

Lufting av skrå tretak

Trykktap ved ulike luftespalteutforminger

Martin Grimstad Eggen

Olaf Vemmestad Røer

Master i Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2018

Hovedveileder: Tore Kvande, IBM

Medveileder: Lars Gullbrekken, SINTEF Byggforsk

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg- og miljøteknikk



NORGES TEKNISK-
NATURVITENSKAPELIGE UNIVERSITET
INSTITUTT FOR BYGG, ANLEGG OG TRANSPORT

Oppgavens tittel: Lufting av skrå tretak Trykktap ved ulike luftespalteutforminger	Dato: 11.06.2018 Antall sider (inkl. bilag): 109	Masteroppgave	X	Prosjektoppgave
Navn: Stud.techn. Olaf Vemmestad Røer Martin Grimstad Eggen				
Faglærer/veileder: Tore Kvande				
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere: Lars Gullbrekken				

Hovedmålet med rapporten er å avklare hvordan utforming av luftespalten under taktekingen påvirker luftstrømmen i spalten. Arbeidet omfatter laboratorieforsøk utført på en fysisk modell utviklet i laboratoriet til NTNU og SINTEF Byggforsk. Laboratiemodellen er bygget for å måle motstandene (trykktap) i luftstrømmen gjennom et luftet hulrom under taktekingen.

Ved hjelp av laboratiemodellen er det gjort forsøk på to ulike utforminger av steinleker (rettkantet og justert) under to ulike taktekinger (takstein- og trapesplate). Det er i tillegg sammenlignet to ulike raftutforminger, samt tre fluenett.

Laboratiemodellen er modifisert med et vindu på siden for å kunne filme røykforsøk. Hensikten med disse forsøkene er at røyken skal framheve luftens bevegelser rundt en steinlekt under taktekingen. Videoer av samtlige røykforsøk kan finnes på Youtube under kanalen *Luftede skrå tretak 2018*.

Hovedkonklusjonen er at justerte leker gir en betydelig reduksjon i støttapet over steinlektene. Konklusjonen blir støttet av røykforsøkene som viser langt mer turbulent strømming over de rettkantete steinlektene.

Stikkord:

1. Luftespalte	 	 
2. Støttapskoeffisient		
3. Takteking		
4. Røykforsøk		
5. Steinlekt		

Forord

Denne masteroppgaven er utarbeidet ved Institutt for bygg og miljøteknikk ved Norges Teknisk-naturvitenskaplige universitet våren 2018 og omfanget er på 30 studiepoeng. Rapporten er skrevet for å øke kunnskapen og forståelsen rundt lufting av skrå tretak.

Arbeidet med masteroppgaven har vært spennende og ikke minst utfordrende. Vi har fått arbeidet mye i laboratoriene til SINTEF/NTNU, og bidratt til å videreutvikle laboratoriemodellen vi har jobbet med. Vi har begge vokst, og lært utrolig mye av å jobbe med kunnskapsrike og engasjerte mennesker.

Vi vil gjerne rette en stor takk til vår svært kunnskapsrike og engasjerte veileder Lars Gullbrekken for viktig veiledning gjennom høsten og våren. Vi vil også rette en stor takk til Tore Kvande som bisto med essensiell veiledning i slutfasen av rapporten. Dere har begge vært verdifulle i diskusjoner og bidratt med verdifull input, veiledning og engasjement. Interessen dere har vist for arbeidet vi har gjort har motivert oss gjennom utarbeidelsen av rapporten.

En stor takk rettes også til Ole Aunrønning som har vært en betydningsfull støttespiller for arbeidene i SINTEFS laboratorier.

Til slutt vil vi takke Sivert Uvsløkk for ideen om å kjøre røykforsøk til rapporten.

Sammendrag

Denne rapporten bygger videre på en masteroppgave utført av Espen Hansen våren 2016, med tittelen *Luftstrømning i skrå tretak*. Espens oppgave tar blant annet for seg trykktap i tilknytning til raftekasser, valg av steinlekter, sløyfehøyder og numeriske beregninger i dataprogrammet COMSOL.

Byggforskserien har til hensikt å komme med veiledninger og retningslinjer for hvordan konstruere bygg i henhold til teknisk forskrift. Kvalitetsnormen inneholder ikke anbefalinger eller retningslinjer for luftede tretak ved takflater lengre enn 15 m (fra raft til møne) eller takvinkler under 18°. Luftede tretak som skal oppføres med slike dimensjoner må i dag detaljprosjekteres for hvert enkelt prosjekt. Dette er både tidkrevende og kostbart. Nye retningslinjer og anbefalinger må derfor utarbeides.

Hovedmålet med rapporten er å avklare hvordan utforming av luftespalten under taktekkningen påvirker luftstrømmen i spalten. Arbeidet omfatter laboratorieforsøk utført på en fysisk modell utviklet i laboratoriet til NTNU og SINTEF Byggforsk. Laboratiemodellen er bygget for å måle motstandene (trykktap) i luftstrømmen gjennom et luftet hulrom under taktekkningen.

Ved hjelp av laboratiemodellen er det gjort forsøk på to ulike utforminger av steinlekter (rettkantet og justert) under to ulike taktekkninger (taksteinetterligning og trapesplate). Det er også sammenlignet to ulike rafteutforminger, samt tre fluenett. Til sammen er det utført 84 forsøk med forskjellige variabler, hvor 48 av dem er tilknyttet takplater og lekter. Samtlige forsøk er utført med fire forskjellige lufthastigheter (0,2 - 0,8 m/s).

Laboratiemodellen er modifisert med et vindu på siden for å kunne filme røykforsøk. Hensikten med disse forsøkene er at røyken skal framheve luftens bevegelser rundt en steinlekt under taktekkningen. Målet med dette er å få økt forståelse av strømningsbildet over en lekt i luftespalten under taktekkningen. Det er gjort røykforsøk for alle de 48 variablene tilknyttet takplater og lekter. Alle videoene, i tillegg til en illustrasjonsvideo, er å finne på Youtube under kanalen *Luftede skrå tretak 2018*.

Sammenligningen av de to lekteutformingene viser at den justerte utformingen gir en gjennomsnittlig reduksjon av støttapet over lekten på 30%. På bakgrunn av dette er det anbefalt å benytte justerte lekter som steinlekter uansett taktekkning. Resultatene blir støttet av røykforsøkene som viser langt mer turbulent strømming over de rettkantete steinlektene.

Forsøkene med raftekasser viser at mindre spalteåpning ved kassens innløp gir lavere støttap. Det kommer også frem at et kontinuerlig spaltetverrsnitt gjennom kassen er å foretrekke for å redusere trykktapet. Testing av fluenettene viser ingen sammenheng mellom nettens åpningsgrad og trykktap. Derimot ble det observert en sammenheng mellom nettens skjørhet og trykktapet som oppsto.

Abstract

This report represents a continuation of a master thesis conducted by Espen Hansen through the spring of 2016, entitled *Air flow in a sloped wooden ceiling*. Espen's thesis investigates pressure loss in connection to the eaves, the selection of tile battens, counter heights and numerical computations done in COMSOL.

Byggforskserien (The SINTEF Building Design Guides) intends to provide guidelines and recommendations on how to construct buildings according to the Norwegian building regulations. This database does not contain any recommendations or guidelines for the air cavity on roof span larger than 15 m (from eave to ridge) or with a roof pitch below 18°. The pitched wooden roofs to be listed with such dimensions must be planned in detail for each individual project. This is both time consuming and costly. Therefore, a new set of guidelines and recommendations should be proposed.

The main scope of the thesis is to clarify how the design of the air column below the roofing affects the airflow through the air cavity. The work involves laboratory experiments conducted on a physical model developed in the laboratory of NTNU and SINTEF Byggforsk. The laboratory model is built to measure the resistance (pressure loss) of an airflow through the air cavity under the roofing.

Using the laboratory model, two different designs of the tile batten have been attempted (sharp-edged and round-edged) under two different roofing's (roof tile imitation and trapeze plate). A comparison of two different eaves design's, as well as three types of fly net. Altogether, 84 experiments have been made with different variables, of which 48 of them are in correlation with the different roofing and tile battens. All test procedures are performed at four different air speeds (0.2 - 0.8 m/s).

The laboratory model were modified with a small window with corresponding lighting to perform smoke experiments. The purpose of these experiments is that the smoke will illustrate the movement of the air around a tile batten between the underlayer roof and roofing. This is to gain an increased understanding of the air flow around a tile batten inside the air cavity of the roof. In total, 48 films were made of the smoke experiments in correlation with the two roofing's and two tile battens, in total 48 variables. All videos, in addition to an illustration video can be found on YouTube under the channel *Luftede skrå tretak 2018*.

The comparison of the two tile battens show that the round-edged batten provides an average reduction of the local loss coefficient of approximately 30%. In correspondence to this, it would be advised to use round-edged battens as tile battens regardless of roofing. The results are supported by the smoke experiments that show far more turbulent flow over the sharp-edged compared to round-edged batten.

The different eaves are showing that smaller air gaps at the eaves results in a lower local loss coefficient. It also appears that a continuous column cross-section through the eave is preferable in reducing the local loss coefficient. Testing of the fly nets shows no correlation between the fly nets effective airflow area and the corresponding pressure loss. However, a connection between the robustness of the mesh and the pressure loss that arose was observed.

Innholdsfortegnelse

Forord.....	III
Sammendrag.....	V
Abstract	VII
Ord- og begrepsforklaringer.....	XIII
1. Introduksjon	1
1.1. Bakgrunn	1
1.2. Formål og omfang	2
1.3. Avgrensning	2
2. Teori	3
2.1. Lufting av skrå tretak	3
2.2. Strømningsteori	10
2.3. Strømning i luftespalte	11
2.4. Tidligere arbeid	15
3. Prøvemetode.....	17
3.1. Laboratiemodell	17
3.2. Måleutstyr.....	24
3.3. Litteratursøk	26
4. Prøveparameter og -gjennomføring.....	27
4.1. Raftekasser og fluenett.....	29
4.2. Takplater og lekter.....	33
4.3. Røykforsøk	38
5. Resultater.....	39
5.1. Raftekasser og fluenett	40
5.2. Takplater og lekter.....	44
5.3. Røykforsøk	48
6. Diskusjon.....	55
6.1. Raftekasser og fluenett	55
6.2. Takplater og lekter.....	57
6.3. Røykforsøk	61
7. Konklusjon	65
8. Videre arbeid	67
9. Referanser.....	69
Vedlegg	71
1. Detaljtegninger	71
2. Artikkel.....	71
3. Dimensjoner fluenett	71
4. Egenlekkasje.....	71

Tabelliste

Tabell 2.1 Anbefalt sløyfehøyde [mm] avhengige av takets helning og lengde (Byggforskserien-525.102, 2012).....	5
Tabell 2.2 Eksponent α for ulike terrengetyper (Blom, 1991).....	12
Tabell 2.3 Utdrag fra masteroppgave – Espen Hansen –«Sammenligning av støttapcoeffisienter for justerte og rettkantete steinlekter 36mm (Hansen, 2016)».....	16
Tabell 3.1 Takplanets spesifikasjoner	18
Tabell 3.2 Takboksens spesifikasjoner.....	18
Tabell 4.1 Prøveparametere TRP (Spalteåpning 50 mm).....	27
Tabell 4.2 Prøveparametere Ambassador (Spalteåpning 50 mm)	27
Tabell 4.3 Prøveparametere raftekasseutforminger.....	28
Tabell 4.4 Prøveparametere fluenett	28
Tabell 5.1 Beskrivelse av brukte fluenett gitt med tråddiameter og maskestørrelse samt åpningsgrad	43
Tabell 5.2 Reduksjon av støttap med justert kontra rettkantet lekt	46
Tabell 6.1 Areal over steinlekter, takplater	57

