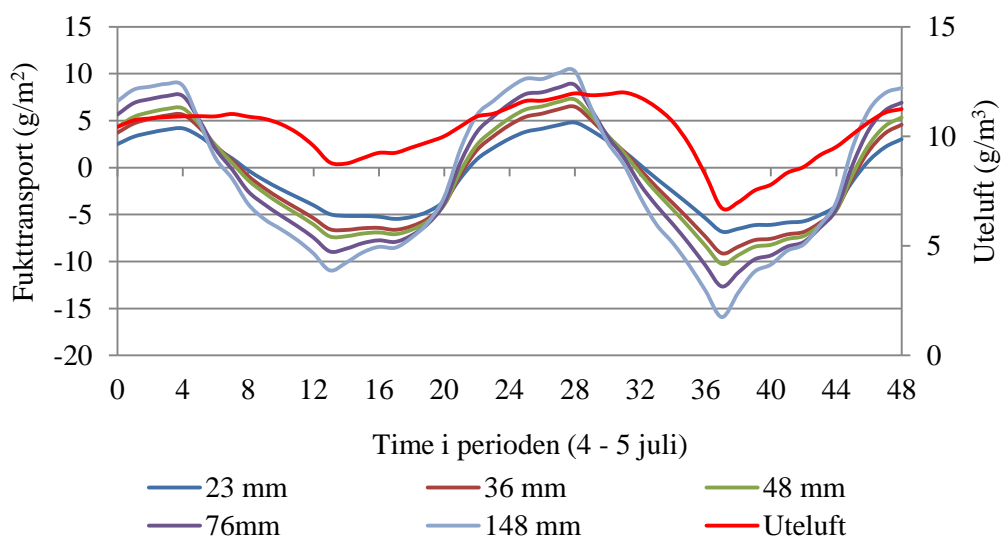
VENTILASJONSEVNE

I likhet med muligheten for å transportere fukt og varme ut fra luftespalten, muliggjøres tilskudd av henholdsvis fukt og varme, når uteluften strømmer gjennom luftespalten fra raft til møne. Slik vist i figur 3, vil det på dagen under de dimensjonerende sommerdøgnene transporteres ut varme fra spalten, mens luftespalten opplever et tilskudd på kveldstid.



Figur 3. Varmetransport i luftespalten under dimensjonerende sommerdøgn, ved varierende spaltehøyde.

Figur 3 illustrerer tydelig spaltehøydens effekt på luftespaltens varmetransport. Det observeres at et stort spaltetverrsnitt medfører økt kapasitet for varmetransporten, sammenlignet med små spaltetverrsnitt. Tilsvarende vil fukttransport i luftespalten øke, ved økende spaltetverrsnitt, slik vist i figur 4.



Figur 4. Fukttransport i luftespalten under dimensjonerende sommerdøgn, ved varierende spaltehøyde.

Ved planlegging av luftespalter i skrå tretak, må følgelig et flertalls interesser hensyntas. Sett i lys av takets ventilasjonsevne, må det skilles mellom ventilert mengde og tilskudd i spalten. Slik vist i tabell 1 og tabell 2, vil varme- og fukttransportens amplitude øke, ved økende spaltetverrsnitt. Det bemerkes at et negativt fortegn representerer at varme ventileres, og at positivt fortegn representerer et tilskudd i spalten.

Tabell 1. Årsgjennomsnittlig fordeling for varmetransport i luftespalten, gitt som tilskudd og ventilert mengde ved varierende spaltehøyde.

<u>Varmetransport – fordeling mellom ventilert mengde og tilskudd</u>				
Spaltehøyde	Ventilert (W/m ² h)	Endring (%)	Tilskudd (W/m ² h)	Endring (%)
23 mm	-1,41	-	0,65	-
36 mm	-2,19	55,70 %	1,01	55,39 %
48 mm	-2,68	62,92 %	1,23	88,62 %
76 mm	-3,98	142,21 %	1,82	178,50 %
98 mm	-4,75	189,13 %	2,15	229,56 %
148 mm	-6,37	288,08 %	2,85	337,48 %

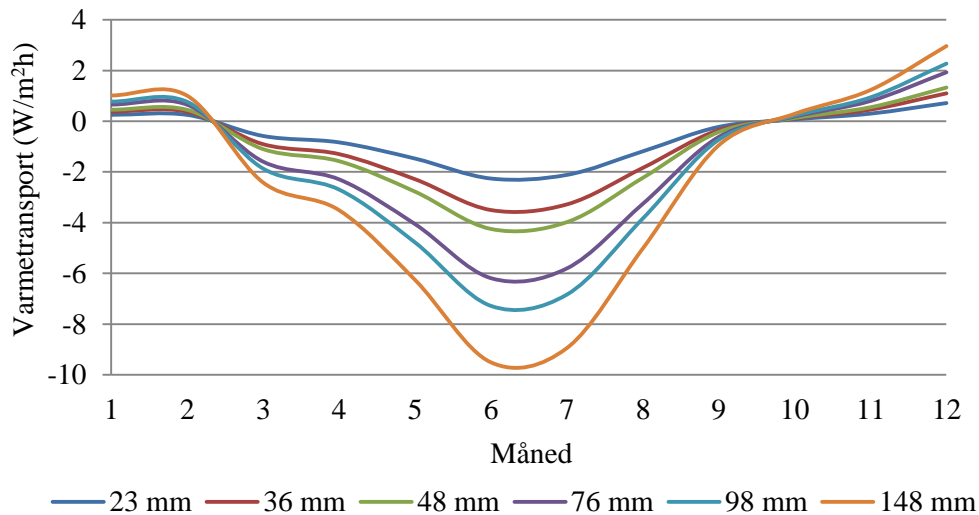
Slik det fremgår av tabell 1, øker både ventilasjonens og tilskuddets størrelsesorden, ved økende spaltetverrsnitt. Det bemerkes at tabell 1 og tabell 2 ikke kan benyttes til å fastslå en reell endring i både varme- og fukttransport. Tabellene kan på sin side benyttes til å kartlegge trenden som forårsakes av økt spaltehøyde, hvilket er hensikten i denne oppgaven.

Tabell 2. Årsgjennomsnittlig fordeling for fukttransport i luftespalten, gitt som tilskudd og ventilert mengde ved varierende spaltehøyde.

<u>Fukttransport - fordeling mellom ventilert mengde og tilskudd</u>				
Spaltehøyde	Ventilert (g/m ³ h)	Endring (%)	Tilskudd (g/m ³ h)	Endring (%)
23 mm	-1,64	-	1,16	-
36 mm	-2,17	31,99 %	1,58	36,87 %
48 mm	-2,42	47,44 %	1,80	55,61 %
76 mm	-2,97	80,95 %	2,26	95,90 %
98 mm	-3,22	95,91 %	2,48	114,71 %
148 mm	-3,67	123,55 %	2,86	147,05 %

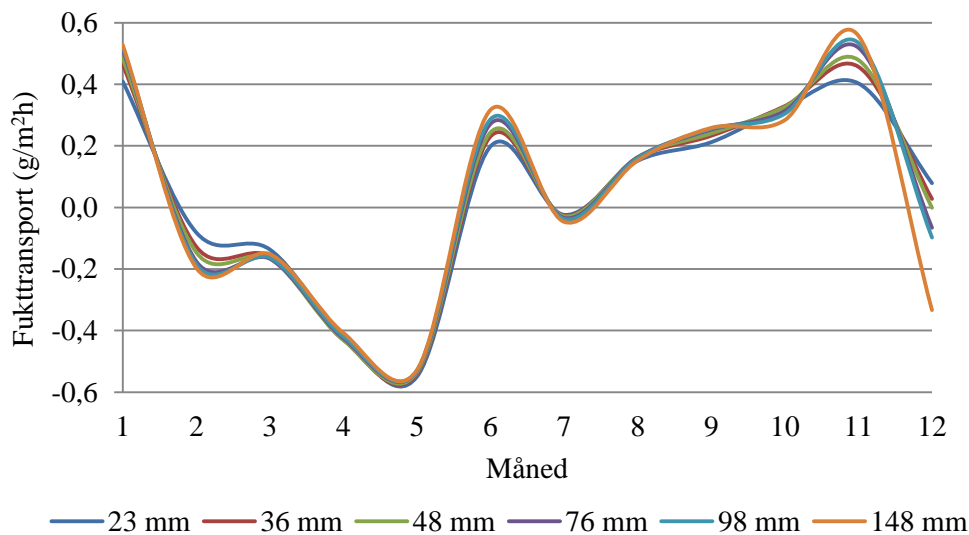
På bakgrunn av resultatene gitt i tabell 1 og tabell 2, kan ikke argumentet om å øke spaltehøyden for å ytre takets lufteevne forsvares, uten forbehold. Følgelig må flere fysiske effekter studeres, dersom behovet for å øke spaltehøyden ytres i prosjekteringsammenheng.

Figur 3 og 4 viser kun en periode på to dager. For å danne et mer helhetlig bilde, er gjennomsnittlig varme- og fukttransport i luftespalten på årsbasis illustrert i det følgende. Slik det fremgår av figur 5, vil et stort spaltetverrsnitt oppleve et større varmetilskudd i enkelte perioder av året, sammenlignet med et lite spaltetverrsnitt. Videre vil et stort spaltetverrsnitt ventilere betydelig større mengder varme, under sommerhalvåret. Det bemerkes at negativ varme- og fukttransport i figur 5 og 6 representerer en ventilert mengde, mens positiv transport representerer et tilskudd i luftespalten.



Figur 5. Månedsgjennomsnittlig varmetransport i en luftespalte, ved varierende spaltehøyde.

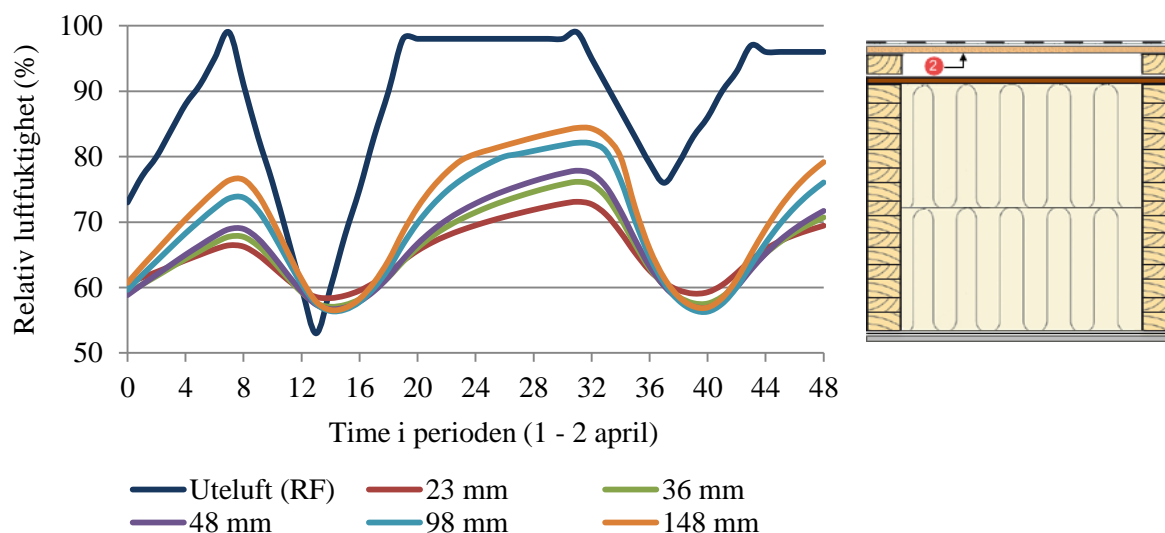
Dersom en fokuserer på fukttransporten, observeres en mindre forskjell mellom spaltetverrsnittene, sammenlignet med varmetransport. Slik illustrert i figur 6, vil et stort spaltetverrsnitt medføre et større fukttilskudd under sommer og vinter, sammenlignet med små spaltetverrsnitt.



Figur 6. Månedsgjennomsnittlig fukttransport i en luftespalte, ved varierende spaltehøyde.

FUKTFORHOLD I LUFTESPALTEN

Det er tidligere i oppgavens hoveddel postulert at et økt spaltetverrsnitt medfører at uteklima får en større innvirkning på klimaet i luftespalten. For å underbygge påstanden, er relativ luftfuktighet for taktroas underside studert, ved varierende spaltehøyder. Dette for å kunne danne et bilde på spaltehøydens innvirkning på fuktforholdene i luftespalten. Slik vist i figur 7, vil uteklimaet få en større innvirkning ved økende spaltetverrsnitt.