Figurliste

Figur 1.1 Et ventilert skrått tretak med spalteåpning ytterst i raftet. Figuren vises med snø på taket, som kan redusere luftstrømmen gjennom øvre luftespalte. Løsningen er utført som kombinert vindspærre og undertak	2
Figur 2.1 Skrått tretak hvor hele takplanet er isolert	3
Figur 2.2 Skrått tretak med isolasjon i deler av taket	3
Figur 2.3 Skrått tretak med kalde loft.....	3
Figur 2.4 Prinsippskisse av tottrinnetting av fasade med ventilert og drenert luftspalte (Byggforskserien-524.003, 2013).....	4
Figur 2.5 Isolert skrått tretak med kombinert undertak og vindspærre (Byggforskserien-525.102, 2012)	5
Figur 2.6 Isolert skrått tretak med lufting mellom vindspærre og undertak (Byggforskserien-525.101, 2007).....	5
Figur 2.7 Prosessforårsakende bygningskader (Byggforskserien-700.110, 2010)	6
Figur 2.8 Prosessforårsakede skader i tilknytning til tak (Byggforskserien-700.110, 2010)	6
Figur 2.9 Vanlige oppfukningsmekanismer i bygninger (Byggforskserien-421.132, 2005).....	6
Figur 2.10 Vanlige feil og skader i isolerte skrå tretak (Byggforskserien-700.110, 2010)	7
Figur 2.11 Utett dampspærre i overgangen mellom en drager og himling (Edwardsen and Ramstad, 2014).....	8
Figur 2.12 Isdannelser ved takfoten kan demme opp vann slik at lekkasjer oppstår (Edwardsen and Ramstad, 2014).....	9
Figur 2.13 Trykktap når det er en kraftig reduksjon i tverrsnittet for luftstrømmen	14
Figur 2.14 Trykktap når det er en kraftig økning i tverrsnittet for luftstrømmen.....	14
Figur 2.15 Ny nippelplassering P1 og gammel nippelplassering P2	16
Figur 3.1 Laboratoriemodellen med takplan (skrått plan).....	17
Figur 3.2 Sparklet skruerhull	17
Figur 3.3 Takboks 1 målsatt snitt	18
Figur 3.4 Takboks 2 uten steinlekker	19
Figur 3.5 Takboks 2 med steinlekker	19
Figur 3.6 Takboks 1 (v) og 2 (h) med takplater	19
Figur 3.7 Mønekassens oppbygning.....	20
Figur 3.8 Mønekassen sett fra siden.....	20
Figur 3.9 Raftekassens oppbygning	21
Figur 3.10 Raftekassen sett fra siden.....	21
Figur 3.11 Komplette modell med forklaring	22
Figur 3.12 Lexan over LED pære i takplanet	23
Figur 3.13 LED pære og reflektor under lexan	23
Figur 3.14 Sparklet overgang mellom lexan og Takboks 2 (Hull til røyk i vinduet)	23
Figur 3.15 Sparklet overgang mellom lexan og Takboks 2.....	23
Figur 3.16: Vinduet sett fra utsiden med lys på.....	23
Figur 3.17 Mikromanometer montert på ramme	24
Figur 3.18 Måleblende	25
Figur 4.1 Raftekasse 1	29
Figur 4.2 Illustrasjon av raft med kombinert vindspærre og undertak (Byggforskserien-525.102, 2012)	29
Figur 4.3 Raftekasse 2	30
Figur 4.4 Illustrasjon av raft med luftespalte i overkant av takrennen (Byggforskserien-525.102, 2012)	30
Figur 4.5 Overgang raftekasse mot Takboks 1	30
Figur 4.6 Raftekasse 0 med åpen utforming.....	31
Figur 4.7 Nett 1 montert over spalteåpningen i raftekassen	31
Figur 4.8 Nett 2 montert over spalteåpningen i raftekassen	32
Figur 4.9 Nett 3 montert over spalteåpningen i raftekassen	32
Figur 4.10 Nett 1 Biltema (Biltema, 2018).....	33
Figur 4.11 Nett 2 TJB Aluminium (Byggmakker, 2018)	33
Figur 4.12 Nett 3 Gebe (Krigsvoll, 2018)	33

Figur 4.13 Nippelplassering	34
Figur 4.14 Sammenligning justert og rett steinlekt	34
Figur 4.15 Overgang TRP-plate mot mønekaske	35
Figur 4.16 Tverrsnitt Takboks 2 med TRP- plate. Målsatt.....	35
Figur 4.17 Ambassador steinlektplassering (ARMAT, 2018a).....	36
Figur 4.18 Monteringsanvisning Ambassador (ARMAT, 2018a).....	36
Figur 4.19 Utført Takboks 2 med Ambassador-takplate. Målsatt	36
Figur 4.20 Teipet overgang Ambassador mot mønekaske.....	37
Figur 4.21 Teipet overgang takplate (Ambassador) mot Takboks 2	37
Figur 4.22 Kameraoppsett for filming av røykforsøk	38
Figur 5.1 Støttapskoeffisient ξ (-) for Raftekasse 1 som en funksjon av dynamisk trykk. For spalteåpning 50 og 30 mm.....	40
Figur 5.2 Figuren til venstre viser Raftekasse 1 bygget av Espen Hansen og tilpasset av oss, og figuren til høyre viser en tradisjonell raftekasse fra Byggforsk som har vært førende for vår rafteløsning.	40
Figur 5.3 Støttapskoeffisient ξ (-) for Raftekasse 2 som en funksjon av dynamisk trykk. Første tall beskriver spalteåpningen i raftkassens underside, andre tall beskriver åpningsbredden bak takrennen	41
Figur 5.4 Figuren til venstre viser Raftekasse 2 bygget av Espen Hansen og tilpasset av oss, og figuren til høyre viser en raftekasse hvor spalteåpningen er plassert bak takrennen, hentet fra Byggforsk.	41
Figur 5.5 Figuren illustrerer de ulike åpningsbreddene bak den teoretiske takrennen, og spalteåpningen på undersiden av raftekassen	42
Figur 5.6 Støttapskoeffisient ξ (-) for tre fluenett gitt som en funksjon av dynamisk trykk.	43
Figur 5.7 Støttapskoeffisient ξ (-) for TRP målt ved laveste tverrsnitthøyde, gitt som en funksjon av dynamisk trykk.....	45
Figur 5.8 Tverrsnitt TRP - Grønn prikk representerer toppmåling, rød prikk bunnmåling.....	45
Figur 5.9 Støttapskoeffisient ξ (-) for TRP målt ved høyeste tverrsnitthøyde, gitt som en funksjon av dynamisk trykk.....	45
Figur 5.10 Støttapskoeffisient ξ (-) for Ambassador målt ved laveste tverrsnitthøyde, gitt som en funksjon av dynamisk trykk.	47
Figur 5.11 Tverrsnitt av Ambassador - Grønn prikk representerer toppmåling, rød prikk bunnmåling	47
Figur 5.12 Støttapskoeffisient ξ (-) for Ambassador målt ved høyeste tverrsnitthøyde, gitt som en funksjon av dynamisk trykk.	47
Figur 5.13 Justert 36 x 48 mm, 23 mm sløyfehøyde, 0,2 m/s	49
Figur 5.14 Rettkantet 36 x 48 mm, 23 mm sløyfehøyde, 0,2 m/s (28s)	49
Figur 5.15 Justert 36 x 48 mm, 36 mm sløyfehøyde, 0,2 m/s	50
Figur 5.16 Rettkantet 36 x 48 mm, 36 mm sløyfehøyde, 0,2 m/s	50
Figur 5.17 Justert 36 x 48 mm, 48 mm sløyfehøyde, 0,2 m/s	51
Figur 5.18 Rettkantet 36 x 48 mm, 48 mm sløyfehøyde, 0,2 m/s	51
Figur 5.19 Justert 36 x 48 mm, 23 mm sløyfehøyde, 0,2 m/s	52
Figur 5.20 Rettkantet 36 x 48 mm, 23 mm sløyfehøyde, 0,2 m/s	52
Figur 5.21 Justert 36 x 48 mm, 36 mm sløyfehøyde, 0,2 m/s	53
Figur 5.22 Rettkantet 36 x 48 mm, 36 mm sløyfehøyde, 0,2 m/s	53
Figur 5.23 Justert 36 x 48 mm, 48 mm sløyfehøyde, 0,2 m/s	54
Figur 5.24 Rettkantet 36 x 48 mm, 48 mm sløyfehøyde, 0,2 m/s	54
Figur 6.1 Teoretisk luftstrøm gjennom spalteåpning på 30 mm, inn bak takrennen, med åpningsbredde på 48 mm. Tverrsnittsendringen fører til turbulente luftstrømninger.....	55
Figur 6.2 Takstein som skjøtes over steinlekter Figur: Olaf Røer.....	57
Figur 6.3 Monteringsanvisning TRP (ARMAT, 2018a)	59
Figur 6.4 TRP – Justert lekt med sløyfehøyde 48 mm og lufthastighet på 0,2 m/s.....	62
Figur 6.5 TRP – Rettkantet lekt med sløyfehøyde 48 mm og lufthastighet på 0,2 m/s.....	62
Figur 6.6 Ambassador – Rettkantet lekt med sløyfehøyde 48 mm og lufthastighet på 0,2 m/s	62
Figur 6.7 Ambassador – Justert lekt med sløyfehøyde 23 mm og lufthastighet på 0,2 m/s (utklippet ved 3 sek)	63
Figur 6.8 Ambassador – Rettkantet lekt med sløyfehøyde 23 mm og lufthastighet på 0,2 m/s (utklippet ved 23 sek)	63
Figur 6.9 LED-pære emballasje front.....	64
Figur 6.10 LED-pære emballasje bak.....	64

Ord- og begrepsforklaringer

Begrep/ord	Forklaring
Støttap	Trykktapet som oppstår når strømmende luft treffer en motstand (for eksempel en steinlekt)
Taktekking	Øverste lag på taket. Skal beskytte resten av konstruksjonen mot klimatiske påvirkninger.
Raft	Takutstikket i overgangen mellom yttervegg og tak
Raftekasse 0	Helt åpen løsning benyttet til testing av fluenett og steinlekter
Raftekasse 1	Klassisk løsning - kombinert undertak og vindsperre, åpen raftekasse
Raftekasse 2	Moderne løsning - det kombinerte undertaket og vindsperran føres rundt hele raftekassens indre, lukket raftekasse
Møne	Vinkelpunktet i øvre del av takflaten
TRP	Trapesprofilert takplate i stål
Ambassador	Takplate i stål utført som en etterligning av tradisjonell takstein
Steinlekt	Trelekt hvor takplatene (vanligvis takstein) blir innfestet
Sløyfehøyde	Høyden mellom steinlekten og overkant undertak
Spalteåpning	Åpningen i raftekassens underside
Luftespalte	Spalten mellom taktekking og undertak som er ventilert av vind og termisk oppdrift
Fluenett	Nett for å hindre insekter og mindre dyr å passere spalteåpningen i raftet
By-pass-system	Åpne/lukke løsning i laboratoriemodellen for å variere lufthastigheten i høyere grad enn ved frekvensomformerer

1. Introduksjon

1.1. Bakgrunn

Klimautfordringer i Norge

Norge er et land med ekstrem natur og et varierende klima. Den lange kystlinjen gir svært lokale klimasoner og bidrar til å øke de lokale sesongavhengige værpåkjeningene (Gullbrekken, 2018). Dette i tillegg til menneskeskapte klimaendringer gir økt værbelastningen i form av økt nedbør, kraftigere vind og større temperaturforskjeller (Hanssen-Bauer et al., 2015). Dette innebærer at dagens bygninger må konstrueres for å tåle de økte værpåkjeningene.

For å håndtere den økende værpåkjeningen vil klimatilpasningen av bygg være en viktig oppgave. Ved gjennomgang av byggskadearkivet viser det seg at 66% av alle prosessforårsakede bygningsskader i Norge stammer fra bygningens klimaskjerm (Lisø et al., 2005).

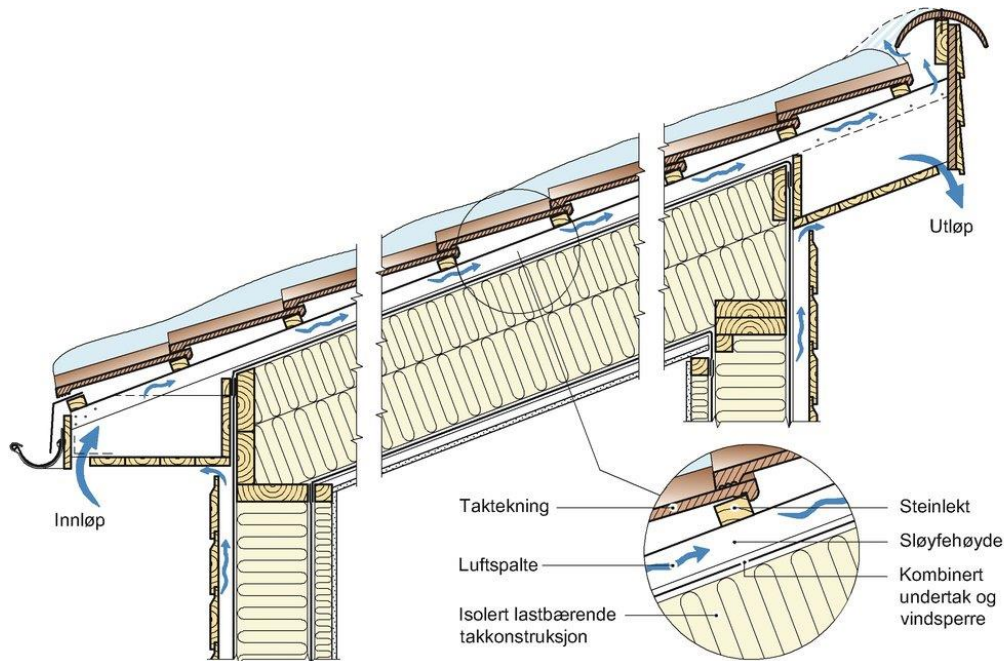
Klimautfordringene er bakgrunnen for forskingsprosjektet SFI Klima 2050. Målet er å utvikle løsninger som vil gjøre morgendagens bygninger mer fuktbestandige og dermed i stand til å takle klimaendringene i årene som kommer. Det er også et mål å bygge mer miljøvennlig. Klima 2050 vil fokusere på å redusere samfunnsrisikoen forbundet med klimaendringer på det bygde miljø, og hvordan takle den økte nedbøren og ekstremværet i tiden som kommer (Time, 2014).