Figur 7. Relativ luftfuktighet for taktroas underside ved varierende spaltehøyde.

Slik det fremgår av figur 7, er effekten av økt spaltehøyde en større variasjon i relativ luftfuktighet for taktroas underside. I tillegg til å medføre økt øvre nivå for relativ luftfuktighet for taktroas underside, medfører også økte tverrsnitt en lavere relativ luftfuktighet for sjiktet, når relativ luftfuktighet reduseres. Slik det fremgår av figur 5, er netto effekt av økte spaltetverrsnitt, en økt amplitude for relativ luftfuktighet i luftespalten.

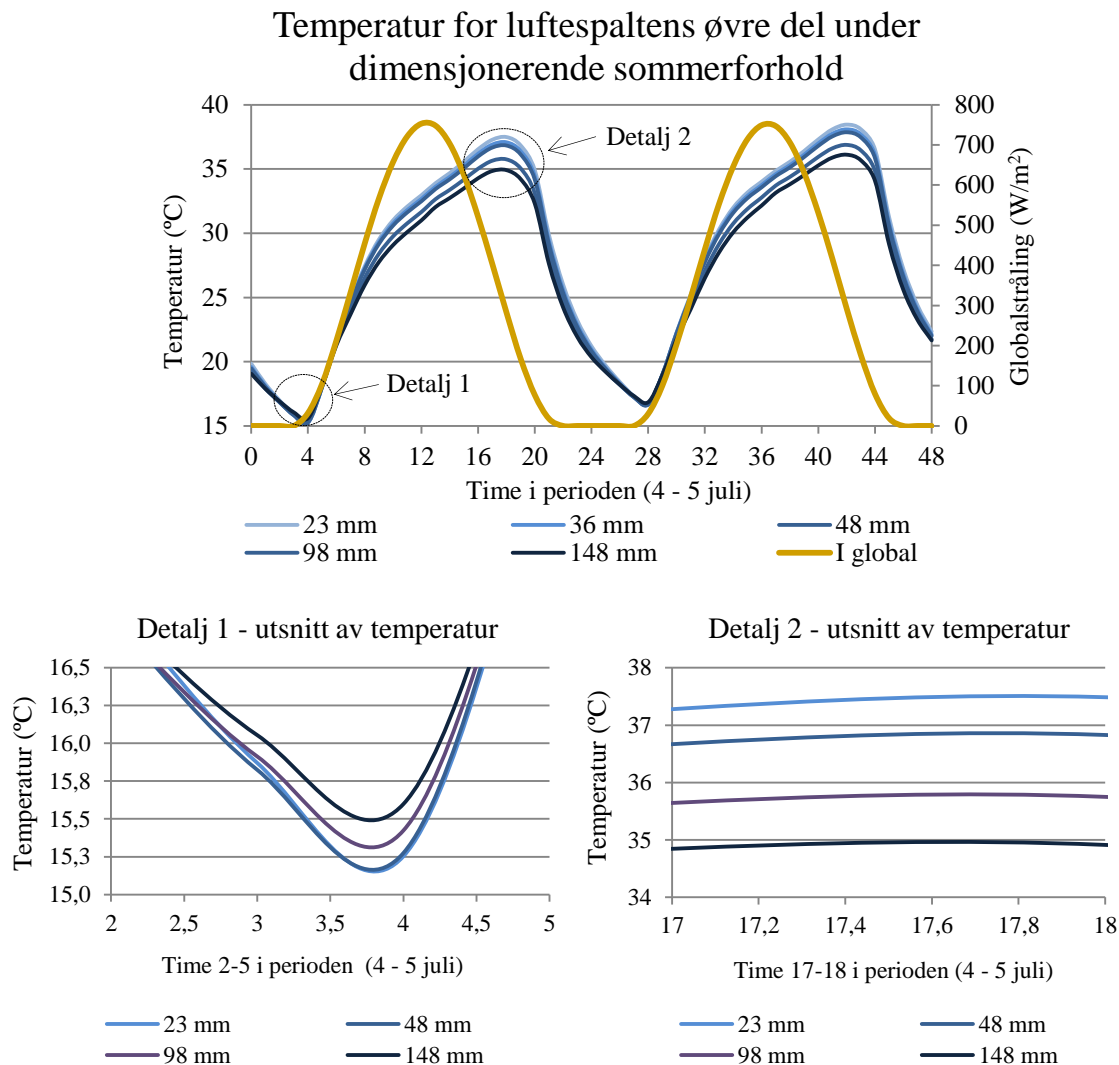
Tabell 3. Endring i årsgjennomsnittlig relativ luftfuktighet ved spaltehøyder over 23 mm.

Spaltehøyde	Endring fra 23 mm luftespalte		
	Taktro-underside	Undertak-overside	Undertak-underside
23 mm	66,27 % RF	65,28 % RF	63,28 % RF
36 mm	+ 1,38 %	+ 1,26 %	+ 0,50 %
48 mm	+ 2,01 %	+ 1,84 %	+ 0,83 %
76 mm	+ 3,29 %	+ 3,16 %	+ 1,62 %
98 mm	+ 3,84 %	+ 3,79 %	+ 2,08 %
148 mm	+ 4,92 %	+ 4,99 %	+ 3,01 %

Effekten av økt spaltetverrsnitt er kvantifisert ved å sammenligne relativ luftfuktighet for taktroas underside ved varierende spaltehøyde. Slik tabell 3 viser, vil spaltens omsluttende flater påvirkes i størst grad, mens undertakets underside påvirkes i begrenset grad. Dersom en fokuserer på taktroas underside, vil en økning i spaltehøyde fra 23 mm til 48 mm medføre en økning i relativ luftfuktighet på 2 %.

TEMPERATURFORHOLD I LUFTESPALTEN

For bygningsintegreerte solceller er undertaketets temperatur, alternativt temperaturen på elementenes underside av stor interesse. Dette grunnet at effektiviteten for slike anlegg reduseres i takt med økende modultemperatur. Undertaket, som her omtales taktro, er studert ved å sammenligne dets temperatur ved ulike spaltehøyder, under dimensjonerende sommerforhold. Med dimensjonerende sommerforhold, menes den perioden hvor utetemperaturen og globalstrålingen er høyest. Perioden er valgt ut på bakgrunn av Oslo klima (MDRY), hvilket benyttes i WUFI.



Figur 8. Temperatur for luftespaltens øvre del under dimensjonerende sommerforhold, ved varierende spaltehøyde.

Det bemerkes at taket er vendt mot nord, med en 50 graders helning. Videre er luftskifte satt lik 50 h^{-1} . Slik den øvre illustrasjon i figur 8 illustrerer, vil effekten av å øke spaltehøyden være lavere temperatur på taktroas underside. Temperaturforskjellene i aktuelt tilfelle er uthevet i den nedre illustrasjonen i figur 8. Slik detalj 2 viser, vil det for ekstremtilfellet vist i figur 8, forekomme betydelige temperaturdifferanser ved økende spaltetverrsnitt. Eksempelvis vil effekten av å øke spaltehøyden fra 23 mm til 48 mm, utgjøre en temperaturforskjell på ca 0,6 grader, i aktuelt tilfelle.

For å danne et tydeligere bilde på temperaturforholdene i en luftespalte ved varierende spaltehøyde, er årsgjennomsnittlig temperatur i spalten splittet i to deler. I tabell 4 vises gjennomsnittlig spaltetemperatur for tilfellene med utetemperaturer over null grader. Tilsvarende er det regnet ut gjennomsnittlig spaltetemperatur for tilfellene med utetemperaturer under null grader. Dette for å kunne skille endringene ved sommer- og vinterforhold, ved økte spaltehøyder.

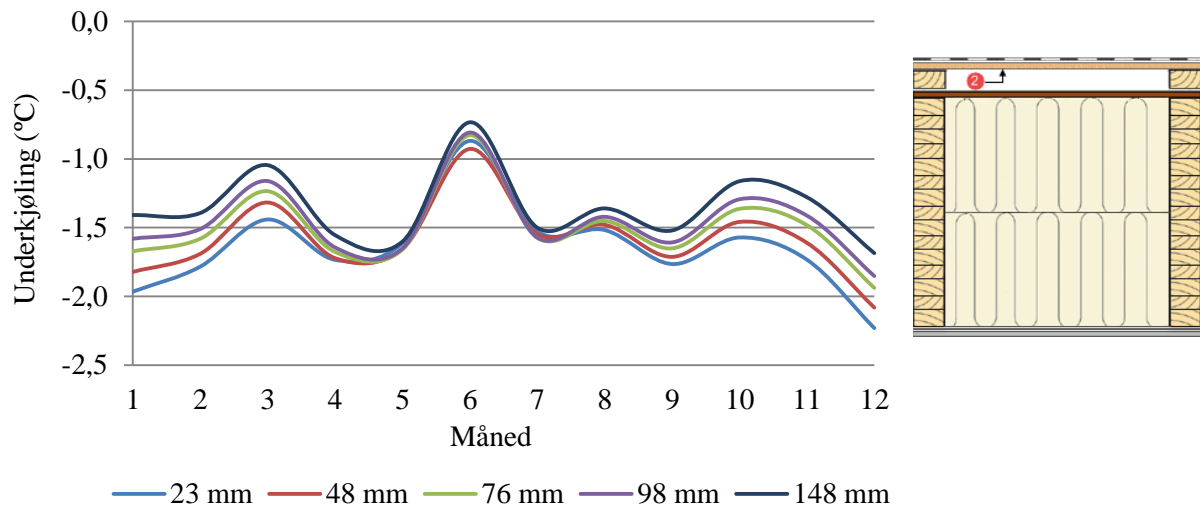
Tabell 4. Årsgjennomsnittlig temperatur for taktroas underside ved varierende spaltehøyde.

Spaltehøyde	Årsgjennomsnittlig temperatur for taktroas underside			
	$T_{ute} > 0 \text{ } ^\circ\text{C}$	Endring (%)	$T_{ute} < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$	Endring (%)
23 mm	12,47	-	-4,74	-
36 mm	12,33	-1,08 %	-4,71	0,72 %
48 mm	12,26	-1,67 %	-4,68	1,32 %
76 mm	12,06	-3,25 %	-4,61	2,83 %
98 mm	11,96	-4,11 %	-4,56	3,75 %
148 mm	11,72	-6,02 %	-4,50	5,14 %

Slik det fremgår av tabell 4, vil taktroas underside bli kaldere når utetemperaturen øker, i takt med økende spaltehøyde. Når utetemperaturen synker, vil temperaturen ved taktroas underside bli varmere, desto større spaltetverrsnitt. En varmere taktro ved økende spaltetverrsnitt, kan forklares ved at klimaet får en økende innvirkning på fukt- og temperaturforholdene i luftespalten. I store spaltetverrsnitt vil temperaturamplituden for taktroas underside reduseres, sammenlignet med små spaltetverrsnitt.

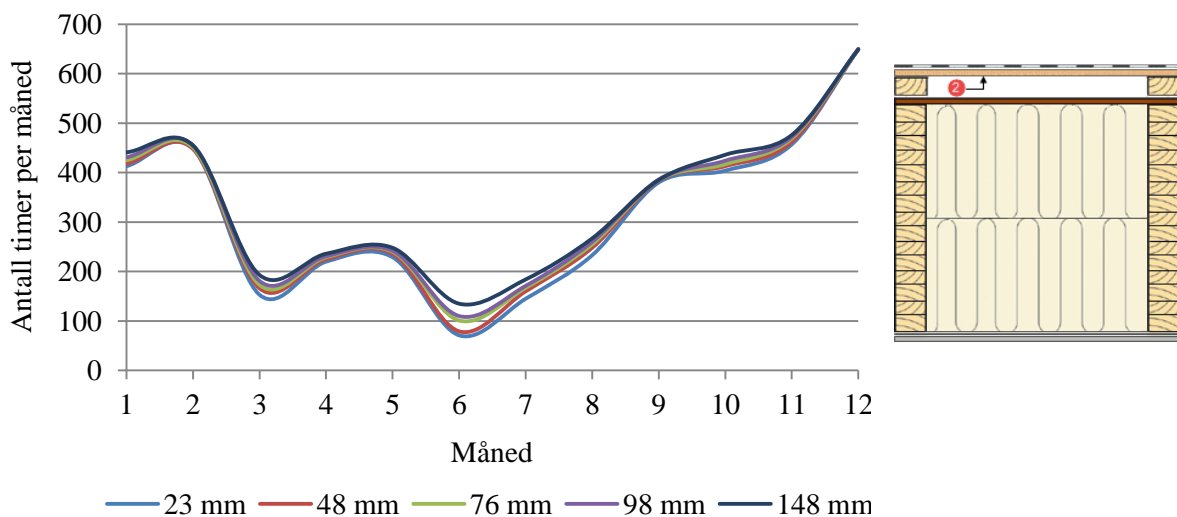
UNDERKJØLING AV TAKFLATEN

Ved økende spaltetverrsnitt vil utetemperaturer få en mer betydelig innvirkning på fukt- og temperaturforholdene i en luftespalte. I likhet med foregående effekter, er underkjølingen størrelsesorden og varighet ved økte spaltetverrsnitt av interesse. Slik figur 9 illustrerer, vil underkjølingen av taktroas underside reduseres, i takt med økende spaltetverrsnitt.



Figur 9. Månedsgjennomsnittlig underkjøling av taktroas underside, ved varierende spaltehøyde.

Underkjølingens varighet vil på sin øke, i takt med økende spaltetverrsnitt, slik illustrert i figur 10. Dette gjelder spesielt for vår, sommer og høst.



Figur 10. Månedsbasert underkjøling av taktroas underside, gitt som antall timer per måned, ved varierende spaltehøyde.

Dersom en sammenligner underkjølingens varighet og størrelse på årsbasis, ser en tydelig effekten av å øke spaltehøyden. Slik tabell 5 viser, vil økt spaltehøyde medføre at underkjølingens varighet øker, mens underkjølingens størrelse reduseres betraktelig.

Tabell 5. Årsgjennomsnittlig underkjøling av taktroas underside ved varierende spaltehøyde.

Spaltehøyde	<u>Antall timer per år med underkjøling av taktroas underside</u>			
	Antall timer	Endring (%)	Underkjøling (°C)	Endring (%)
23 mm	3802	-	-1,78	-
48 mm	3889	2,29 %	-1,69	-5,19 %
76 mm	3961	4,18 %	-1,59	-10,70 %
98 mm	4013	5,55 %	-1,53	-14,21 %
148 mm	4105	7,97 %	-1,40	-21,21 %

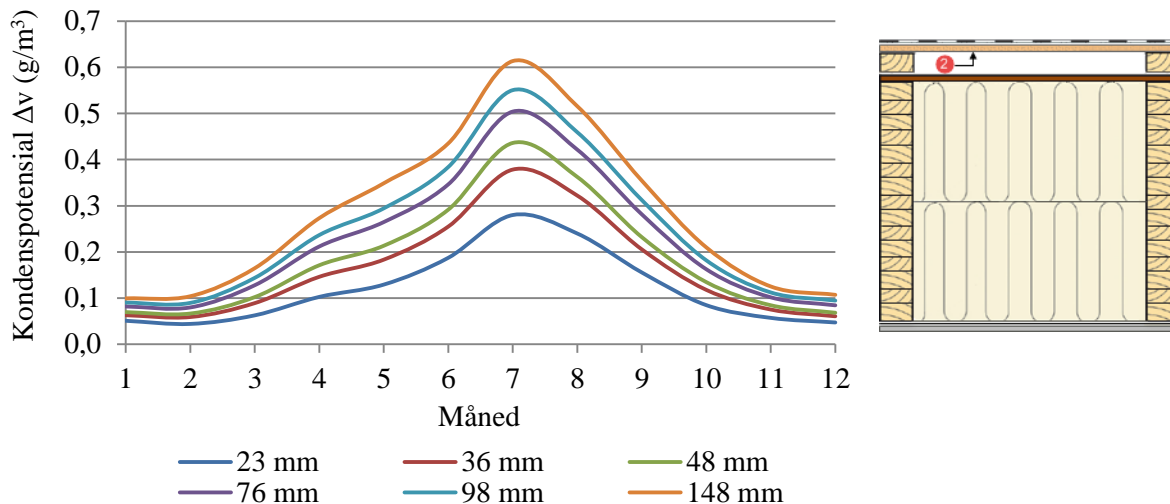
Dersom en ser på undertakets overside, kan en observere at både underkjølingens varighet og størrelse reduseres. Slik tabell 6 viser, vil effekten av å øke spaltehøyden fra 23 mm til 48 mm medføre at underkjølingens varighet reduseres med 2,5 % og størrelse 13 %, for undertakets overside.

Tabell 6. Årsgjennomsnittlig underkjøling av undertakets overside ved varierende spaltehøyde.

Spaltehøyde	<u>Antall timer per år med underkjøling av undertakets overside</u>			
	Antall timer	Endring (%)	Underkjøling (°C)	Endring (%)
23 mm	3037	-	-1,49	-
48 mm	2961	-2,50 %	-1,30	-12,98 %
76 mm	2956	-2,67 %	-1,15	-22,82 %
98 mm	2965	-2,37 %	-1,07	-28,23 %
148 mm	2983	-1,78 %	-0,91	-39,01 %

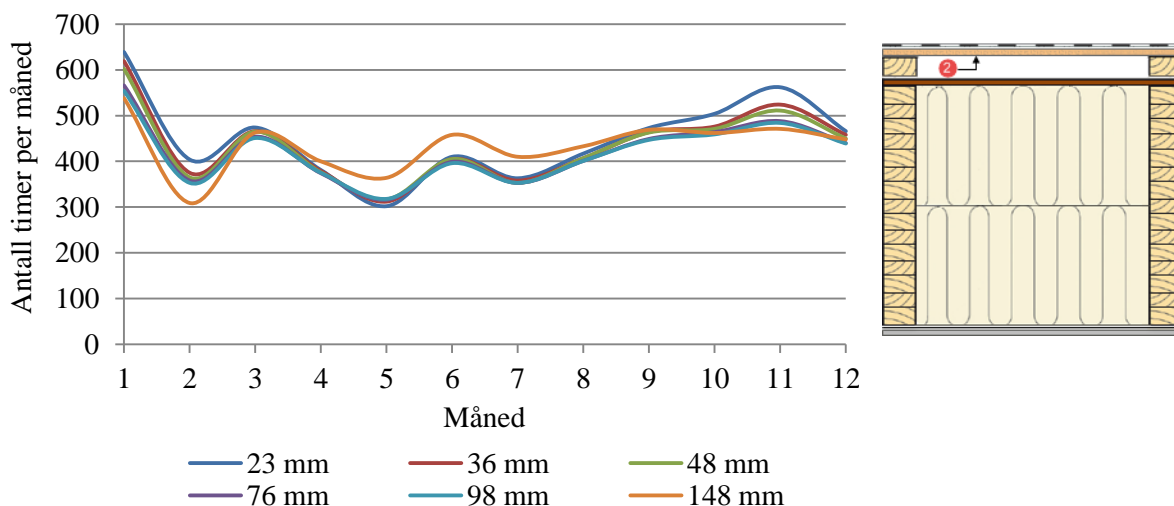
POTENSIAL FOR KONDENS

I det følgende er situasjoner hvor luftespaltens omsluttende flater opplever et positivt fukttilskudd studert, hvilket omtales kondenspotensial. Slik figur 11 viser, vil potensialet for kondens øke, i takt med økende spaltetverrsnitt.



Figur 11. Månedsgjennomsnittlig kondensbetingelser for taktroas underside, ved varierende spaltehøyde.

Ettersom uteluften inneholder mindre fukt per volumenhet under vår- og høstperiodene, sammenlignet med sommerperioden, vil kondenspotensialet reduseres ved økte spaltetverrsnitt under disse periodene. Slik figur 12 viser, vil kondenspotensialet for de minste spaltetverrsnittene være størst under vinter- og høstperiodene. Videre reduseres varigheten for de minste spaltetverrsnittene på sommerstid, sammenlignet med de største spaltetverrsnittene som er vurdert.



Figur 12. Månedsbasert kondensbetingelser for taktroas underside, gitt som antall timer per måned.

Kvantifisering av kondenspotensialet kan visualiseres gjennom tabell 7. Videre kan en observere at potensialets størrelse øker i langt større grad enn dets varighet, ved økende spaltetverrsnitt.

Tabell 7. Årsgjennomsnittlig kondenspotensial for taktroas underside ved varierende spaltehøyde.

Spaltehøyde	<u>Årsgjennomsnittlig kondenspotensial for taktroas underside</u>			
	Antall timer	Endring (%)	Potensial (g/m ³)	Endring (%)
23 mm	5395	-	0,11	-
36 mm	5243	-2,82 %	0,15	36,22 %
48 mm	5185	-3,89 %	0,18	55,99 %
76 mm	5062	-6,17 %	0,21	87,79 %
98 mm	5030	-6,77 %	0,23	108,22 %
148 mm	5012	-7,10 %	0,27	137,16 %

VEDLEGG 4.4. EFFEKTEN AV ØKT LUFTHASTIGHET

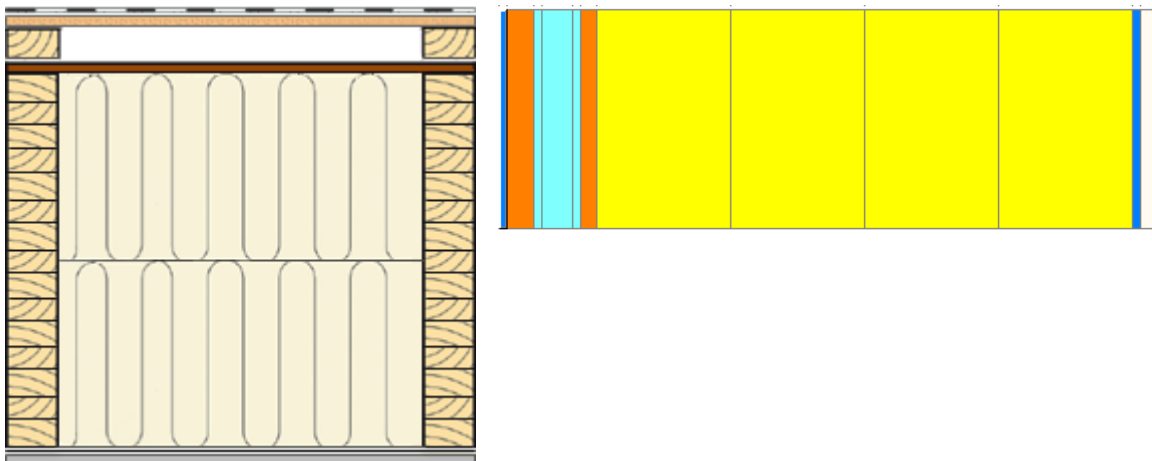
4.4.1. INTRODUKSJON

I det følgende er lufthastighetens innvirkning på fukt- og temperaturforhold i skrå tretak studert. Innledningsvis presenteres forutsetningene som ligger til grunn for parameterstudiet. Deretter presenteres resultatene fra parameterstudiet, som er ansett av interesse i denne sammenheng. Begrensninger ved bruk av aktuell modell i WUFI, er å finne som vedlegg 4.1.

4.4.2. FORUTSETNINGER

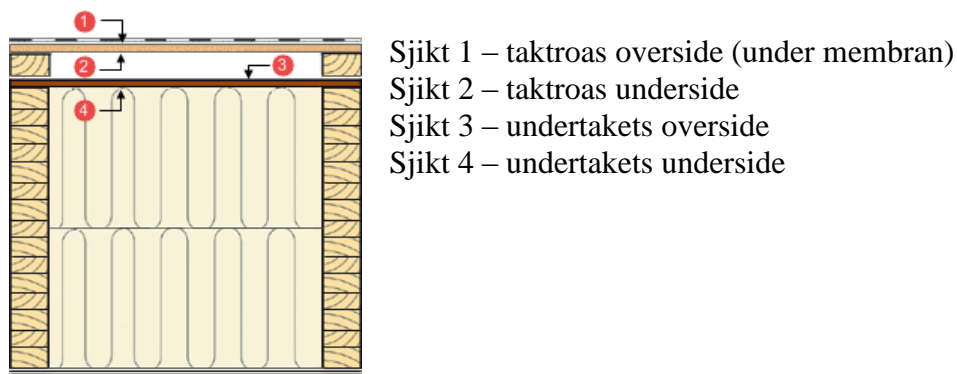
I samtlige simuleringer er taket i figur 1 benyttet. Taket som vurderes er vendt mot nord, med en 50 graders helning. Klimafil for Oslo er benyttet i samtlige simuleringer. Taket består av følgende parametere:

- Bitumenbasert takmembran
- Taktro, bestående av 12,5 mm OBS-plate
- 23 mm klemlekter/lufting
- Vindsperre bestående av 12,5 mm asfaltimpregnert trefiberplater
- 400mm isolasjon
- Dampsperre - 0,2 mm
- 12,5 mm gipsplater



Figur 1. Prinsipiell utførelse av taket som er simulert (venstre) og oppbygningen av taket i WUFI.