Trehus

I Norge beskriver (Edvardsen and Ramstad, 2014) at over 98% av alle småhus har bæresystem av tre. Norge har lange tradisjoner med trekonstruksjoner grunnet den svært gode tilgangen. Det har derfor blitt gjennomført mange studier på levedyktigheten til treverk. Studiene har påvist at treverk har økt sjanse for nedbrytning hvis klima skulle bli både varmere og fuktigere (Robert Lisø et al., 2006). Bygningsskader i tilknytning til tak står for over en femtedel av de prosessforårsakede bygningsskadene. Av disse er det opptil 75% av skadene grunnet tilførslen av fuktighet både i form av nedbør og innendørs fuktighet. Samt i tilknytning til luftingen av taktekkningen og dårlig isolert takkonstruksjon (Gullbrekken et al., 2016).

Lufting av skrå tretak

Hensikten med luftingen av skrå tretak er todelt. Ved å luften taktekkningen tilstrekkelig hindrer man snøsmelting og isdannelse. I tillegg vil tilstrekkelig lufting fjerne fuktig luft og byggfukt som kommer gjennom lekkasjer eller ved kondens.



Figur 1.1 Et ventilert skrått tretak med spalteåpning ytterst i raftet. Figuren vises med snø på taket, som kan redusere luftstrømmen gjennom øvre luftspalte. Løsningen er utført som kombinert vindsperre og undertak

Gjeldende retningslinjer for utforming av lufting av skrå tretak er gitt i anvisning Byggforskserien-525.101 (2007) og Byggforskserien-525.102 (2012), men disse er begrenset til mindre takflater (taklengde opp til 15 m) og takvinkler større 18°. I dag er retningslinjer for tak som går ut over disse begrensningene etterspurt, [Gullbrekken \(2018\)](#) publiserte i 2018 forslag til nye retningslinjer. Målet er at tak som går ut over Byggforskseriens dokumenterte løsninger unngår å måtte prosjekteres spesielt for hvert enkelt prosjekt.

1.2. Formål og omfang

Hovedmålet med denne masteroppgaven er å avklare hvordan utforming av luftespalten under taktekingen påvirker luftstrømmen i spalten. Kunnskapen skal gi grunnlag for utvikling av nye retningslinjer for lange skrå luftede tretak med lav takvinkel.

Arbeidet har omfattet laboratorieforsøk utført på en fysisk modell utviklet i laboratoriet til NTNU og SINTEF Byggforsk. Laboratiemodellen er bygget for å måle motstandene (trykktp) i luftstrømmen gjennom et luftet hulrom under taktekingen. Modellen er benyttet til å måle motstanden i luftinntaket (raftekassen) og i selve luftespalten. Følgende løsninger er studert:

- 1) Ulik lekteutforming ved ulike sløyfehøyder under to typer takteking
- 2) To ulike raftekasser
- 3) Tre ulike fluenett i raft

1.3. Avgrensning

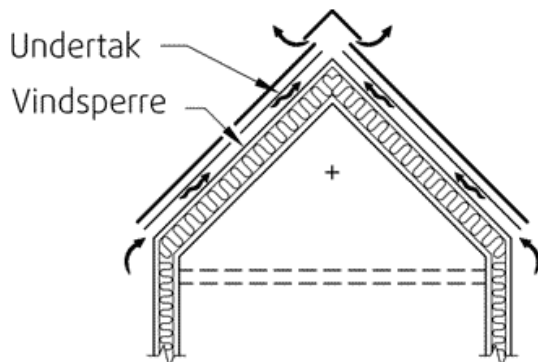
Rapporten tar ikke for seg flate eller kompakte tak, tak med kalde loft eller tak utført med andre konstruksjonsmaterialer enn treverk. Brann- og varmeisolasjonstekniske aspekter ved tak er heller ikke omhandlet. Fukktransport er behandlet i teorikapitlet for å etablere en utvidet bygningsfysisk forståelse av taket, men fuktmålinger har ikke vært en del av laboratorieforskene. Møneløsningen som var bygget til modellen ble benyttet slik den var, uten at det ble gjort studier i tilknytning til denne.

2. Teori

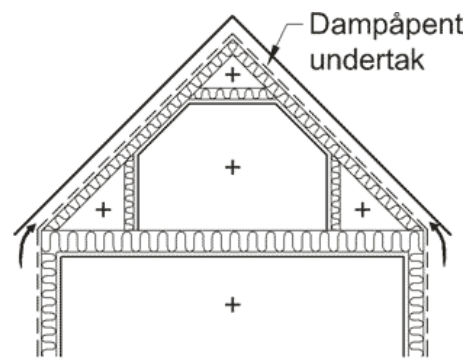
2.1. Lufting av skrå tretak

2.1.1. Oppbygging av tak

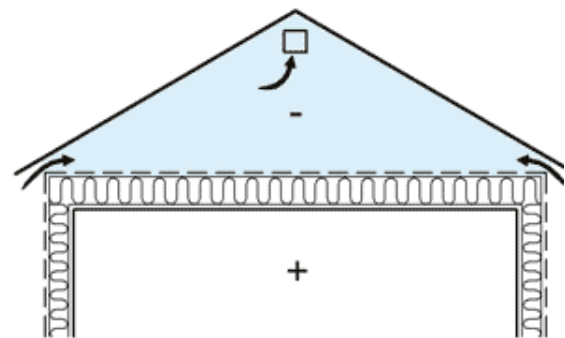
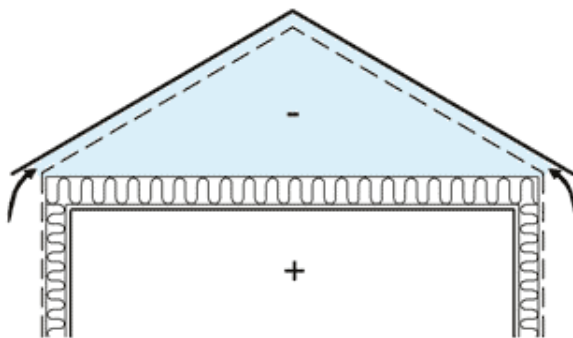
For oppføring av nye bygninger anbefales det å følge veiledende krav gitt av SINTEF Byggforsk. Kravene i Norge vil variere etter hvor bygget skal stå, og spesielle hensyn må dermed vurderes i tidligfase. Videre bestemmes bygningskroppens utforming etter hvilken funksjon bygningen skal ha. Innenfor skrå tretak finnes det tre utpregede varianter; skrå tretak hvor hele takplanet er isolert, skrå tretak som har isolasjon i deler av taket og skrå tretak med kaldt loft (Hansen, 2015).



Figur 2.1 Skrått tretak hvor hele takplanet er isolert



Figur 2.2 Skrått tretak med isolasjon i deler av taket

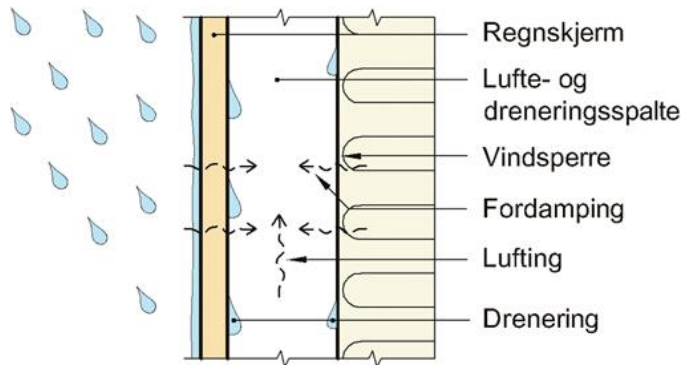


Figur 2.3 Skrått tretak med kalde loft

Rapporten omhandler skrå, isolerte tak med isolasjon i hele takplanet, hvor luftingen skal utføres som en kanal fra raft til møne. Figur 2.1 representerer prinsippet til taket brukt i denne rapporten.

Totrinnstetting

Totrinnstetting går ut på å separere regntettingen og vindtettingen i to sjikt med et ventilert og drenert hulrom. Figur 2.4 viser totrinnstetting på en luftet kledning.



Figur 2.4 Prinsippkisse av totrinnstetting av fasade med ventilert og drenert luftspalte
(Byggforskserien-524.003, 2013)

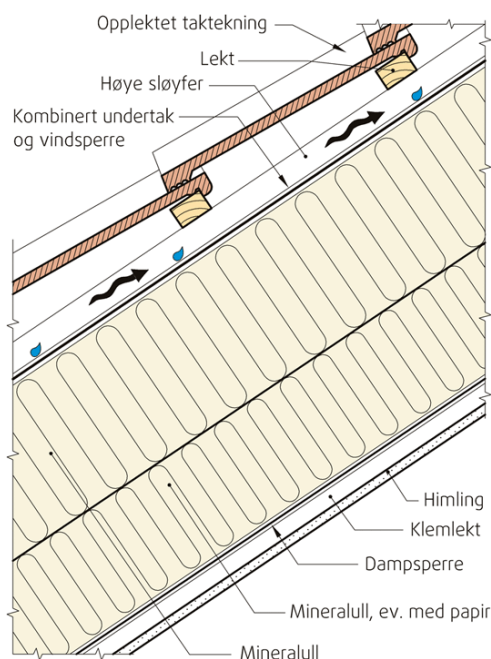
Nevander and Elmarsson (1994) beskriver prinsippet bak totrinnstetting, og hva som er gode retningslinjer for å oppnå tilfredsstillende utførelse. Det er viktig å ha nok åpninger i tekkingen slik at trykktapet over ventilasjonskanalen minimeres. Vandrdåper på vindsperren vil kunne oppstå, men dette utgjør så lite væske at det kan renne på vindsperren uten at det oppstår problemer. Totrinnstetting er den første og viktigste barrieren for å oppnå god fuktsikring. Det bør derfor stilles strenge krav til at utførelsen er gjort etter veiledningen til Byggforsk.

2.1.2. Lufting av takkonstruksjoner

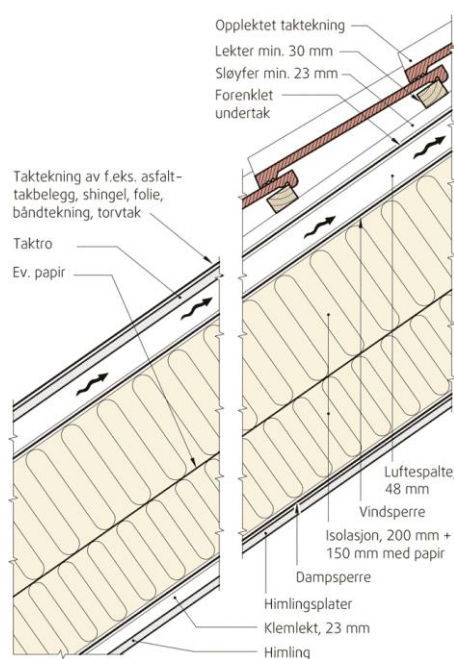
Tak deles inn i to forskjellige hovedtyper, varme- og kalde tak, hvor forskjellen ligger i plasseringen av nedløp for vann og hvorvidt takene er luftet. Varme tak, også bedre kjent som kompakte tak er mye brukt til flate tak eller tak med liten vinkel, og skal ikke omtales i denne rapporten. Kalde tak har utvendig avløpssystem og trenger dermed lufting under taktekkingen, for å hindre oppbygning av is og eventuelt smeltevann (som vist i Figur 2.12). Kalde tak kan enten konstrueres med isolasjonen mellom taksperrene, eller isoleres på gulvplanet i loftsrommet (Hofseth, 2003).

Utformingen og størrelsen på luftespalten i takkonstruksjoner skal varieres i henhold til de kravene som stilles der bygningen oppføres. I kalde og tempererte klimaer, som Norden, er lufting av loft eller tak nødvendig. Derfor er det viktig at man tar hensyn til luftespaltens utforming for å motvirke uønsket oppfuktning av konstruksjoner (Blom, 2001).

Det er to hovedprinsipper for utførelsen av luftespalten i et skrått tretak med isolasjon i takplanet. Den ene utformingen har kombinert undertak og vindsperre, hvor den andre har lufting mellom vindsperre og undertaket. Figur 2.5 og Figur 2.6 viser oppbygningen av de to løsningene. Rapporten fokuserer kun på løsningen gitt i Figur 2.5 hvor all lufting av taket befinner seg direkte under opplektningen av tekkingen.