Sjiktene som er studert i WUFI, som det henvises til i det følgende, er illustrert i figur 2.



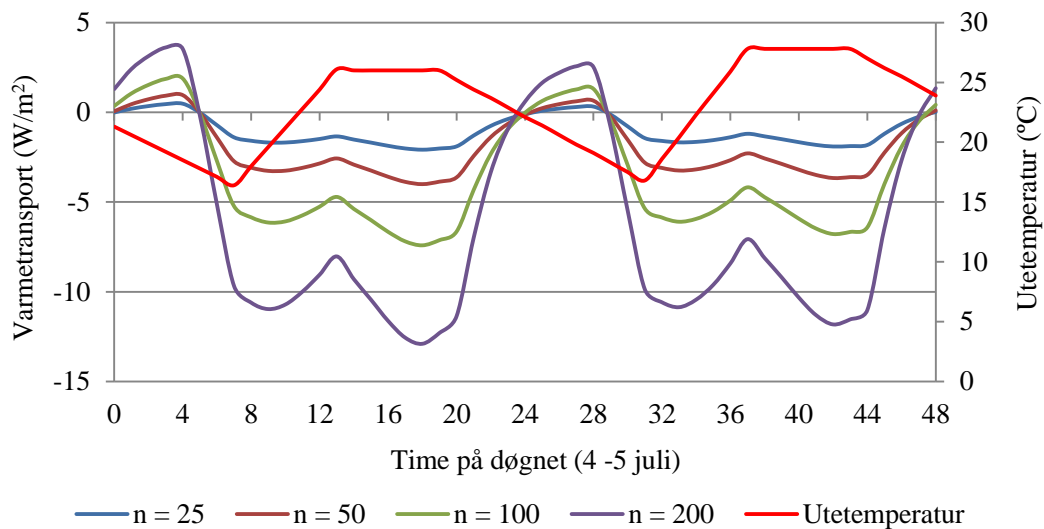
Figur 2. Definisjon av hvilke sjikt i taket som er studert.

4.4.3. RESULTATER

I likhet med spaltehøydens innvirkning på fukt- og temperaturforhold i luftespalten, er lufthastighetens innvirkning av interesse i inneværende oppgave. I de foregående parameterstudiene er lufthastigheten, alternativt luftskifte, holdt konstant. I det følgende studeres lufthastighetens effekt på fukt- og temperaturforhold i luftespalten.

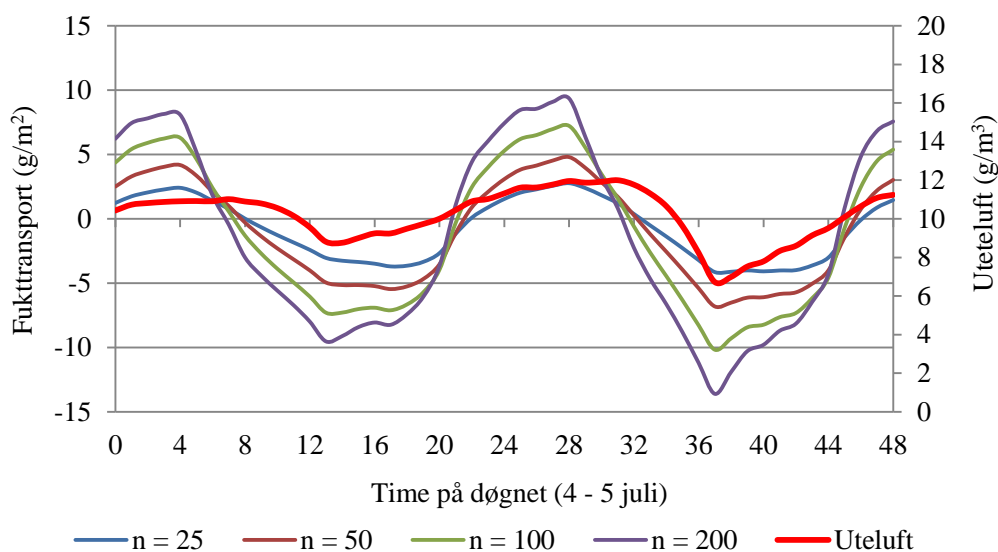
VENTILASJONSEVNE

Det er nærliggende å tro, at ved økt lufthastighet i luftespalten, vil uteluften påvirke fukt- og temperaturforholdene i spalten i økende grad. Slik det fremgår av figur 3, vil varmetransporten økes betraktelig, ved økt lufthastighet i en 23 mm luftespalte.



Figur 3. Varmetransport i luftespalten under dimensjonerende sommerdøgn, ved varierende luftskifte.

Det observeres videre at ventilasjonen øker i større grad enn tilskuddet til spalten, slik vist i figur 3. Fukktransport i luftespalten under samme periode er gitt i figur 4.



Figur 4. Fukktransport i luftespalten under dimensjonerende sommerdøgn, ved varierende luftskifte.

I denne oppgaven er et konstant luftskifte benyttet i parameterstudiene som ikke omhandler lufthastighet, mens luftskiftet varieres i dette parameterstudiet. Realiteten beveger seg betydelig vekk fra antakelsen om et konstant luftskifte i luftespalten gjennom et helt år, ettersom forholdene i virkeligheten er transiente. Det bemerkes videre at en beregning av lufthastighet i en luftespalte gjennom et helt år, er en tidkrevende og omfattende regneprosess, som ikke studeres ytterligere i dette studiet. Dersom luftespaltens gjennomsnittlige ytelser studeres, vil på en annen side antakelsen om et konstant luftskifte, være passende tilnærming av virkeligheten. Ved vurdering av en overordnet ventilasjonsevne for luftespalten i et skrått treak, bør både klima og geometrisk utforming av luftespalten legges til grunn. Videre bør ventilasjonsevnen beregnes på måneds- eller årsbasis. Slik det fremgår av tabell 1, vil lufthastigheten i luftespalten, alternativt luftskiftet, ha en markant innvirkning på luftespaltens ventilasjon, samt tilskuddets størrelsesorden.

Tabell 1. Årsgjennomsnittlig fordeling for varmetransport i luftespalten, gitt som tilskudd og ventilert mengde.

Luftskifte (h^{-1})	Varmetransport - fordeling mellom ventilert mengde og tilskudd			
	Ventilert ($\text{W}/\text{m}^2\text{h}$)	Endring (%)	Tilskudd ($\text{W}/\text{m}^2\text{h}$)	Endring (%)
n = 25	-0,73	-	0,34	-
n = 50	-1,41	92,61 %	0,65	90,98 %
n = 100	-2,61	257,41 %	1,20	252,53 %
n = 200	-4,59	527,19 %	2,08	509,16 %

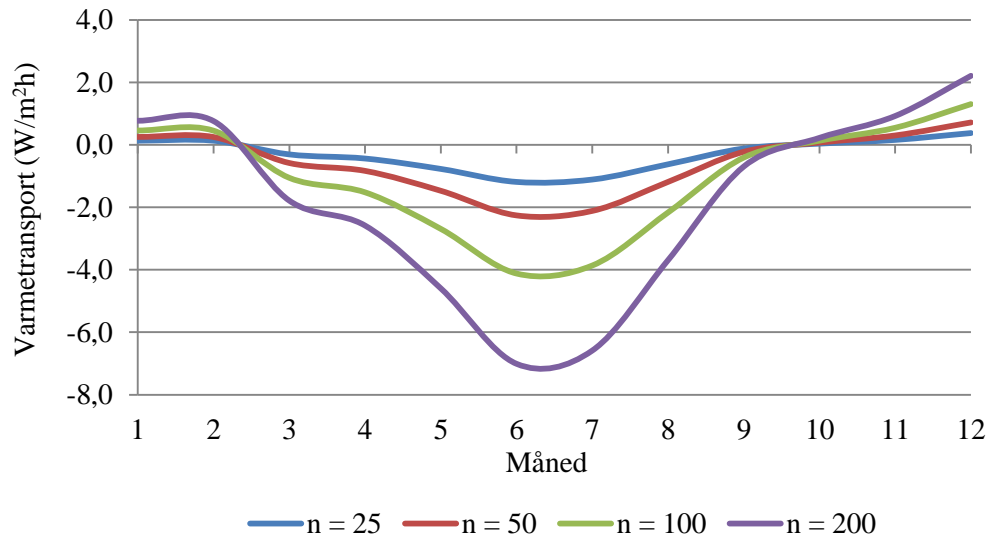
Dersom en studerer luftespaltens evne for fukttransport, ser en at effekten av økt lufthastighet i luftespalten har en mindre innvirkning, sammenlignet med innvirkningen på luftespaltens varmetransport. Slik det fremgår av tabell 2, vil effekten av å doble luftomsetningen, fra 25 omsetninger i timen medføre ca 60 % økt kapasitet for fukttransport. Tilsvarende medfører samme økning i luftomsetning, ca 92 % økt kapasitet for varmetransport i luftespalten.

Tabell 2. Årsgjennomsnittlig fordeling for fukttransport i luftespalten, gitt som tilskudd og ventilert mengde.

Luftskifte (h^{-1})	Fukttransport - fordeling mellom ventilert mengde og tilskudd			
	Ventilert ($\text{g}/\text{m}^3\text{h}$)	Endring (%)	Tilskudd ($\text{g}/\text{m}^3\text{h}$)	Endring (%)
n = 25	-1,03	-	0,69	-
n = 50	-1,64	59,00 %	1,16	68,06 %
n = 100	-2,41	133,67 %	1,79	159,97 %
n = 200	-3,20	209,92 %	2,45	256,53 %

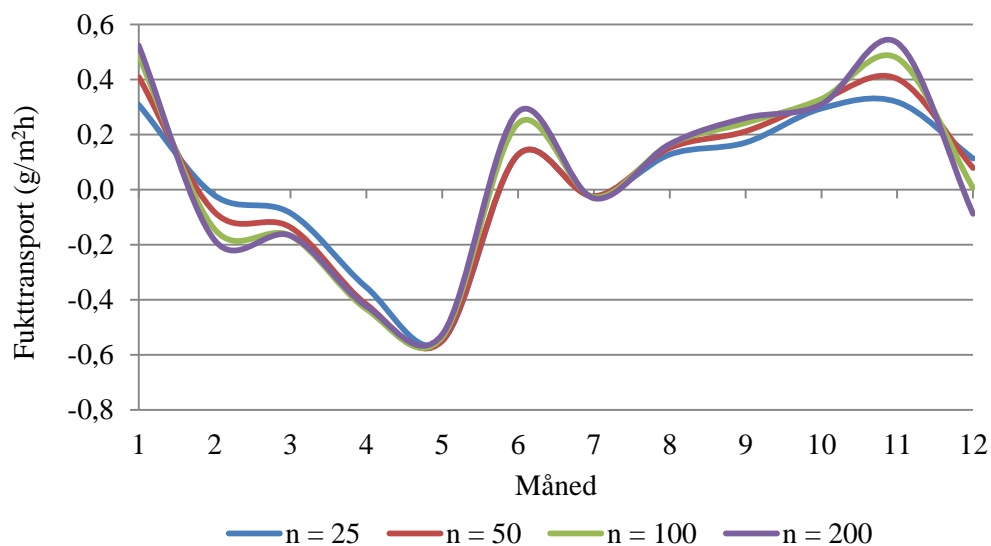
Effekten av økt luftskifte i luftespalten, er at uteluften dras hurtigere gjennom luftespalten. Når fuktig uteluft dras gjennom luftespalten, vil dette virke som et fukttilskudd for de omsluttende flatene i spalten. Det er viktig å bemerke seg at tilskudd og ventilasjon skjer under ulike deler av døgnet. Derfor må netto effekt av fukttransporten vurderes, hvilket er kvantifisert gjennom å studere årsgjennomsnittlig relativ luftfuktighet for de omsluttende flatene i luftespalten.

Figur 3 og 4 viser kun en periode på to dager. For å danne et mer helhetlig bilde, er gjennomsnittlig varme- og fukttransport i luftespalten på årsbasis illustrert i det følgende. Slik det fremgår av figur 5, vil et høyt luftskifte medføre et større varmetilskudd i enkelte perioder av året, sammenlignet med et lavt luftskifte. Videre vil et stort luftskifte medføre betydelig økt ventilasjon av fukt og varme, under sommerhalvåret, sammenlignet med et lavt luftskifte. Det bemerkes at negativ varme- og fukttransport i figur 5 og 6 representerer en ventilert mengde, mens positiv transport representerer et tilskudd i luftespalten.