Figur 2.5 Isolert skrått tretak med kombinert undertak og vindsperre (Byggforskserien-525.102, 2012)



Figur 2.6 Isolert skrått tretak med lufting mellom vindsperre og undertak (Byggforskserien-525.101, 2007)

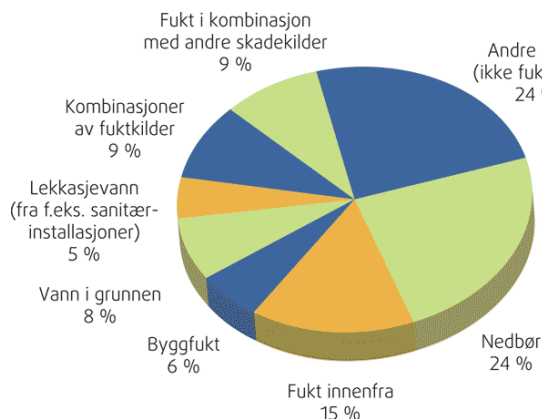
Det er viktig at undertaket er lufttett og tilstrekkelig dampåpent. Byggforskserien anbefaler sløyfedyder og steinlektedimensjoner avhengige av takets helning. Tabell 2.1 gir et utdrag fra Byggforskserien-525.102 (2012).

Tabell 2.1 Anbefalt sløyfedyde [mm] avhengige av takets helning og lengde (Byggforskserien-525.102, 2012)

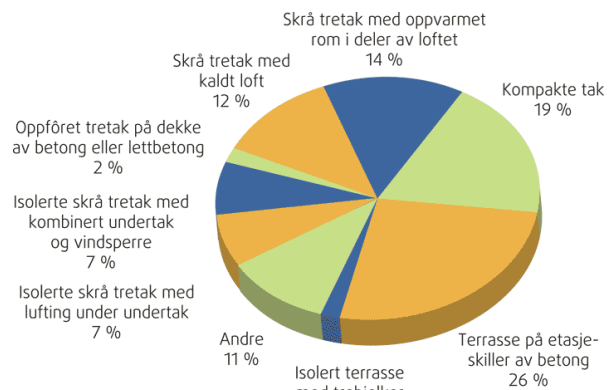
Takvinkel [°]	Taklengde [m]			Ingen anvisning
	7,5	10	15	
18 – 30 °	36	36 + 36	48 + 48	-
31 – 40 °	30	36	36 + 23	-
≥ 41 °	23	36	36 + 23	-

2.1.3. Skadeomfang

Byggforskserien-700.110 (2010) viser til at de årlige prosessforårsakede byggskadene i Norge ligger på rundt 4% av de årlige investeringskostnadene ved nybygging. Det vil si skader som skyldes at en aktør ikke har fulgt standardisert og anerkjent metode eller konkrete spesifikasjoner. For bygninger er ca. 66% av alle skadene knyttet til klimaskallet. Det vil si tak, terrasser, yttervegg over terreng samt konstruksjoner mot terreng (Byggforskserien-700.110, 2010). Endringer i klima og økt nedbør vil kreve strengere krav til tetthet i klimaskallet. Nedbør alene er anslått til å stå for 24% av skadene. Dette er ofte i tilknytning til vind (slagregn, snøinndrev, ol.). Figur 2.7 viser fordelingen av prosessforårsakede byggeskader i perioden 1993-2002.



Figur 2.7 Prosessforårsakende bygningskader (Byggforskserien-700.110, 2010)

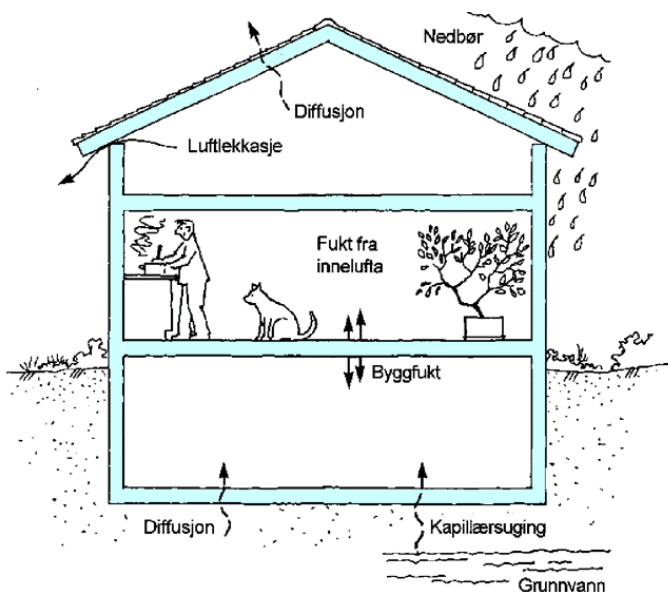


Figur 2.8 Prosessforårsakede skader i tilknytning til tak (Byggforskserien-700.110, 2010)

Skrå tretak er generelt sårbare ovenfor skader relatert til nedbør, vannlekkasjer og kondens. I Figur 2.8 vises det til at isolerte skrå tretak med kombinert undertak og vindspærre står for 7% av de prosessforårsakede byggeskadene for tak. Totalt sett er ca. 40% av skadene tilknyttet skrå tretak.

Fuktskader

Oppfuktning av bygningskroppen kan foregå på mange måter. Figur 2.9 viser de vanligste tilførselsmekanismene for fukt i bygninger. Fuktighet fører med seg mange ulemper og kan raskt føre til uønskede skader.



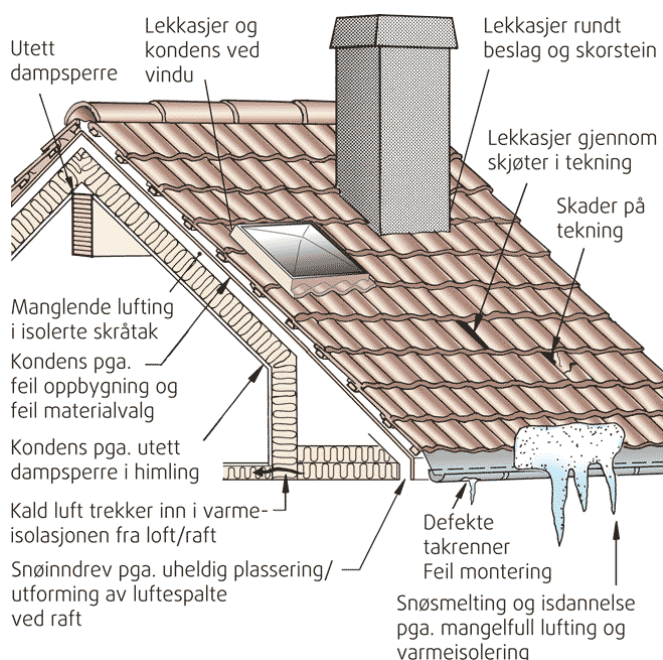
Figur 2.9 Vanlige oppfuktingsmekanismer i bygninger (Byggforskserien-421.132, 2005)

2.1.4. Skadeomfang tak

SINTEF Byggforsk trekker frem et utdrag med vanlige prosessforårsakede fuktskader i tilknytning til skrå tretak:

- Utette beslag og overgangsløsninger
- Skader på tekkingen
- Fuktventilasjon
- Snøsmelting og isdannelse
- Utett damp- og vindsperre
- Utett undertak
- Manglende lufting i isolerte skrå tretak

Følgende av disse skadene varierer i omfang og kan være alt fra kun estetiske til helsefarlige. Råte som oppstår i trevirke, biologisk oppblomstring (muggvekst) i utsatte områder, dråper og vannlekkasjer til nedenforliggende konstruksjoner, skjolddannelse på overflater på inn- og utside samt isdannelser og lekkasjer som følge av oppdemmet smeltevann er blant de vanligste skadene. Figur 2.10 illustrerer skader og feil som kan oppstå i isolerte skrå tak og tak med kaldt loft (Byggforskserien-700.100, 2010).



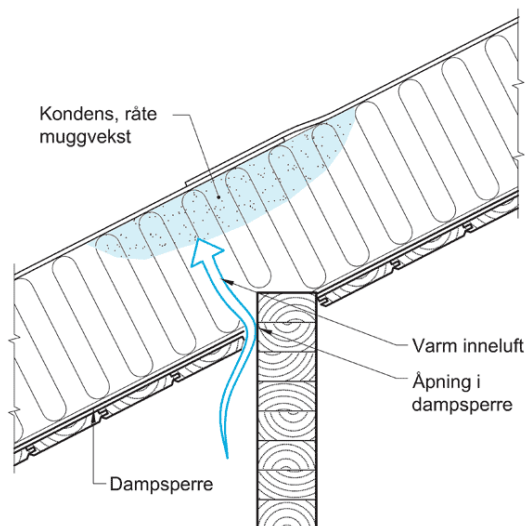
Figur 2.10 Vanlige feil og skader i isolerte skrå tretak (Byggforskserien-700.110, 2010)

2.1.5. Fuktkonveksjon

Typiske fuktproblemer i takkonstruksjoner er lekkasjer og fuktskader forårsaket av temperatur- og trykkforskjeller. Dette kan resultere i kondensering. Trykkfall fra vind, overtrykks- eller undertrykksventilasjon og skorsteinseffekten er tre eksempler hvor fukttransport fremkommer ved hjelp av konveksjon. Konveksjon blir drevet av absolutte trykkforskjeller over en konstruksjon.

Fuktkonveksjon innebærer at vanddamp transporteres med en luftstrøm fra høyt lufttrykk til lavt lufttrykk (Geving and Thue, 2002). Skorsteinseffekten oppstår når luften har ulik densitet, og dermed gir et innvendig overtrykk i takregionen når den varme luften stiger (Thue, 2016). Resultatet av dette kan være at fuktig inneluft *transporteres* til områder med lavere luftdensitet hvor luften avkjøles nok til å nå duggpunktet slik at kondens og rim utfelles. Et annet uheldig tilfelle oppstår når det dannes en lufttrykkgradient over en bygningsdel som er i direkte kontakt med uteluft. Hvis høyeste trykk da er på innsiden av konstruksjonen oppstår det overtrykksdannelser og fukttransport utover i konstruksjonen. Dette kalles overtrykksventilasjon, og skapes når det lages et overtrykk inne i bygningen i forhold til

lufttrykket ute. Figur 2.11 viser hvordan varm, fuktig inneluft strømmer inn i isolasjonen gjennom utettheter i overgang mellom dampsperran og limtrebjelken, for så å kondensere i underkant av vindsperran. Trykkfall innenfra og utover som følge av vind, forekommer over le vegg. Her kan det i korte perioder oppstå luftvirvler som suger på bygningens overflater, og kan gi kortvarig overtrykk innenfra på ekstreme 200-250 Pa (Geving and Thue, 2002). Fuktkonveksjon forekommer i spalter, hull og gjennom porøse materialer. For å hindre slike hendelser må det påseses at lufttettheten til konstruksjonen er tilstrekkelig. Skulle konveksjon likevel forekomme, og varm innvendig luft trenger gjennom konstruksjonen, må denne luften ventileres vekk over undertaket (Thue, 2016).



Figur 2.11 Utett dampsperre i overgangen mellom en drager og himling (Edvardsen and Ramstad, 2014)

2.1.6. Fuktmekanikk

Innenfor fuktmeknikken er det tre begreper som er spesielt relevante. *Fuktinnhold* refererer vanligvis til fukten i porer og hulrom, som opptas fra eller avgis til omgivelsene (oppgis i vektprosent) (Geving, 2011). *Likevektsfukt* handler om at hygroskopiske materialer alltid ønsker å være i fuktmessig likevekt med omgivelsene, dette avhenger av temperaturen og relativ fuktighet i luften rundt (oppgis i prosent opp mot den relative fuktigheten i luften) (Geving, 2011). Porøse materialer utsatt for fritt vann, for eksempel fra regn, snø og/eller kondens har en evne til å absorbere det fri vannet gjennom *kapillærsuging* (Edvardsen and Ramstad, 2014), dette avhenger av hvor fuktdiffusiviteten i materialet er.

De nevnte faktorene kan føre til skader i takkonstruksjoner og er som regel et resultat av fukttransport med luftstrømmer (Edvardsen and Ramstad, 2014).

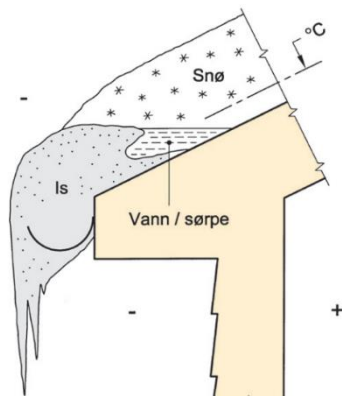
2.1.7. Snøsmelting

Snø som ligger på taket om vinteren danner et isolerende lag. Varme som transporteres gjennom takkonstruksjonen og som ikke ventileres vekk i tilstrekkelig grad kan føre til snøsmelting. Dette smeltevannet vil renne ned langs taket og kan fryse til is på de kalde, uoppvarmede områdene av taket som takutstikk og takrenner. Stadig tilførsel av smeltevann vil da føre til en økende ismengde på det utsatte området, som vil fungere som en demning for nytt smeltevann (Figur 2.12). Dette kan føre til ødelagt taktekkning, fuktskader og dannelse av mugg/råte hvis det renner ned i konstruksjonen. Isen kan dessuten lett ødelegge takrenner og nedløpsrør.

Den isolerende effekten av snø vil øke med økt snødybde. Ref. tørr, lett nysnø isolerer nesten like godt som høyverdig isolasjon (Geving and Thue, 2002). Generelt kan det beskrives tre faktorer som påvirker snøsmeltingen på taket.

- Utformingen av luftespalten
- Alderen på konstruksjonen
- Lekkasje av varm inneluft.

Det kan også oppstå tilfeller der isolasjonen i takkonstruksjonen har blitt utsatt for fukt. Dette gjør isolasjonsevnen dårligere, og gir dermed økt varmetransport gjennom takkonstruksjonen. Utetemperaturen har også stor innvirkning. Er det svært kaldt vil aldri temperaturen i sjiktet mellom taket og snøen krype over null grader celsius og snøsmelting uteblir.



Figur 2.12 Isdannelse ved takfoten kan demme opp vann slik at lekkasjer oppstår (Edwardsen and Ramstad, 2014)

2.1.8. Snøinndrev og slagregn

Snø kan oppstå i mange former, men når det er snakk om snøinndrev menes snøkrystaller som føres inn i konstruksjonen med vinden på kalde steder hvor værbelastningen er stor. Bygg plassert i høyfjellet eller på værharde områder med en del snø på vinteren er spesielt utsatt for snøinndrev. Snø kan ved hjelp av vinden føres inn i ventilasjonsåpninger i raft og møne. Når hastigheten er lav nok inne i luftespalten felles snøen ut før luften strømmes videre gjennom luftespalten i taket (Gustavsen et al., 2005). Dette kan føre til at utfelt snø blir liggende inne i taket og oppfukte isolasjon og treverk (Edwardsen and Ramstad, 2014). I spesielt utsatte områder er det nødvendig med ekstra tiltak mot snøinndrev.

Spesielt for snøinndrev er at dette ofte pakker igjen spalteåpningen i raft og reduserer lufting samtidig som det fukter opp konstruksjonene når det smelter. Slagregn på sin side opptrer litt som snø, men er ikke avhengige av minusgrader og vil heller ikke pakke igjen spalteåpningen. Disse to vil gi den samme uønskede oppfuktingen av konstruksjonen.

2.2. Strømningsteori

For å beskrive luftstrømmen gjennom luftespalten av skrå tak benyttes fluide begreper og regler. I dette kapitlet vil relevant strømningsteori bli kort forklart.

Fluider er en betegnelse for alle stoffer som ikke har en bestemt form og dermed kan strømme. Dette skjer gjennom en energitransport ved at fluidet med sin indre energi forflytter seg (Geving and Thue, 2002). Til å beskrive luftstrømningen i yttertaketets luftespalte benyttes det derfor formler og begreper fra fluidmekanikken. For at formelverket skal være gyldig er det nødvendig å forutsette laminær strømning og at fluidet er inkompressibelt. Inkompressibelt vil si at tettheten i fluidet er konstant. Gasser er ofte kompressible, men ved de trykk- og temperaturforholdene det opereres med i bygningsteknikken, gir det kun ubetydelige feil å betrakte luft og vanndamp som ideelle gasser, og dermed inkompressibelt (Geving and Thue, 2002).

For fluider i bevegelse skilles det mellom to ulike strømningstilstander. En laminær strøm vil si at ethvert punkt i strømmen har konstant fart. Dette betyr at væsken kan ha forskjellige hastigheter (før og etter en innsnevring for eksempel), men ethvert punkt i strømmen vil ha konstant fart hele tiden. Her er en forutsetning at mengden fluid er den samme både ut og inn. Den andre tilstanden kalles turbulent strøm, og i en slik strøm vil ikke farten i et vilkårlig punkt være konstant. En turbulent strøm vil ha raske variasjoner både i hastighet og retning.

For å avgjøre om en strøm er turbulent eller laminær benyttes Reynolds tall (Schetz and Fuhs, 1999). Dette er gitt ved følgende likning:

$$Re = \frac{uD_h}{\nu} \quad (1)$$

Her er:

u = Fluidets middelhastighet [m/s]

D_h = Hydraulisk diameter [m]

ν = Kinematisk viskositet [m²/s]

Viskositet forteller om hvor *seigt* ett fluid flyter. Kinematisk viskositet er definert som:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (2)$$

Der:

η = Fluidets dynamiske viskositet [Ns/m²]

ρ = Fluidets densitet [kg/m³]

Hydraulisk diameter er nødvendig for å beregne det dimensjonsløse Reynolds tallet. For et rektangulært tverrsnitt beregnes hydraulisk diameter med følgende formel (Çengel et al., 2008):

$$D_h = \frac{2ab}{a+b} \quad (3)$$

Hvor a og b er hver sin sidekant.

Det beregnede Reynolds tallet blir så benyttet for å avgjøre hva slags strøm som oppstår. Strømmen er:

Laminær for $Re < 2300$

I overgangsfasen $2300 \leq Re \leq 4000$

Turbulent for $Re \geq 4000$

Verdien der Reynolds tall går fra laminær til turbulent strøm kalles kritisk Reynolds tall. Denne verdien vil bli lavere dersom det er forstyrrelser i strømmen. Eksempler på dette kan være skarpe kanter, bender i kanalen eller synkende strømningshastighet (Kronvall, 1980). Er det ingen forstyrrelser vil kritisk Reynolds tall bli høyere.

2.3. Strømning i luftespalte

Luftbevegelsene i en luftespalte over et tak er drevet av drivkrefter og motstander. Trykk og trykktap er sentrale begreper gjennom denne rapporten. Derfor vil de ulike trykkbegrepene forklares. Det er i hovedsak to metoder som brukes for å omtale trykk. En er basert på vakuum, mens den andre er basert på det atmosfæriske trykket (Nakayama and Boucher, 1999):

Absolutt trykk

Dette er det faktiske trykket i en gitt posisjon til et stillestående fluid. Det blir definert som normaltrykket per areal på en plan overflate som er nedsenket i fluidet. Absolutt trykk er uttrykt etter den ideelle gassloven:

$$P = \frac{\rho RT}{m_g} \quad (4)$$

Der:

- P = Absolutt trykk [Pa]
- ρ = Fluidets densitet [kg/m^3]
- T = Absolutt temperatur [K]
- R = Gasskonstant [8,314 J/mol * K]
- m_g = Molmasse [kg/mol]

Statisk trykk

Når et fluid er i bevegelse oppstår det andre trykk enn de nevnte. Et av disse kalles statisk trykk. Dette er det absolutte trykket som oppstår mot en flate som står parallelt med strømrretningen. Statisk trykk er derfor det trykket som blant annet oppstår mot kanalvegger.

Dynamisk trykk

Når et fluid som strømmer stoppes eller hindres fra å bevege seg videre oppstår det dynamisk trykk. Dette kalles også for hastighetstrykk og uttrykkes av Bernoulli ved hjelp av følgende formel (Schetz and Fuhs, 1999):

$$P_d = \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (5)$$

Hvor:

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

Total trykk

Dette er gitt som summen av statisk og dynamisk trykk. Totaltrykket kan også finnes ved å måle trykket mot en liten flate som står vinkelrett på strømningsretningen.

2.3.1. Drivkrefter

Det er to krefter som driver luft gjennom luftespalten. Den ene er vindtrykk og den andre er termisk oppdrift. Vinden er den viktigste av dem da den er den største. I tilfeller der det er vindstille vil den termiske oppdriften være den eneste drivkraften bak luftstrømmen.

Vindtrykk

Vindtrykket skaper trykkforskjeller mellom innløp og utløp og skaper en tvungen konveksjon i spalten. Vindkraften varierer veldig med årstid, geografisk plassering og høyden på terrenget. Omkringliggende skjerming som trær og andre bygninger har også stor innvirkning.

Meteorologene måler vindhastighet vanligvis i en høyde 10 meter over bakken i et åpent landskap. Denne høyden kalles for referansehøyden. Bygningers luftespalte ligger sjeldent så høyt over bakken. Enda mindre sannsynlig er det at bygget står i et åpent landskap uten forstyrrelser. For å beregne vindhastigheten u [m/s] mer realistisk benyttes derfor en potensformel (Blom, 1991):

$$u(z) = u(z_r) * \left(\frac{z}{z_r}\right)^\alpha \quad (6)$$

Der:

z_r = Referansehøyde, normalt 10 m

α = Eksponent avhengig av terreng

Eksponenten α avhenger av terrengets ruhet, og bestemmes ut fra Tabell 2.2:

Tabell 2.2 Eksponent α for ulike terrengetyper (Blom, 1991)

Terrengtype	α
«Glatt» terreng, sjø eller sletteland	0,12
Åpent landområde med spredt bebyggelse	0,16
Lav bybebyggelse eller skog	0,28
Storbysenter	0,40

Drivtrykket for ventilasjonen er som nevnt trykkforskjeller mellom innløp og utløp av luftespalten. Dette kan derfor beregnes ved å sette opp:

$$\Delta P_{vind} = P_{si} - P_{su} \quad (7)$$

Hvor:

P_{si} = Statisk lufttrykk ved innløp kanal [Pa]

P_{su} = Statisk lufttrykk ved utløp kanal [Pa]

Termisk oppdrift

I perioder hvor det ikke blåser kan termisk oppdrift fungere som en drivkraft i luftekanalene. Kraften kommer av densitetsforskjeller mellom uteluften og luften i kanalen. Densiteten varierer med luftens temperatur. Luften i kanalen kan bli varmere enn uteluften grunnet solstråling og/eller varmegjennomgang i taket. Den kan også bli kaldere på nattetid (Blom, 1991).

Luftens tørre densitet kan finnes ved å benytte følgende formel (Nevander and Elmarsson, 1994):

$$\rho(T) = \frac{352,9}{T + 273,15} \quad (8)$$

der:

T = Luftens temperatur [°C]

Densiteten til luften minsker når fuktinnhold og temperaturen øker. Ved å ta med denne sammenhengen kan densiteten uttrykkes som (Nevander and Elmarsson, 1994):

$$\rho_l(T, \varphi) = \frac{352,9}{T + 273,15} - 1,607 \cdot \varphi \cdot v_s(T) \quad (9)$$

hvor:

T = Luftens temperatur [°C]

φ = Luftens relative fuktighet [%]

v_s = Luftens metningsinnhold ved temperaturen T [kg/m³]

Det må kommenteres at fuktinnholdet har betydelig mindre påvirkning på den termiske drivkraften enn temperatur. Dette gjelder tilfeller der fuktinnholdet i spalten er høyere enn i uteluften. Normalt vil derfor temperaturen ha den største påvirkningen på den termiske oppdriften i luftespalten (Falk, 2010).

2.3.2. Motstander

Trykktap i luftekanalene kan skje på to måter. Den første kalles friksjonstap og kommer av friksjonen mellom veggene i kanalen og fluidet. Det andre tilfellet vil oppstå når det blir tap som følge av momentane endringer i strømmen. Dette oppstår ved innsnevring av kanalverrsnittet, utvidelser av kanalverrsnittet, samt ved retningsendringer.

Støttap

Dynamisk trykktap ved innsnevring, retningsendringer og innløp/utløp i kanalen kan til sammen ha stor betydning for det samlede trykktapet. Det er vanskelig å beregne slike enkeltmotstander teoretisk, men det er mulig å bestemme tapsfaktorer empirisk med følgende uttrykk (Blom, 1991):

$$\Delta p = \xi \cdot \frac{\rho \cdot u_m^2}{2} \quad (10)$$

$$\xi = \frac{\Delta p \cdot 2}{\rho \cdot u_m^2} \quad (11)$$

Der:

ξ = Tapskoeffisient over enkeltmotstand [Pa]

u_m = Fluidets middelhastighet i kanalen [m/s]

ρ = Fluidets densitet [kg/m³]

Friksjonstap

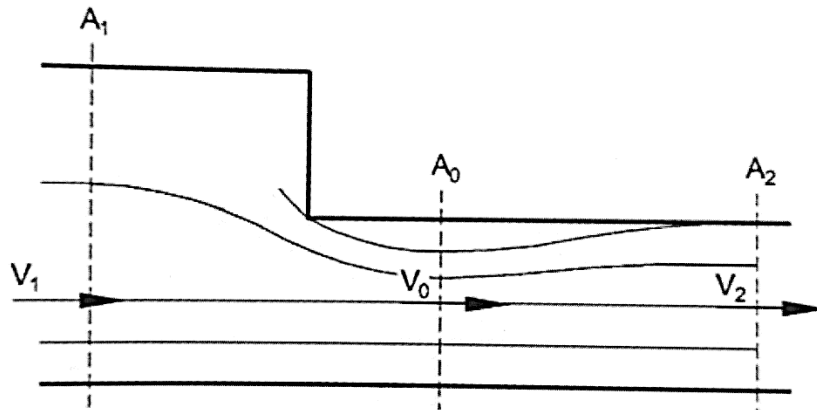
Friksjonen som oppstår mellom fluidet og kanalveggene gjør at strømningshastigheten er lik null helt inntil kanalveggene. Hastigheten er stigende ettersom man flytter seg vekk fra kanalveggene, og den maksimale hastigheten oppstår i sentrum av kanalen. På grunn av at alle partiklene beveger seg med ulik hastighet oppstår det skjærspenninger mellom fluidpartiklene og kanalveggen. Det er disse spenningene som gjør at det blir friksjonstap i kanaler.