Figur 5. Månedsgjennomsnittlig varmetransport i en 23 mm høy luftespalte, ved varierende luftskifte.

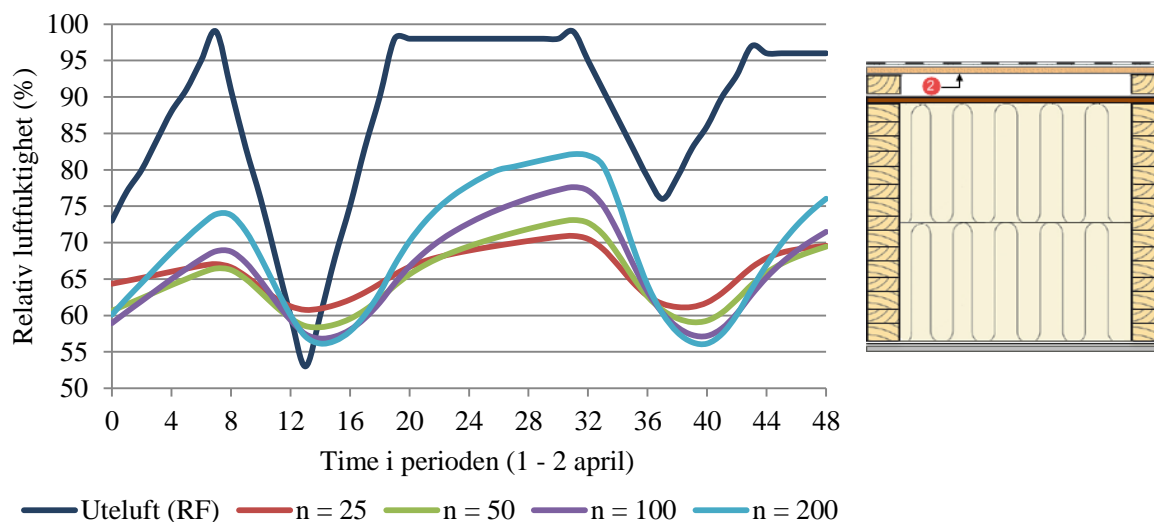
Dersom en fokuserer på fukttransporten, observeres en mindre forskjell mellom de ulike luftskiftene, sammenlignet med varmetransport. Slik illustrert i figur 6, vil et stort luftskifte medføre et større fukttilskudd under sommer og vinter, sammenlignet med et lavt luftskifte.



Figur 6. Månedsgjennomsnittlig fukttransport i en 23 mm høy luftespalte, ved varierende luftskifte

FUKTFORHOLD I LUFTESPALTEN

Dersom en vårperiode studeres, kan en tydelig se effekten av varierende luftskifte og tilhørende effekt på fuktforholdet i en luftespalte. Desto høyere opptrødende lufthastighet i luftespalten, jo hurtigere vil klimaet i spalten preges av uteklimaet, slik vist i figur 7.



Figur 7. Relativ luftfuktighet for taktroas underside ved varierende luftskifte.

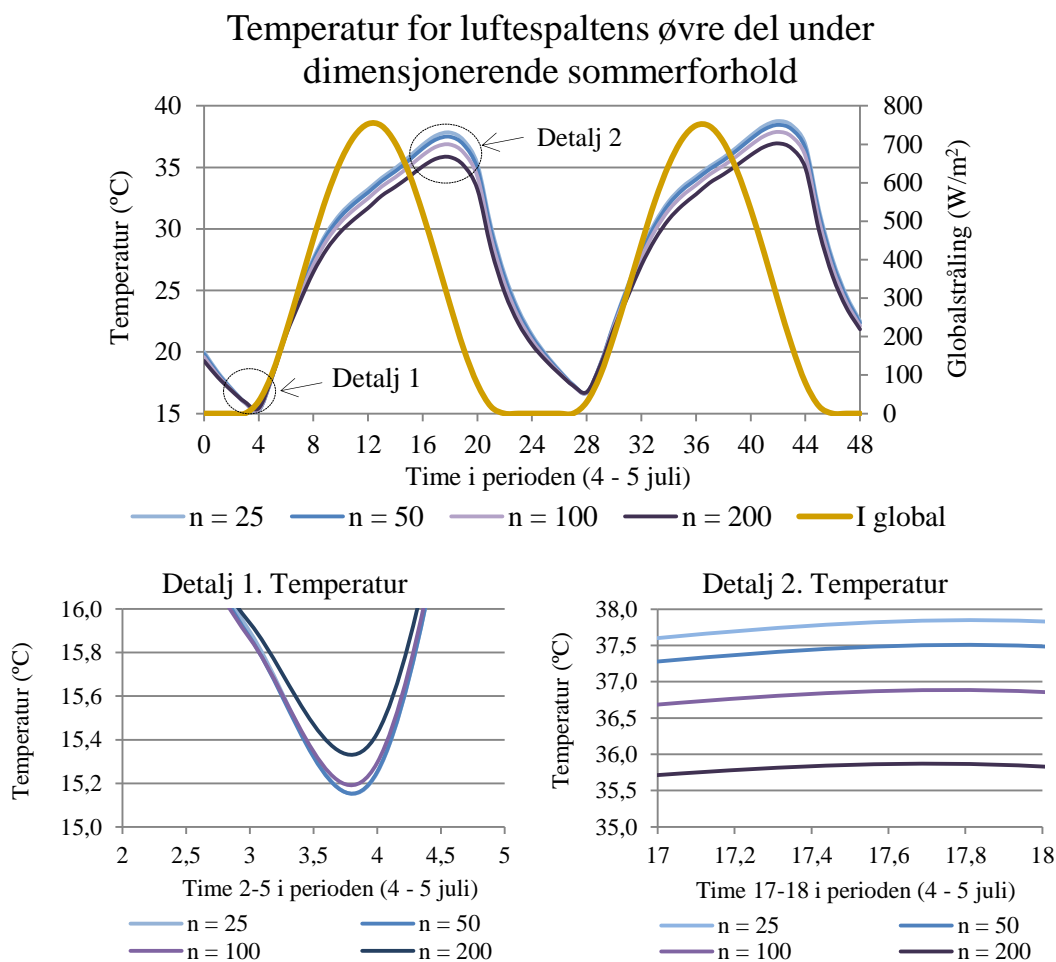
For å kartlegge effekten av økt lufthastighet, er årsgjennomsnittlig relativ luftfuktighet for luftespalteas omsluttende flater studert. Slik det fremgår av tabell 3, vil taktroas underside og undertakets overside oppleve omtrent 2 % økning i relativ luftfuktighet, dersom luftskiftet økes fra 25 til 50 luftomsetninger i timen. Undertakets underside vil også påvirkes, men i mindre grad.

Tabell 3. Endring i årsgjennomsnittlig relativ luftfuktighet ved varierende luftskifte i luftespalten.

Luftskifte (h^{-1})	Endring (%) ved økt luftskifte utover $n = 25 \text{ h}^{-1}$		
	Taktro - underside	Undertak - overside	Undertak - underside
n = 25	64,98 % RF	63,97 % RF	62,77 % RF
n = 50	+ 1,99 %	+ 2,05 %	+ 0,82 %
n = 100	+ 3,91 %	+ 3,99 %	+ 1,61 %
n = 200	+ 5,82 %	+ 5,90 %	+ 2,73 %

TEMPERATURFORHOLD I LUFTESPALTEN

Lufthastighet i luftespalten er sammen med spaltehøyde, ansett som faktorer av størst betydning vedørende temperaturforskjeller over luftespalten. Slik vist i figur 8, vil temperaturen i luftespaltens øvre del reduseres ved økt lufthastighet i spalten.



Figur 8. Temperaturforhold for luftespaltens øvre del under dimensjonerende sommerforhold, ved varierende luftskifte.

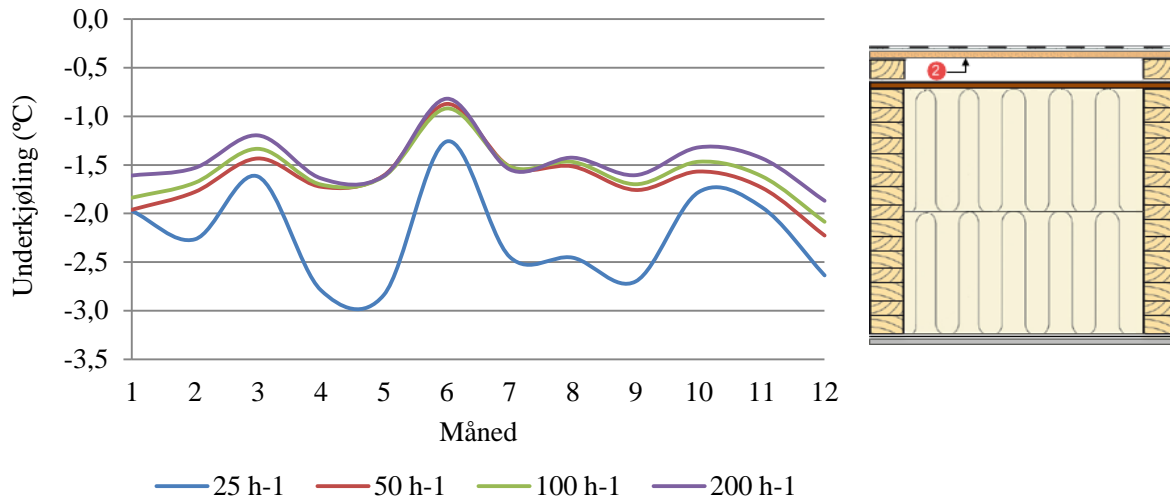
Dersom en ser på årgjennomsnittlig temperatur, i tilfellene hvor utetemperaturen er over null grader, medfører økt lufthastighet en lavere spaltetemperatur. For tilfellene hvor utetemperaturen er under null grader, medfører økt lufthastighet en varmere spalte, slik vist i tabell 4.

Tabell 4. Årgjennomsnittlig temperatur for taktroas underside.

Luftskifte (h^{-1})	Gjennomsnittstemp. for taktroas underside ($^{\circ}C$)			
	$T_{ute} > 0$	Endring (%)	$T_{ute} < 0$	Endring (%)
n = 25	12,57	-	-4,79	-
n = 50	12,47	-0,82 %	-4,74	1,05 %
n = 100	12,28	-2,32 %	-4,67	2,55 %
n = 200	11,98	-4,69 %	-4,57	4,64 %

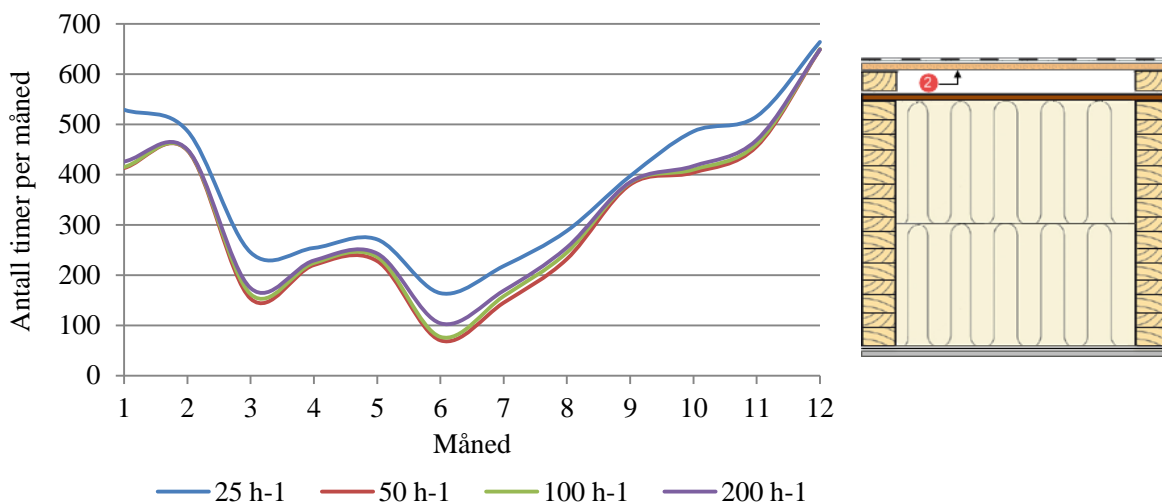
UNDERKJØLING AV TAKFLATEN

I tilfeller med underkjøling av takflaten, vil flaten domineres av et negativ strålingstap. Under slike perioder er det nærliggende å tro at varmetransport ved konveksjon for taktroas underside, vil ha en innvirkning på flatens varmebalanse. Det er derfor ønskelig å studere effekten av økt lufthastighet i spalten, og dets effekt på underkjølingens størrelsesorden og dets varighet. Slik figur 9 viser, vil underkjølingens størrelse reduseres betraktelig, ved økt lufthastighet i spalten.