Perforert areal

Fluenett blir ofte brukt i raftekasser for å holde fugler, insekter og smuss ute. Nettene utgjør i seg selv et perforert areal som vil gi et trykktap. Tapet er knyttet til forholdet mellom effektivt og perforert areal. Ved hjelp av forholdet kan fluidets middelhastighet gjennom det perforerte arealet beregnes, og videre trykktapet over det gitte arealet.

Innsnevring av kanaltverrsnittet

Trykktapet for luftstrømmen over et innsnevret kanaltverrsnitt er forårsaket av sammentrekning av strømmen etter innsnevring, gitt av en sammentrekningsfaktor α (se ligning (12)) (Hansen et al., 2013).



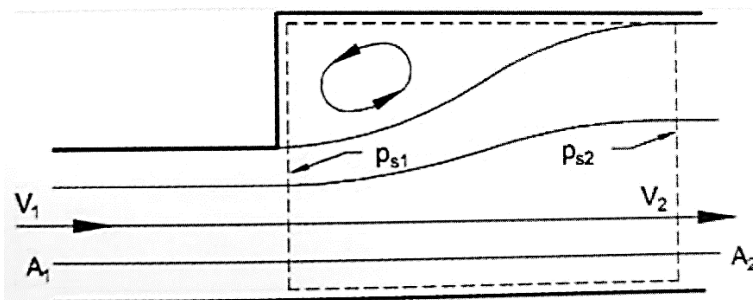
Figur 2.13 Trykktap når det er en kraftig reduksjon i tverrsnittet for luftstrømmen

$$\xi_1 = \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right)^2 \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{A_0}{A_2} \quad (13)$$

Utvidelse av kanaltverrsnittet

Trykktapet når det er en kraftig økning i tverrsnittets strømningsområde kan beregnes ved hjelp av ligning (14), noe som gir det lokale trykktapet som en funksjon av tverrsnittets område før og etter komponenten (Hansen et al., 2013).



Figur 2.14 Trykktap når det er en kraftig økning i tverrsnittet for luftstrømmen

$$\xi_2 = \left(1 - \frac{A_1}{A_2} \right)^2 \quad (14)$$

Det totale lokale tapet gitt av utvidelsen av kanalen, ξ (–) og innsnevring av kanalene, ξ_2 (–), kan beregnes ved hjelp av ligning (15) (Hansen et al., 2013).

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 \quad (15)$$

2.4. Tidligere arbeid

2.4.1. Phd Lars Gullbrekken

Over en toårsperiode har Lars Gullbrekken gjennomført en doktorgrad i samarbeid med SINTEF Building and Infrastructure, i en del av Klima 2050. Hans hovedoppgave «*Climate adaptation of pitched wooden roofs*» har tatt for seg å øke kunnskapsnivået vedrørende fuktsikring og luftstrøm gjennom luftespalten i skrå tretak. Gullbrekken utarbeidet i denne perioden 7 vitenskapelige artikler. Disse er delt opp i tre hovedemner:

1) Artikkel 1 – 2.

Motivasjon for oppgaven, dagens situasjon og fremtidige utfordringer for skrå tretak.

- I. Inkluderer bakgrunn og fremtidige utfordringer knyttet til lufting av skrå tretak
- II. En grundig undersøkelse av bygningsskader og bygningfysiske utfordringer knyttet til bruken av BIPV i nordisk klima.

2) Artikkel 3.

Naturlig konveksjon ved økt isolasjon, fuktsikre konstruksjoner.

- III. En laboratoriestudie av naturlig konveksjon i en høyt isolert konstruksjon
Effekten av temperaturdifferansen over en 500 mm tykk trerammekonstruksjon

3) Artikkel 4 – 7.

Retningslinjer for lufting av tretak, kunnskapsbase.

- IV-VI. En feltundersøkelse av et skrått tretak over flere perioder i et år og en analyse av et feltarbeid utført av Uvsløkk i 1996
- VII. Et nytt sett med retningslinjer for skrå tretak.

For rapportens del har det vært av god nytte å bruke resultatene og funnene til Gullbrekken. Her har spesielt Paper VI vært av god nytte. Den har tittelen «*Local loss coefficients inside air cavity of pitched wooden roofs*» og omhandler laboratoriemodellen denne rapporten benytter.

Resultatene Gullbrekken fant i denne artikkelen har vist:

Den lokale støttapskoeffisientene til de justerte steinlektene har et omtrentlig 40% lavere tap sammenlignet med de skarpkantete lektene. Målinger og simuleringer utført viste at det var en direkte korrelasjon mellom den lokale støttapskoeffisienten og dynamisk trykk gitt et større trykk enn 0,10 Pa. Simulering gjennom COMSOL kunne også underbygge resultatene fra målingene ved å gjengi disse resultatene på en pålitelig måte. De samlede resultatene fra målingene og simuleringene viser at økt høyde på sløyfehøyden og bruk av justerte lekter effektivt økte ventilasjonsevnen til skrå tretak.

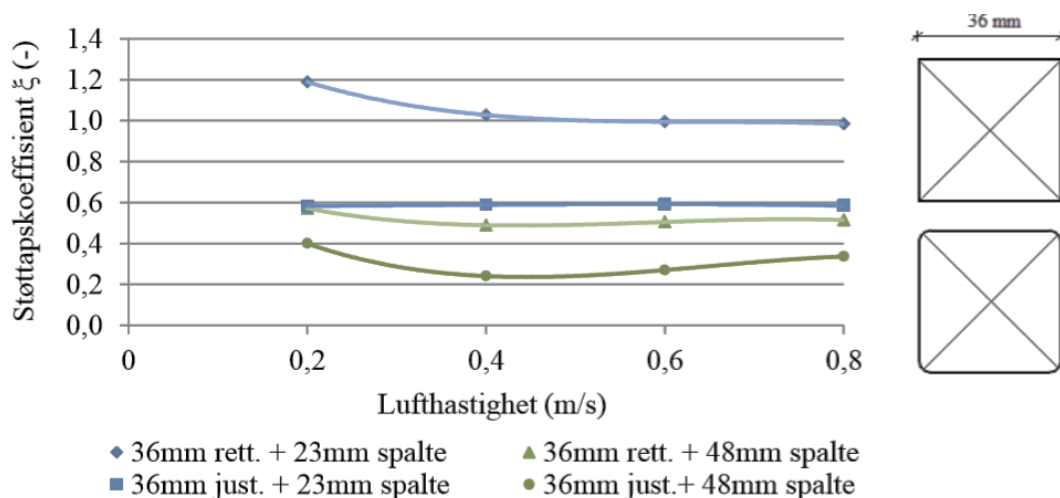
Videre fant Gullbrekken ut at en klassisk rafteløsning ga betydelig lavere lokale tapskoeffisienter enn ved bruk av en mer moderne løsning med lufting bak takrennen. Ved installasjon av fluenett ble den lokale tapskoeffisienten funnet til omtrentlig å doble seg.

2.4.2. Masteroppgave Espen Hansen

Gjennom høsten 2015 og våren 2016 planla og bygget Espen Hansen i samarbeid med Lars Gullbrekken og SINTEF en laboratoriemodell for å øke kunnskapen rundt utformingen av luftespalten i skrå tretak. Hansen gjorde dette ved å bygge en stor-skala modell av et skrått tretak, hvor han kunne utføre eksperimentelle målinger av trykktapet over takplanet. Modellen ble bygget i henhold til Byggforsk anvisning 525.102.

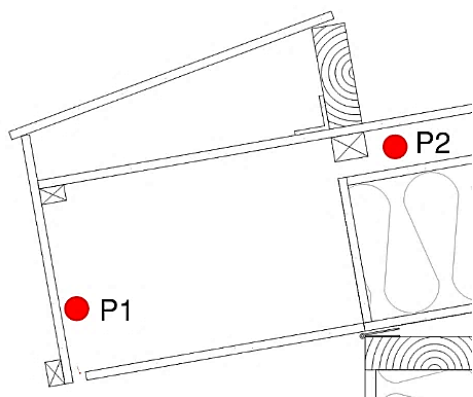
Hansen utførte en rekke forsøk tilknyttet lufting av skrå tretak, denne rapporten har fokusert på deler av hans arbeid, og resultatene han fant.

Av disse resultatene fant han blant annet ut at en økning i steinlektenes høyde, medførte et større totalt trykktap enn ved å øke sløyfehøyden i takplanet. Det mest interessante funnet Hansen gjorde var at steinlekker med avrundede kanter kontra rette reduserte støttapet over lektene med ca. 40%. Grafen under viser et utdrag av resultatene knyttet til steinlektene (Hansen, 2016):



Tabell 2.3 Utdrag fra masteroppgave – Espen Hansen – «Sammenligning av støttapcoeffisienter for justerte og rettkantete steinlekker 36mm (Hansen, 2016)»

Hansen gjorde også målinger på trykktapet over raftekassen med og uten fluenett. Etter samtaler med veileder ble det klart at disse målingene kunne gjentas med en ny nippelplassering (punktet hvor trykktapet måles). Dette begrunnes med at Hansens målinger inkluderer friksjonstapet gjennom kassen, noe som ikke er ønskelig. Figuren under viser den nye plasseringen (P1) og nippelplasseringen brukt av Hansen (P2).

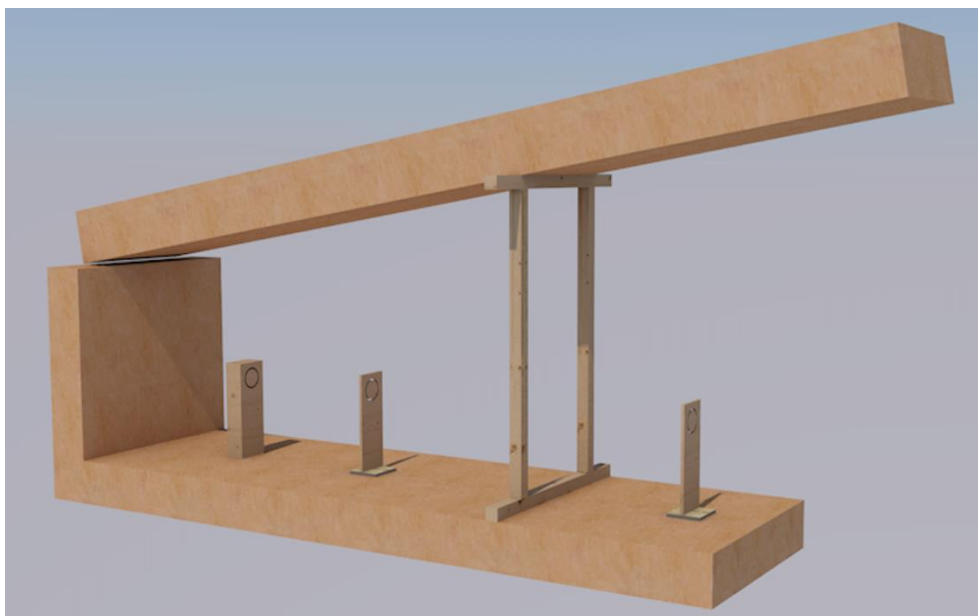


Figur 2.15 Ny nippelplassering P1 og gammel nippelplassering P2

3. Prøvemetode

3.1. Laboriemodell

Laboriemodellen er bygget som en replikasjon av ett skrått, luftet tretak. Modellen består av to hoveddeler. Den nedre delen av modellen består av en plattform med hjul som teknisk utstyr kan plasseres på. I tillegg fungerer den som en støtte for den øvre delen av modellen, videre omtalt som *takplanet*. Takplanet er hengslet i den nedre delen som gjør det mulig å justere takvinkelen etter behov. Modellen er av praktiske årsaker bygget så den imiterer bredden mellom to takstoler (CC600) med en innvendig bredde på 552 mm. Figur 3.1 viser modellen med takplanet montert.



Figur 3.1 Laboriemodellen med takplan (skrått plan)

3.1.1. Takplan

Takplanet er bygget opp av to langsgående bjelker på 45 x 200 mm med tverrgående bjelker i toppen, bunnen og midten av planet. Konstruksjonen er isolert med GLAVA proff 35, og er kledd med 12 mm sponplater både over og under. Takplanet kan sees i Figur 3.1. Samtlige skruehull og skjøter på planets overside er sparklet for å minimere forstyrrelser i luftstrømmen som vist i Figur 3.2. I

Tabell 3.1 er dimensjonene for takplanet oppgitt.

For alle forsøkene ble takvinkelen satt til 10° da det kun skulle benyttes tvunget konveksjon og ikke termisk oppdrift i forsøkene. Dette gjorde arbeidshøyden og tilkommeligheten langt bedre under arbeidet med modellen.



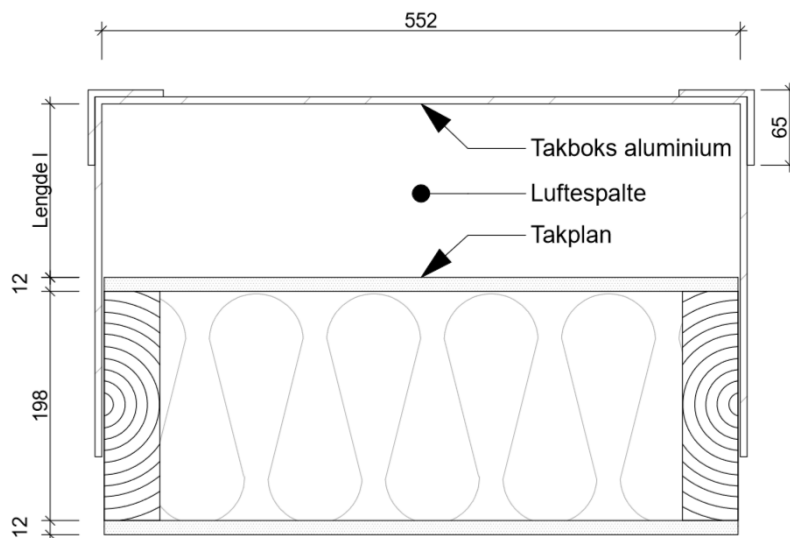
Figur 3.2 Sparklet skruehull

Tabell 3.1 Takplanets spesifikasjoner

Rammespesifikasjon	Dimensjoner [mm]
Lengde	3500
Bredde	548
Høyde	200

3.1.2. Takbokser

Modellen er bygget for å være praktisk og fleksibel. På bakgrunn av dette ble det valgt å bygge den øvre delen av taket som en boks. Når denne boksen blir tredd over takplanet dannes det en kanal som imiterer luftespalten i et skrå tretak. Takboksen utarbeidet av Espen Hansen (videre omtalt som *Takboks 1*) består av sidevegger og tak i aluminium. Dette ble valgt for å få en stiv boks, uten buler eller inkontinuerligheter (Hansen et al., 2016). For ekstra avstiving av aluminiumplatene er det benyttet aluminiumsvinkler med dimensjonene 6 x 65 mm i hjørnene. Boksen ble også laget med sidekanter som gjorde det mulig å gjøre forsøk med en høyde på luftespalten opp til 150 mm. Når boksen skal monteres eller endres senkes takplanet til horisontal stilling for å gjøre arbeidet lettere. Figur 3.3 viser ett målsatt snitt av takboksen uten lekter. I Tabell 3.2 er dimensjonene til takboksen spesifisert.



Figur 3.3 Takboks 1 målsatt snitt

Tabell 3.2 Takboksens spesifikasjoner

Rammespesifikasjon	Dimensjoner [mm]
Lengde	3550
Bredde	552
Høyde	305
Tverrsnitt	6

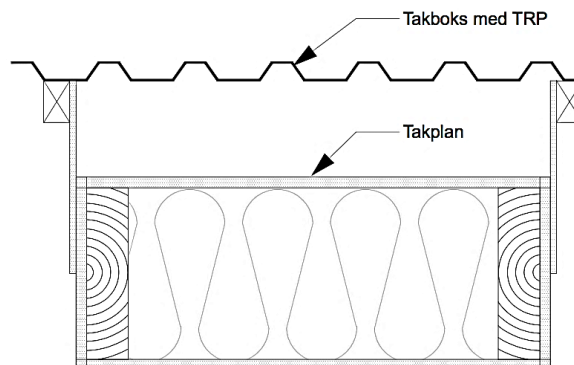
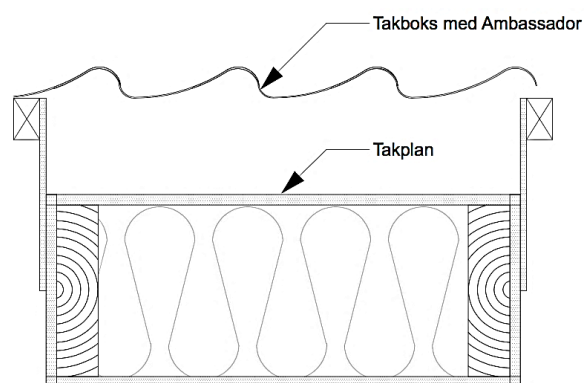
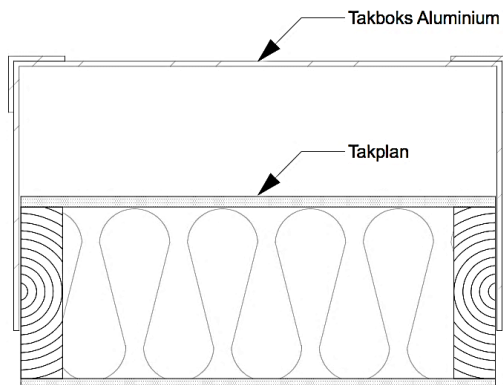
Takboksen utarbeidet av Hansen (*Takboks 1*) gjorde det ikke mulig å teste ulike takplater. Den faste oversiden i aluminium var ikke mulig å ta av eller bytte ut. Derfor ble det laget en ny takboks (videre omtalt som *Takboks 2*) med mulighet for å skifte boksens overside. Boksen ble bygget av fire kryssfinerplater. Disse ga lavere vekt og gjorde boksen lettere og mer håndterlig. Platene ble skjøtet i lengderetning, hvor skjøtene ble sparklet med en kombinasjon av trelim og sagspon for å gjøre overflaten glatt. Langsgående dragere ble skrudd på i overkant av sideveggene for å gi avstivning samt forenkle festingen av tekkingene. Figur 3.6 viser utformingen av de to takboksene, samt den nye takboksen med de ulike takplatene. Det ble i tillegg lagt gummilister langs kantenes overside for å bedre lufttettheten. Figur 3.4 og Figur 3.5 viser takboksen (uten takplate) montert på takplanet med og uten steinlekter.



Figur 3.4 Takboks 2 uten steinlekter



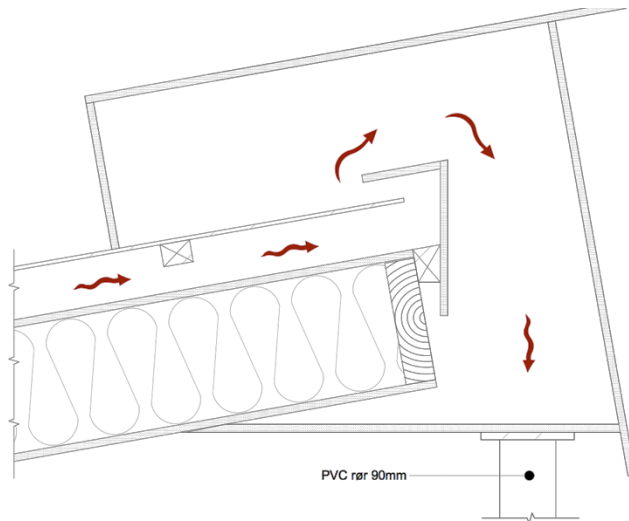
Figur 3.5 Takboks 2 med steinlekter



Figur 3.6 Takboks 1 (v) og 2 (h) med takplater

3.1.3. Mønekasse

Kassen som omslutter den øvre enden av takplanet er bygget som en tradisjonell mønekonstruksjon. Mønekassen fører luften fra luftespalten og videre ned i rørsystemet (se Figur 3.11). Kassen er bygget av kryssfinerplater med en utsparring i bunnplaten for feste av PVC røret. Bunnplaten til mønekassen er fastmontert til takplanet, mens resten av kassen er montert direkte på takboksen slik at den justeres med takboksen når sløyfehøyden endres. Dette innebærer at mønekassen også må tas av dersom takboksen skal tas av. Figur 3.7 viser et snitt av kassens oppbygging.



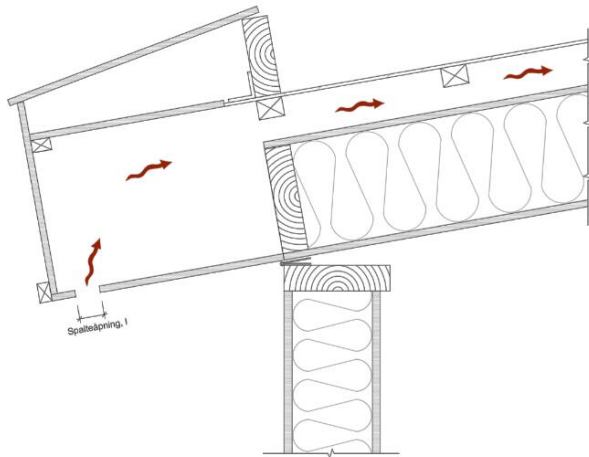
Figur 3.7 Mønekassens oppbygging



Figur 3.8 Mønekassen sett fra siden

3.1.4. Raftekasse

Den nedre delen av planet omslutes av raftekassen. Hensikten med kassen er å imitere en tradisjonell raftekonstruksjon med spalteåpning på kassens underside. Kassen gjør det mulig å enkelt bytte spalteåpning ved at det er mulig å bytte kun undersiden uten å løsne hele kassen. Den kan også tas helt av for testing av ulike raftekasser. Raftekassen er kun festet i takboksen slik at den følger endringer av sløyf høyden. Figur 3.9 viser et snitt av kassens oppbygning.



Figur 3.9 Raftekassens oppbygning

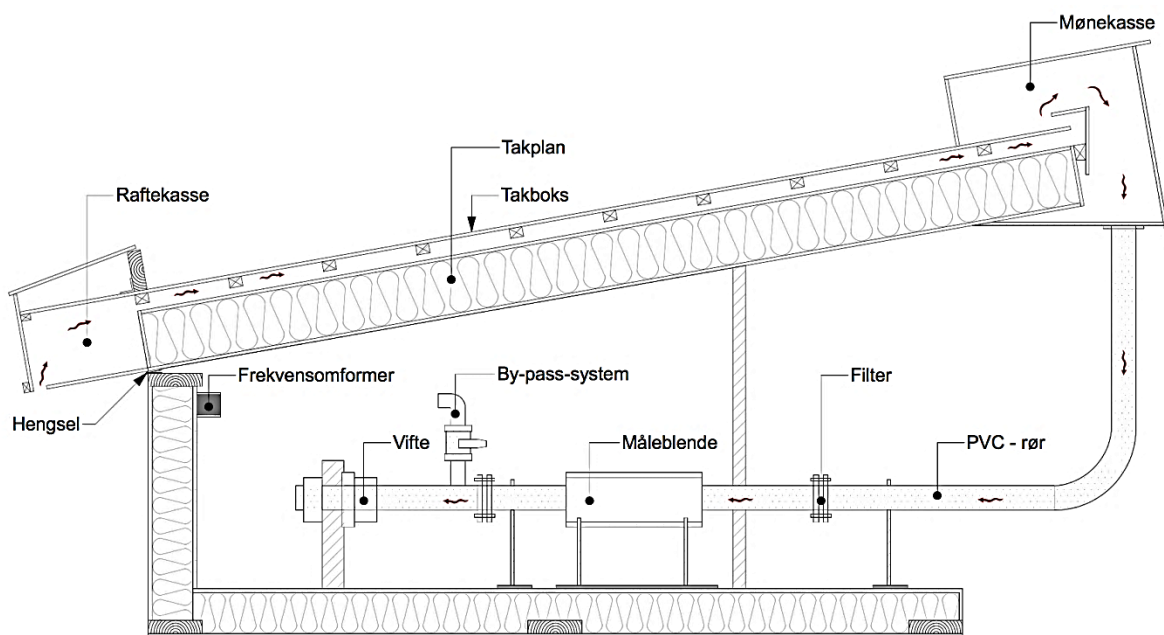


Figur 3.10 Raftekassen sett fra siden

3.1.5. Komplette modell

Laboratiemodellens drivkraft blir gitt av en kanalvifte som drar luft gjennom luftespalten i raftekassen, over takplanet, inn i mønekassen og videre ned i rørsystemet (se Figur 3.11 – røde piler symboliserer luften). Rørsystemet består av 90 mm PVC-rør som er limt sammen. Luften føres videre inn over en måleblende, denne blir presentert i kapittel 3.2. For å kontrollere hastigheten på viften brukes en frekvensomformer. Da denne ikke alltid klarer å stille hastigheten nøyaktig nok er det i tillegg montert et By-pass-system som gjør det mulig å finjustere lufthastigheten.