Figur 9. Månedsgjennomsnittlig underkjøling av taktroas underside, ved varierende luftskifte.

Det kan observeres at underkjølingen reduseres betraktelig fra en luftskifte tilsvarende 25 omsetninger i timen, til et luftskifte på 50 omsetninger i timen. Videre observeres en begrenset effekt ved ytterligere økt luftomsetning i luftespalten.



Figur 10. Månedsbasert underkjøling av taktroas underside, gitt som antall timer per måned, ved varierende luftskifte.

Underkjølingens varighet vil reduseres ved økt lufthastighet i luftespalten, slik vist i figur 10. Videre er det interessant å se at et luftskifte på 50 til 100 omsetninger i timen har en kortere varighet, sammenlignet med 200.

For å kunne kartlegge effekten mer detaljert, er årsgjennomsnittlig underkjøling studert ytterligere. Slik det fremgår av tabell 5, vil økt lufthastighet i luftespalten bidra til å redusere underkjølingens varighet og størrelse. Videre kan en se at underkjølingens varighet reduseres i mindre grad, i takt med økende lufthastighet.

Tabell 5. Årsgjennomsnittlig underkjøling av taktroas underside, ved varierende luftskifte.

Luftskifte	Underkjøling av taktroas underside			
	Antall timer	Endring (%)	Underkjøling (°C)	Endring (%)
25 h ⁻¹	4519	-	-2,25	-
50 h ⁻¹	3798	-15,95 %	-1,77	-21,00 %
100 h ⁻¹	3871	-14,34 %	-1,68	-25,01 %
200 h ⁻¹	3970	-12,15 %	-1,54	-31,48 %

Dersom en ser på undertakets overside er bildet noe annerledes. Her vil økt lufthastighet medføre at underkjølingens varighet økes, og at dets størrelse reduseres. Slik det fremgår av tabell 6, er økningen i underkjølingens varighet beskjeden, sett i lys av en årsgjennomsnittlig betraktning.

Tabell 6. Årsgjennomsnittlig underkjøling av undertakets overside, ved økt luftskifte.

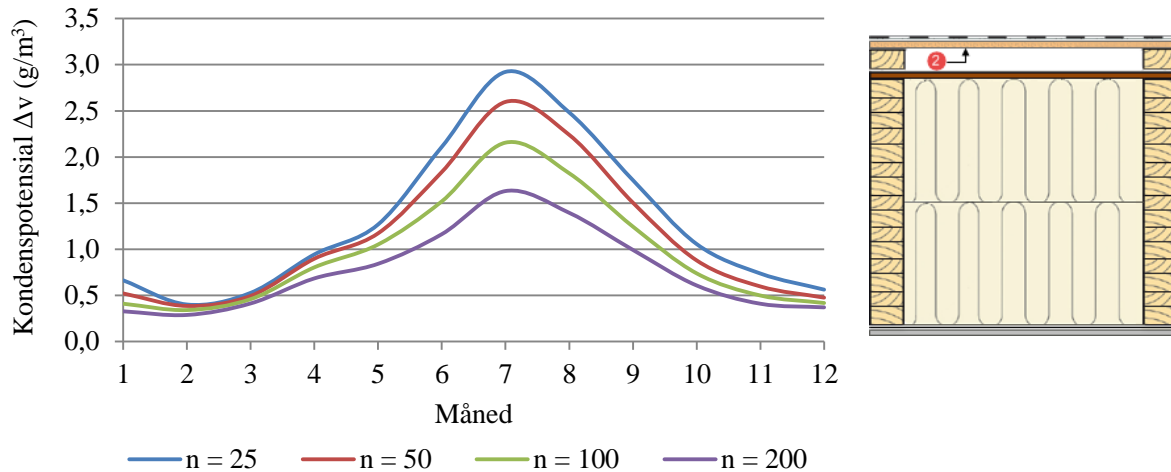
Luftskifte	Underkjøling av undertakets overside			
	Antall timer	Endring (%)	Underkjøling (°C)	Endring (%)
25 h ⁻¹	3031	-	-1,57	-
50 h ⁻¹	3037	0,20 %	-1,49	-5,19 %
100 h ⁻¹	3047	0,53 %	-1,35	-14,37 %
200 h ⁻¹	3061	0,99 %	-1,12	-28,84 %

Underkjøling av takflaten medfører, slik nevnt i oppgavens kapittel 4, at takflatens temperatur kjøles ned under utetemperaturen. Desto større opptredende underkjøling, jo større differanse kan observeres mellom takflatens temperatur og utetemperaturen. Følgelig vil uteluften som strømmer gjennom raftekassen og opp gjennom luftespalten, være varmere enn flatene som underkjøles. Derfor kan en si at utetemperaturen vil bidra til å varme opp flatene som underkjøles. Mer presist sagt, vil konvektiv varmetransport fra spalteluften til spaltens omsluttende flater medføre at underkjølingen av flatene reduseres. Følgelig vil underkjølingen reduseres i takt med økende luftskifte, slik vist i tabell 6.

Det kan gjennom dette, og foregående parameterstudie vedrørende varierende spaltehøyde, observeres at underkjølingens størrelse og varighet reduseres, i takt med økt lufthastighet og økt spaltehøyde.

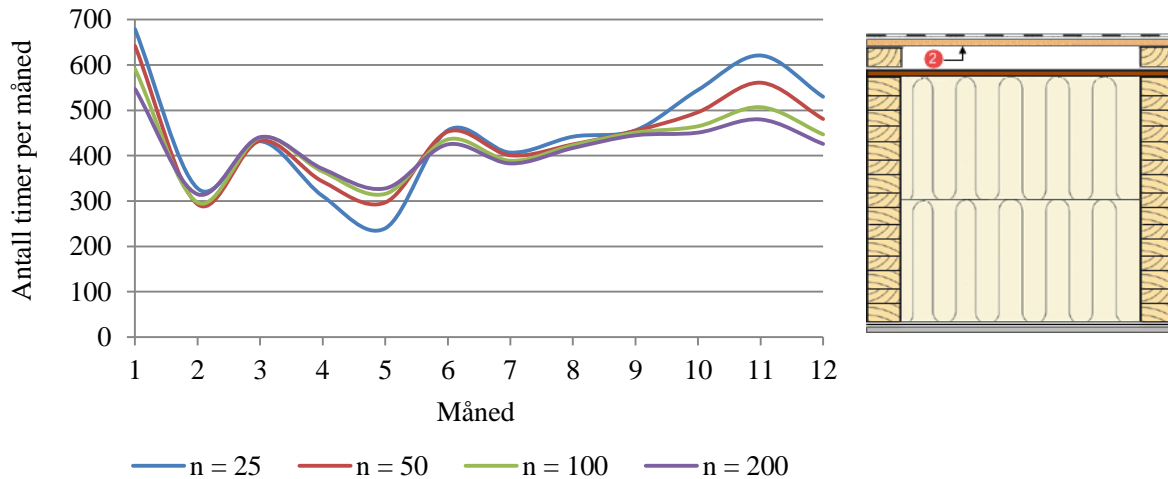
POTENSIAL FOR KONDENS

I likhet med effekten på underkjøling, vil økt lufthastighet ha en innvirkning på kondenspotensialet i luftspalten. Slik vist i figur 11, vil effekten være begrenset under våren, mens effekten tydeliggjøres godt under sommerperioden.



Figur 11. Månedsgjennomsnittlig kondensbetingelser for taktroas underside, ved varierende luftskifte.

Det kan videre observeres at lufthastighetens effekt på kondenspotensialets varighet vil variere gjennom et år. Eksempelvis vil effekten av økt lufthastighet i spalten være forlenget varighet under vår og høst, slik illustrert i figur 12.



Figur 12. Månedsbasert kondensbetingelser for taktroas underside, gitt som antall timer per måned, ved varierende luftskifte.

En mer detaljert kvantifisering av lufthastighetens effekt på kondenspotensialet er gitt i tabell 7. Det kan observeres at potentialets størrelse reduseres i betraktelig større grad enn dets varighet, ved økt lufthastighet i luftespalten.

Tabell 7. Årsgjennomsnittlig kondenspotensial for taktroas underside, ved varierende luftskifte.

Luftskifte	<u>Årsgjennomsnittlig kondenspotensial for taktroas underside</u>			
	Antall timer	Endring (%)	Potensial (g/m ³ h)	Endring (%)
n = 25 h ⁻¹	5447	0	1,25	0
n = 50 h ⁻¹	5280	-3,07 %	1,10	-11,40 %
n = 100 h ⁻¹	5127	-5,87 %	0,93	-25,03 %
n = 200 h ⁻¹	5029	-7,67 %	0,75	-40,10 %

I likhet med taktroas underside, vil økt lufthastighet redusere potentialet for kondens for undertakets overside. Det kan observeres at reduksjonen i potentialets varighet er betydelig større for undertaket, sammenlignet med taktroa.

Tabell 8. Årsgjennomsnittlig kondenspotensial for undertakets overside, ved varierende luftskifte.

Luftskifte	<u>Årsgjennomsnittlig kondenspotensial for undertakets overside</u>			
	Antall timer	Endring (%)	Potensial (g/m ³ h)	Endring (%)
n = 25 h ⁻¹	5416	0	1,24	0
n = 50 h ⁻¹	5281	-12,78 %	1,07	-13,65 %
n = 100 h ⁻¹	5158	-14,81 %	0,87	-29,70 %
n = 200 h ⁻¹	5083	-16,05 %	0,65	-47,09 %

VEDLEGG 4.5. EFFEKTEN AV ØKT TAKHELNING

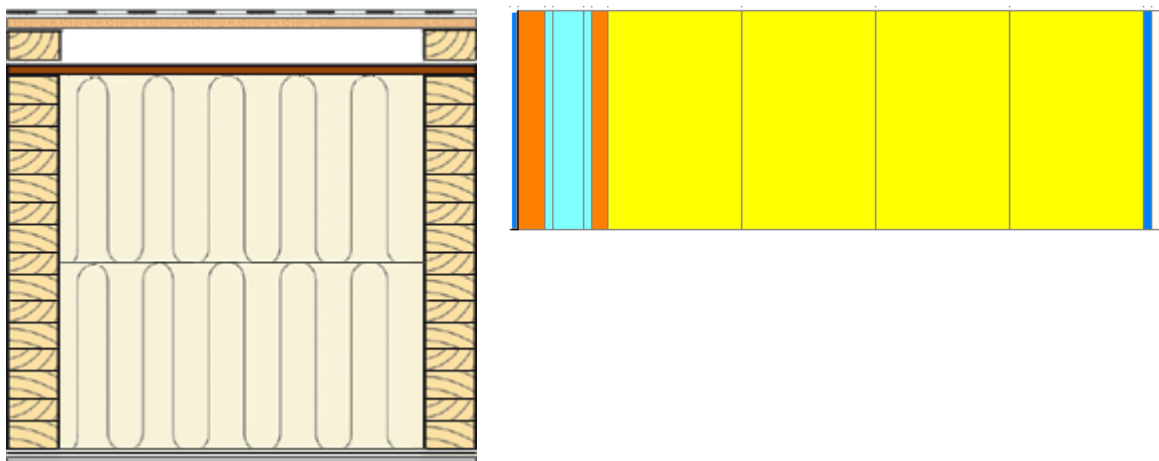
4.5.1. INTRODUKSJON

I det følgende er takhelningens innvirkning på fukt- og temperaturforhold i skrå tretak studert. Innledningsvis presenteres forutsetningene som ligger til grunn for parameterstudiet. Deretter presenteres resultatene fra parameterstudiet, som er ansett av interesse i denne sammenheng. Begrensninger ved bruk av aktuell modell i WUFI, er å finne som vedlegg 4.1.

4.5.2. FORUTSETNINGER

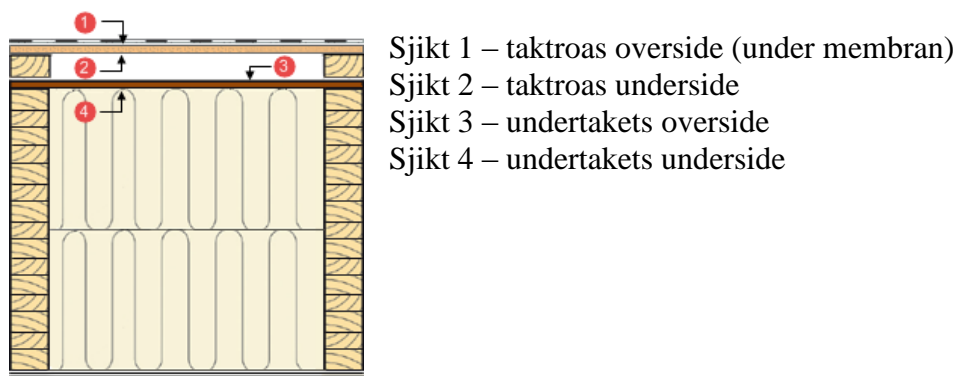
I samtlige simuleringer er taket i figur 1 benyttet, med varierende takhelning. Taket som vurderes er vendt mot nord. Klimafil for Oslo er benyttet i samtlige simuleringer. Taket består av følgende parametere:

- Bitumenbasert takmembran
- Taktro, bestående av 12,5 mm OBS-plate
- 23 mm klemllekter/lufting
- Vindsperre bestående av 12,5 mm asfaltimpregnert trefiberplater
- 400mm isolasjon
- Dampspærre - 0,2 mm
- 12,5 mm gipsplater



Figur 1. Prinsipiell utførelse av taket som er simulert (venstre) og oppbygningen av taket i WUFI.

Sjiktene som er studert i WUFI, som det henvises til i det følgende, er illustrert i figur 2.



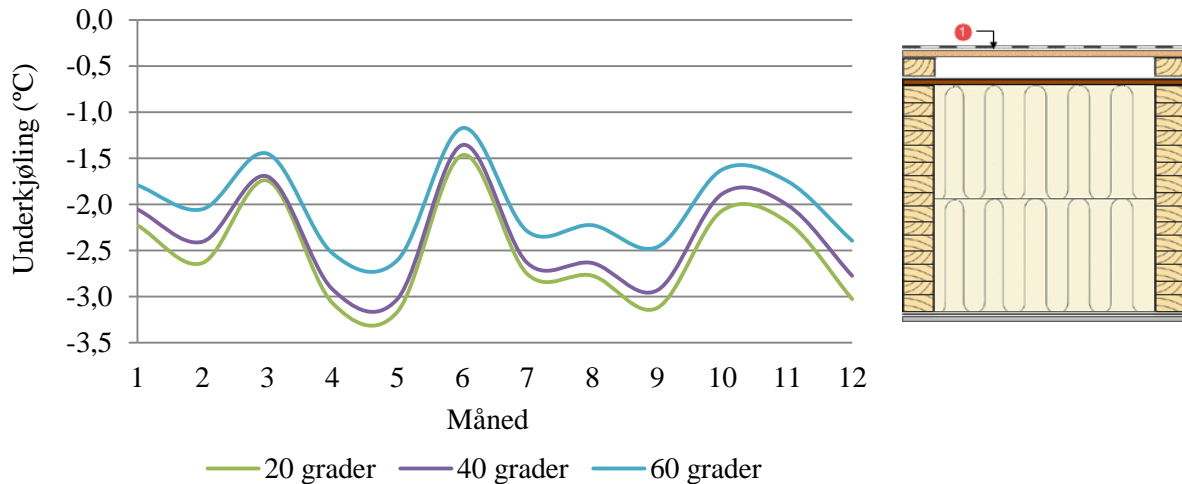
Figur 2. Definisjon av hvilke sjikt i taket som er studert.

4.5.3. RESULTATER

Resultatene som her presenteres er begrenset til underkjøling og potensial for kondens. Dette grunnet at andre effekter og trender gitt av å variere takhelningen, dels overlapper resultatene fra de foregående parameterstudiene.

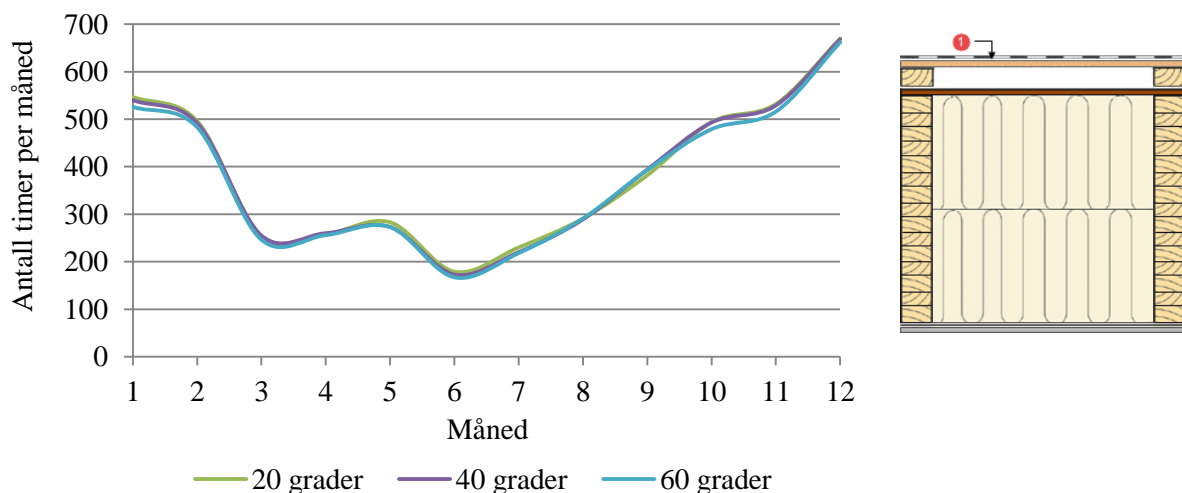
UNDERKJØLING AV TAKFLATEN

I henhold til det fysikalske grunnlaget i oppgavens kapittel 4, som beskriver underkjøling, vil underkjølingen av et tak øke i takt med redusert takvinkel. Slik det fremgår av figur 3, vil underkjølingen av et skrått tretak reduseres i takt med økende takvinkel.



Figur 3. Månedsgjennomsnittlig underkjøling av taktroas overside, ved varierende takhelning.

I likhet med underkjølingens størrelse, vil underkjølingens varighet reduseres i takt med økende takhelning. Slik visualisert i figur 4, er effekten av økt takvinkel mindre betydelig, sammenlignet med underkjølingens størrelse, slik vist i figur 3.



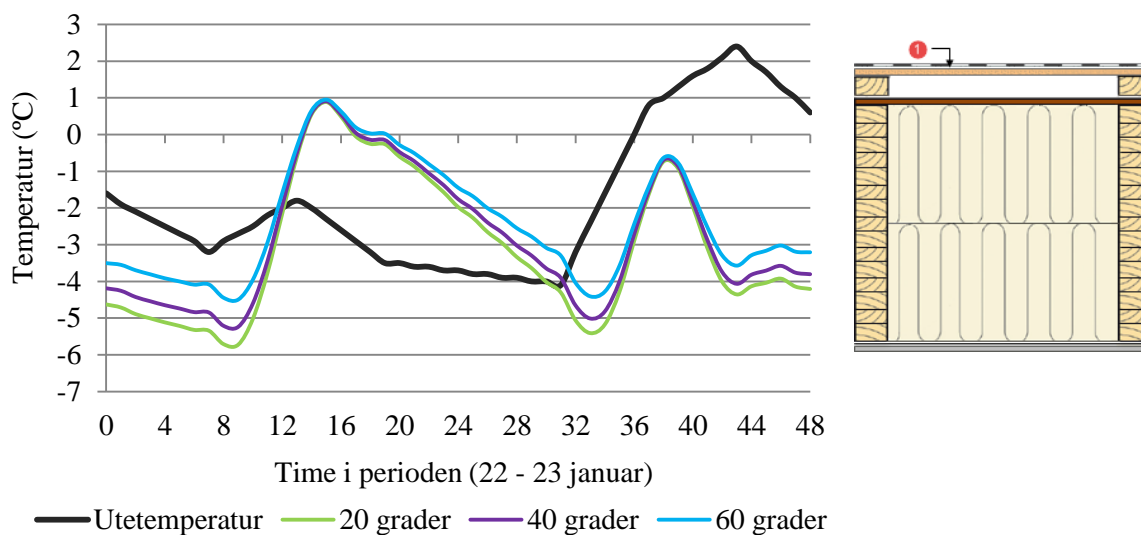
Figur 4. Månedsbasert underkjøling av taktroas overside, gitt som antall timer per måned, ved varierende takhelning.

Ved en årsgjennomsnittlig betraktning, kan en foreta en mer helhetlig kvantifisering av takhelningens innvirkning på underkjøling av takflaten. Slik det fremgår av tabell 1, vil effekten av å øke takhelningen fra 20 grader til 60 grader, være betydelig for underkjølingens størrelse, mens dets varighet reduseres i mindre grad.

Tabell 1. Årsgjennomsnittlig underkjøling av taktroas underside, ved varierende takhelning.

Takhelning	Antall timer	Underkjøling av taktroas overside		
		Endring (%)	Underkjøling (°C)	Endring (%)
20 grader	4615	-	-2,55	-
40 grader	4586	-0,63 %	-2,37	-6,88 %
60 grader	4510	-2,28 %	-2,05	-19,76 %

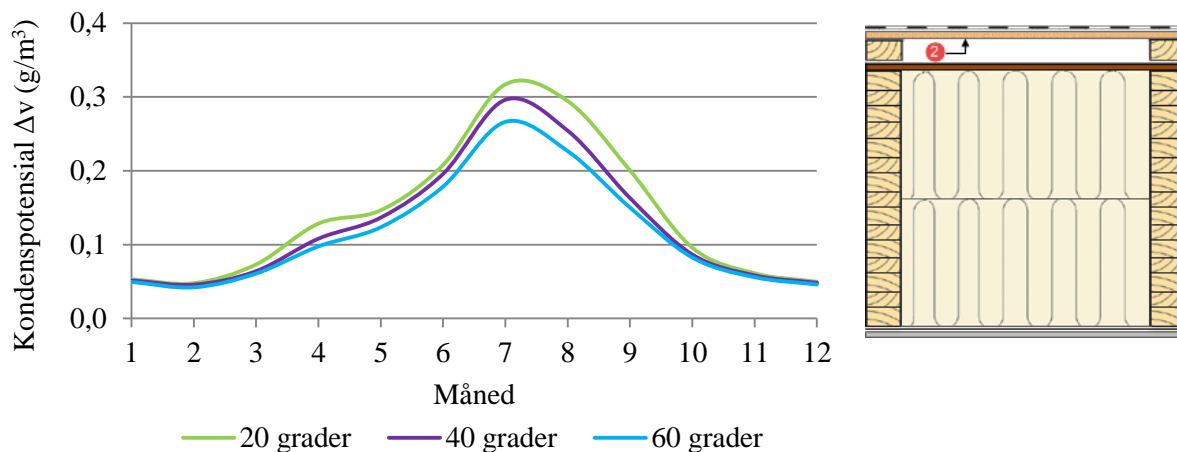
Tak med liten helning vil oppleve et større netto strålingstap, hvilket medfører økt underkjøling, sammenlignet med tak med stor helning. Effekten av underkjøling ved varierende takhelning kan visualiseres slik vist i figur 5, hvor underkjøling under en periode på vinteren er fremstilt.



Figur 5. Underkjøling av taktroas underside i perioden (22 – 23 januar), ved varierende takhelning.

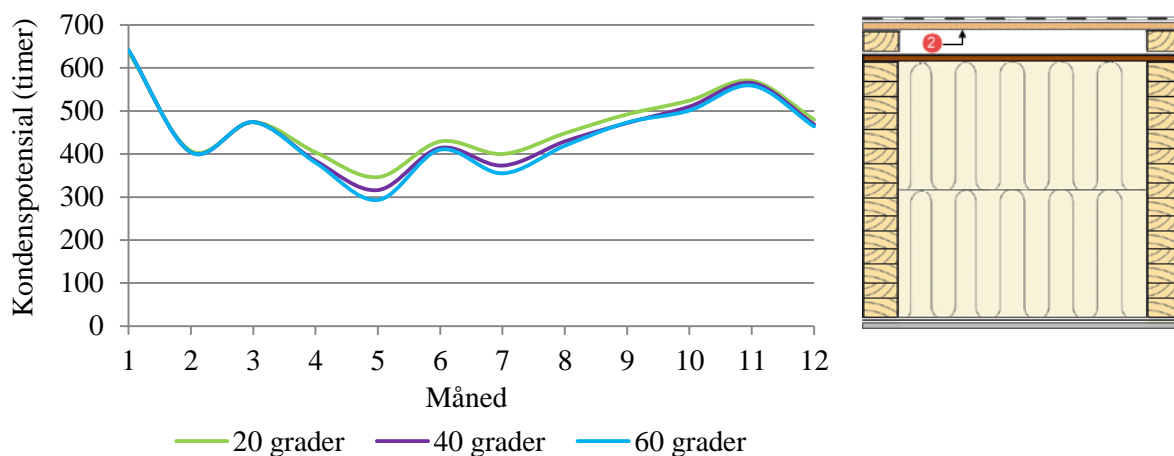
POTENSIAL FOR KONDENS

I likhet med underkjøling av takflaten ved økt takhelning, vil potensialet for kondens reduseres ved økt takhelning. Slik vist i figur 6, er effekten av økt takhelning størst under våren og sommeren.



Figur 6. Månedsgjennomsnittlig kondensbetingelser for taktroas underside, ved varierende takhelning.

Likeledes vil kondenspotensialets varighet reduseres ved økt takhelning, slik det fremgår av figur 7. I likhet med potensialets størrelse, er varighetens reduksjon størst under sommerhalvåret.



Figur 7. Månedsbasert kondensbetingelser for taktroas underside, gitt som antall timer per måned, ved varierende takhelning.

Dersom en betrakter effekten på årsbasis, kan en se at reduksjonen i potensialet for kondens er betydelig større enn dets varighet, hvilket fremgår av tabell 2.

Tabell 2. Årsgjennomsnittlig kondenspotensial for taktroas underside.

Takhelning	Kondenspotensial for taktroas underside			
	Antall timer	Endring (%)	Potensial (g/m ³)	Endring (%)
20 grader	5611	-	0,13	-
40 grader	5451	-2,85 %	0,12	-11,15 %
60 grader	5373	-4,24 %	0,11	-19,01 %

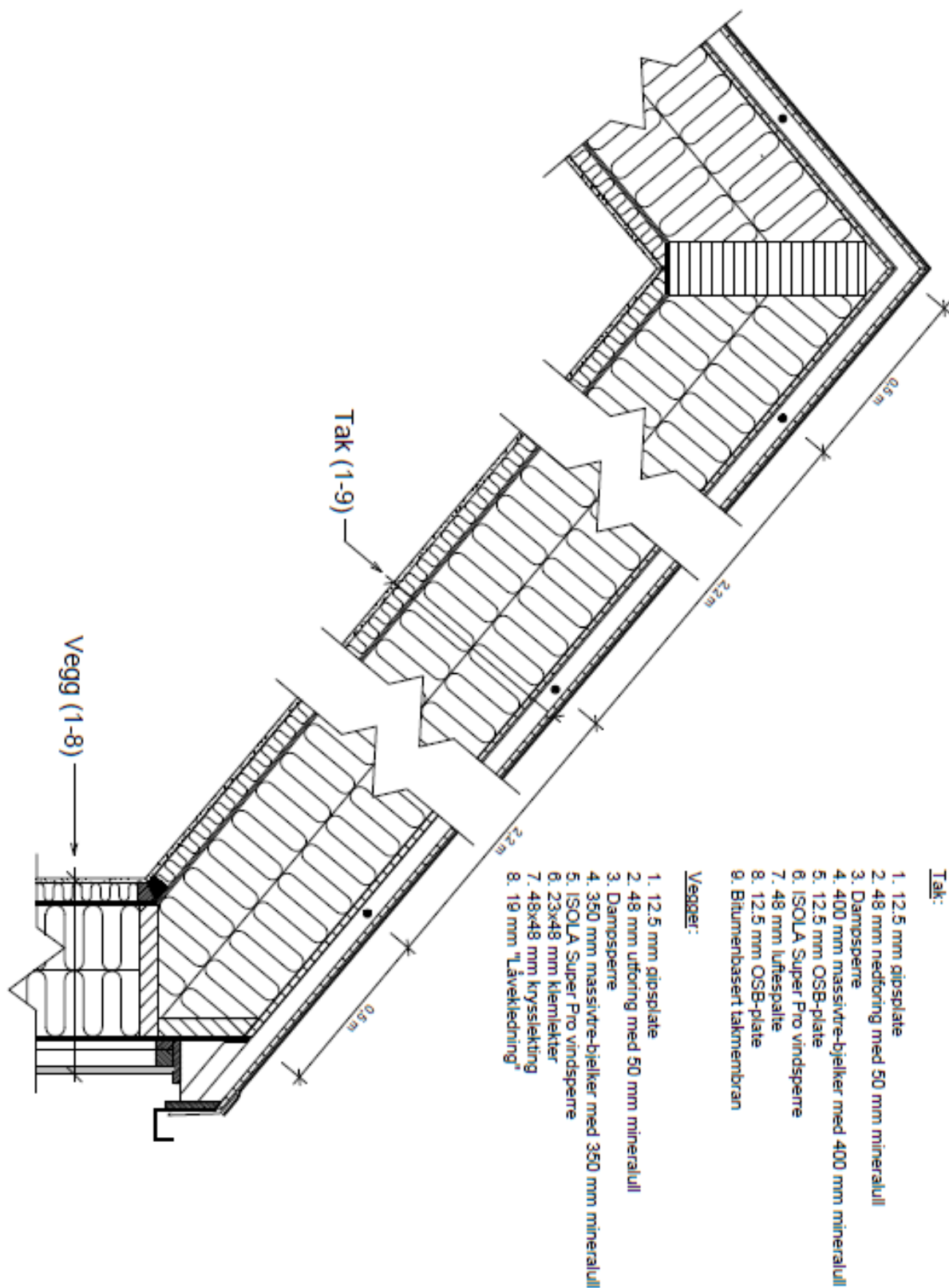
LUFTSTRØMNING I SKRÅ TRETAK

- eksperimentelle undersøkelser og numeriske beregninger

VEDLEGG 5. ZEB TEST CELL

VEDLEGG 5. ZEB TEST CELL

5.1. DETALJTEGNING – TAKOPPBYGNING I ZEB TEST CELL

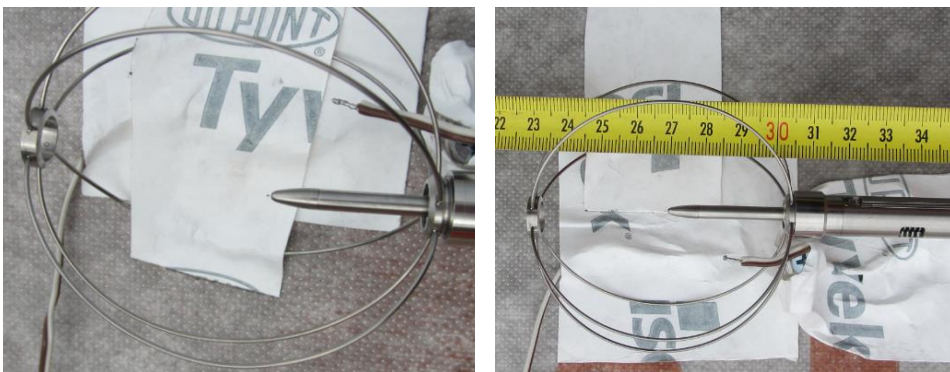


5.2. MÅLEUTSTYR I LUFTESPALTEN

I det følgende vises anemometre og termoelement, som er benyttet til å måle henholdsvis lufthastighet og temperaturer i luftespalten i ZEB Test Cell.



Figur 1. Oppbygning av møne, før montering av taktro. Foto: Lars Gullbrekken.



Figur 2. Figuren viser et anemometer, sentrisk plassert i luftespalten. Foto: Lars Gullbrekken.



Figur 3. Figuren viser et anemometer i luftespalten, etter montering av taktro. Foto: Lars Gullbrekken.



Figur 4. Kobling av sensorer til logger (venstre) og KIMO C310. Foto: Lars Gullbrekken.

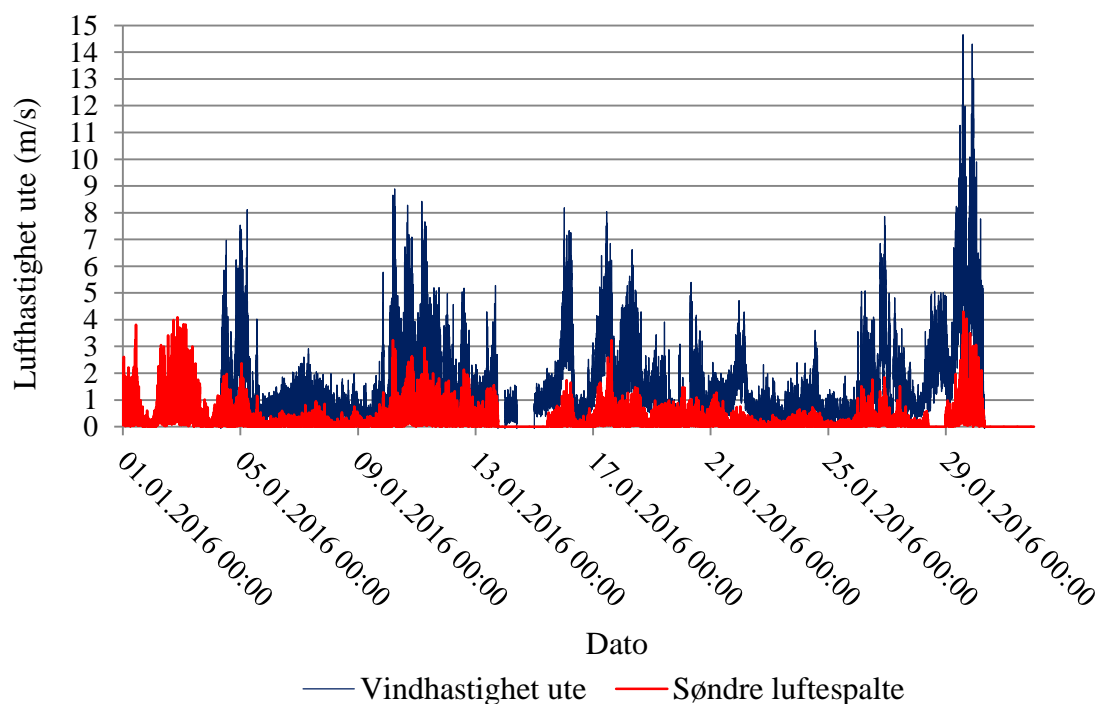
5.3. FELTDATA FRA JANUAR

Gjennomsnittlig lufthastighet i luftespalten, målt 500 mm opp fra raftet, i luftespalten mot sør, var for perioden $0,32 \text{ m/s} \pm 0,006 \text{ m/s}$. Det må bemerkes at usikkerheten blir særdeles lav, grunnet måleseriens størrelse, tilsvarende 44 640 minutter. Gjennomsnittlig vindhastighet ute var for samme periode $1,5 \text{ m/s} \pm 0,02 \text{ m/s}$, slik vist i tabell 1.

Tabell 1. Midlet lufthastighet for januar for ulike posisjoner i taket

Plassering	Midlere lufthastighet	Usikkerhet
Sør - topp	0,30 m/s	$\pm 0,005 \text{ m/s}$
Sør - bunn	0,32 m/s	$\pm 0,006 \text{ m/s}$
Nord - topp	0,34 m/s	$\pm 0,005 \text{ m/s}$
Nord - bunn	0,38 m/s	$\pm 0,006 \text{ m/s}$
Vindhastighet ute	1,50 m/s	$\pm 0,020 \text{ m/s}$

Slik det fremgår av figur 5, mangler måleserien data. Vindhastighet ute ble ikke logget før 4 januar, slik det fremgår av figuren. Midtveis i perioden, 13 – 15 januar, mangler data både for vindhastighet ute og lufthastighet i luftespalten. Videre er hverken lufthastighet i luftespalten eller vindhastighet ute målt i perioden 30 – 31 januar. Det bemerkes at vindhastighet ute er hentet fra klimastasjonen ved ZEB Living Lab, som er plassert 250 m lengre nord. Dataen fra Living Lab er ikke høydekorrigert i fremstillingen.



Figur 5. Vindhastighet ute og lufthastighet i søndre luftespalte. Figuren viser målinger i luftespalten, som er målt 500 mm opp fra raftekassen, i luftespalten mot sør.