Det er essensielt for kvaliteten på forsøkene at modellen er tilfredsstillende lufttett. Lekkasje rundt om på modellen må fjernes eller gjøres så små som mulig. Samtlige overganger, sprekker og hull i modellen ble derfor teipet med Nashua 357 Duct tape. Før alle gjennomføringer av forsøk ble det utført egenlekkasjetester. Først når denne var godkjent (<1%) ble forsøkene igangsatt. Egenlekkasje er videre omtalt i kapittel 0 og vedlegg 4.



Figur 3.11 Komplette modell med forklaring

3.1.6. Røykforsøk

For å forsøke å illustrere strømningsbildet over en lekt ble det gjennom arbeidet med Takboks 2 bestemt å bygge ett område med ett gjennomsiktig materiale. Lexan var her et naturlig valg grunnet materialets egenskaper da det er lett å jobbe med fordi det både kan sages og bores. Området med lexan blir herfra omtalt som *vinduet*. Vinduet ble satt inn slik at den syvende lekten (fra bunnen) står omtrent midt i vinduet. Skjøtene på innsiden ble sparklet med trelim og sagspon for å gjøre dem tette og slette. På utsiden av vinduet ble kantene fuget med fugemasse som vist i Figur 3.16.

I tillegg til vinduet ble det innfelt en LED pære i takplanet. Dette ble gjort ved å bore ett hull som pæren ble plassert i. Rundt LED pæren ble det tredd en reflektor fra en gammel lommelykt. Hullet ble så tettet med Lexan som var kuttet til hullets diameter før det ble presset ned i utsparringen for å få en helt glatt overflate. Figur 3.12 og Figur 3.13 viser LED pæren nedfelt i takplanet.



Figur 3.12 Lexan over LED pære i takplanet



Figur 3.13 LED pære og reflektor under lexan



Figur 3.14 Sparklet overgang mellom lexan og Takboks 2 (Hull til røyk i vinduet)



Figur 3.15 Sparklet overgang mellom lexan og Takboks 2



Figur 3.16: Vinduet sett fra utsiden med lys på

3.2. Måleutstyr

For å beregne støttapet over komponenter i modellen er flere måleinstrumenter benyttet. I tillegg til trykktapet er volumstrømmen og temperaturen til luften nødvendig å vite for å kunne beregne støttapet over komponenter.

3.2.1. Trykk

Trykktapet i luftespalten blir målt ved å benytte mikromanometer (Differensial pressure transmitter). Denne måler trykkforskjellen mellom to punkter, og oppgir verdien i Pascal. Typen mikromanometer som blir benyttet er Furness Controls FCO352 av typen Model 1. Model 1 har et målområde på +/- 50 Pa. Målenøyaktigheten ved 20°C er oppgitt til å være <0,25% ifølge leverandøren (Furness-Controls, 2018). Mikromanometeret kobles opp mot en logger, som er koblet videre inn i en datamaskin. For prosjektet er mikromanometrene fastmontert på en ramme. Dette gjør det enkelt å endre målepunkter da tilkoblingene til målerne er på undersiden. Figur 3.17 viser mikromanometrene på ramme.



Figur 3.17 Mikromanometer montert på ramme

3.2.2. Temperatur

Temperatur måles ved hjelp av termoelementer. Elementene består av isolerte tråder som er sveiset sammen i tuppene. Sveisede elementer med minimal masse, bidrar til at responstiden blir minimal (Pyrocontrol, 2017). I dette tilfellet er det benyttet uisolerte tupper for å måle temperatur i luftrommet og ikke overflatetemperaturer (Hansen et al., 2016). Slike elementer kan anvendes fra -200 til over 2000°C. Det er ikke nødvendig med et så stort intervall, derfor ble termoelementer av type T valgt. Type T består av to metaller, kobber (Cu) og kobbernikkel (Cu-Ni). Disse er motstandsdyktige mot korrosjon og har god reproduserbarhet (Pyrocontrol, 2017). Innenfor type T finnes det tre klasser (1-3). Klassen som benyttes er klasse 1 med et standard område mellom -40 og 350 °C. Elementet har en nøyaktighet på $\pm 0,5$ °C. Termoelementene kobles inn i samme logger som mikromanometerene.

3.2.3. Volumstrøm

Hastigheten til luften i spalten er essensiell å ha kontroll på. Dette gjøres ved å benytte en måleblende. En måleblende måler volumet av luften som passerer den, som igjen gjør det mulig å beregne hastigheten til luften. Måleblende ble valgt til modellen da det er godt egnet for forsøket og hvordan modellen er utformet (Hansen et al., 2016). Den kobles mellom vifte og mønekassen som vist i Figur 3.11. Produsenten av blenden er Furness Controls, og modellen heter FCO93 – 2000L. Figur 3.18 viser måleblendens ferdig montert. Referansetallene blir oppdatert etter hver kalibrering av blenden. Siste kalibrering av den valgte måleblende var i sommeren 2015.

Resultatet etter måleblendens kalibrering har gitt referansetallene:

65,03 Pa ved 2000 L/min
49,10 Pa ved 500 L/min

Den aktuelle volumstrømmen blir da beregnet lineært ut fra et av disse referansetallene.



Figur 3.18 Måleblende

3.2.4. Datalogger

For å lagre informasjonen som blir generert gjennom målingene må det benyttes en datalogger. Maskinen registrerer informasjon fra mikromanometrene og termoelementet. Loggeren er av typen Expert Key 100C, og leveres av produsenten Delphin Technology. Rådataen som loggeren leverer vil være overførbart til Excel. Loggeren er innstilt på å logge verdier hvert sekund. Hvert forsøk blir da medianen av et minutt med logging.

3.3. Litteratursøk

Fremgangsmåten for innhenting av litteratur og relevant data til rapporten er gjort ved å benytte anbefalte strategier fra Oria. Her ligger det en oversiktlig liste for innhentning av litteratur.

Rapporten har også benyttet masteroppgaven «Luftstrømming i skrå tretak» av Espen Hansen og forskningsartikler samt doktorgraden utarbeidet av Lars Gullbrekken med flere.

Fokuset for innhenting av relevant litteratur har blitt sentrert rundt artikler og rapporter gitt til oss av Gullbrekken og nettbaserte databasesøk gjort gjennom høsten 17 og våren 18.

Oria

Oria brukes til å søke i universitetsbibliotekets trykte og elektroniske bøker, artikler, tidsskrifter, masteroppgaver og elektroniske ressurser ([BIBSYS, 2017](#)). Det kan også velges norske fagbibliotek og søke i samlingen til alle norske universitets- og høgskolebibliotek. Alle Orias kilder er vurdert med bibliotekets lange erfaring innen kildehåndtering. Dette er en troverdig database og en god ressurs å benytte.

Google Scholar

Google Scholar kan brukes til å søke etter artikler, avhandlinger, sammendrag med mer. Scholar er en enkel måte å gjøre et bredt søk etter faglig litteratur ([Google, 2017](#)). Her finnes det mye god og oversiktlig faglitteratur. I tillegg loggfører Google Scholar tidligere søk som gjør det enklere å holde oversikten i søkingen. Faglig litteratur som ikke dekkes av Oria kan avdekkes i Google Scholar.

Referanselister

Alle relevante kilder har en referanseliste. Disse kan inneholde relevant litteratur som ikke fanges opp søkemotorer eller databaser. Ved å arbeide seg bakover fra aktuelle kilder kan man avdekke mye relevant litteratur. Denne metoden kalles «*Citation Chaining*» eller «*Snowballing*».

Strategi

Resultatene etter hvert søk har blitt gjennomgått etter følgende strategi:

1. Tittel, vurderer relevans, hvis ja;
2. Keywords, vurderer relevans, hvis ja;
3. Abstract, dette er et sammendrag som skal gi en oversikt over temaet, metoden, resultatet samt implikasjoner. Vurderer om kilden er verdt å lese, hvis ja;
4. Leser resultat/konklusjon, vurderer om det er interessant og relevant, hvis ja;
5. Leser hele kilden (Gitt at det er en artikkel eller lignende med en overkommelig størrelse)

Ved å bruke denne fremgangsmåten er det en mulighet for at kilder av relevans ikke gjennomleses. Fordelen ved å bruke denne metoden er at man får gjennomgått et stort kvantum av kilder. Kilder utarbeidet av kjente norske forfattere ble gjennomlest uansett da disse trolig hadde høy relevans til rapporten.

4. Prøveparameter og -gjennomføring

I arbeidet med rapporten har mye tid blitt brukt til praktisk laboratoriearbeid i laboratoriet til SINTEF/NTNU. Forsøkene som ble gjort og alle de ulike parameterne blir presentert i de neste delkapitlene.

Tabellene under viser prøveparameterne til rapportens forsøk.

Tabell 4.1 Prøveparametere TRP (Spalteåpning 50 mm)

Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Hastighet = 0,2 m/s	x				x				x				x				x				x			
Hastighet = 0,4 m/s		x				x				x				x				x				x		
Hastighet = 0,6 m/s			x				x				x				x				x				x	
Hastighet = 0,8 m/s				x				x				x				x				x				x
Sløyfehøyde = 23 mm	x	x	x	x									x	x	x	x								
Sløyfehøyde = 36 mm					x	x	x	x									x	x	x	x				
Sløyfehøyde = 48 mm									x	x	x	x									x	x	x	x
TRP - takplate	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Ambassador - takplate																								
Justert steinlekt	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x												
Rett steinlekt													x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Tabell 4.2 Prøveparametere Ambassador (Spalteåpning 50 mm)

Variable	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
Hastighet = 0,2 m/s	x				x				x				x				x				x			
Hastighet = 0,4 m/s		x				x				x				x				x				x		
Hastighet = 0,6 m/s			x				x				x				x				x				x	
Hastighet = 0,8 m/s				x				x				x				x				x				x
Sløyfehøyde = 23 mm	x	x	x	x									x	x	x	x								
Sløyfehøyde = 36 mm					x	x	x	x									x	x	x	x				
Sløyfehøyde = 48 mm									x	x	x	x									x	x	x	x
TRP - takplate																								
Ambassador - takplate	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Justert steinlekt	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x												
Rett steinlekt													x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Tabell 4.3 Prøveparametere raftekasseutforminger

Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Hastighet = 0,2 m/s	x				x				x				x				x				x			
Hastighet = 0,4 m/s		x				x				x				x				x				x		
Hastighet = 0,6 m/s			x				x				x				x				x				x	
Hastighet = 0,8 m/s				x				x				x				x				x				x
Sløyfehøyde = 48 mm	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Spalteåpning = 30 mm	x	x	x	x					x	x	x	x	x	x	x	x								
Spalteåpning = 36 mm																	x	x	x	x				
Spalteåpning = 50 mm					x	x	x	x													x	x	x	x
Åpningsbredde = 36 mm									x	x	x	x					x	x	x	x				
Åpningsbredde = 48 mm													x	x	x	x					x	x	x	x
Rafteutforming 1	x	x	x	x	x	x	x	x																
Rafteutforming 2									x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Tabell 4.4 Prøveparametere fluenett

Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Hastighet = 0,2 m/s	x				x				x			
Hastighet = 0,4 m/s		x				x				x		
Hastighet = 0,6 m/s			x				x				x	
Hastighet = 0,8 m/s				x				x				x
Sløyfehøyde = 48 mm	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Spalteåpning = 50 mm	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Netting 1	x	x	x	x								
Netting 2					x	x	x	x				
Netting 3									x	x	x	x
Rafteutforming 0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

4.1. Raftekasser og fluenett

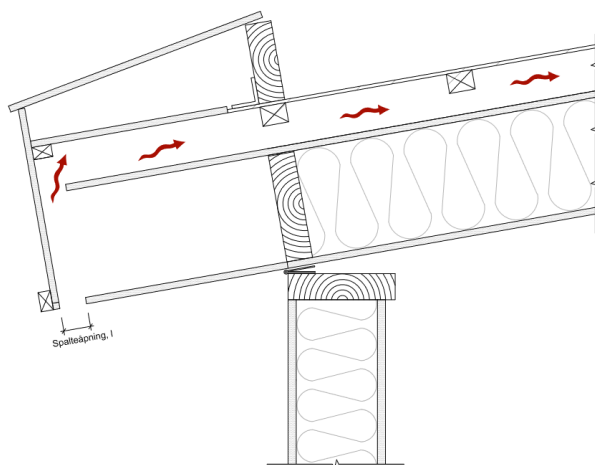
Trykktapet over raftekassen ble målt med nippelplassering P1 som vist i Figur 2.15. Denne plasseringen ble benyttet både ved forsøk utført på ulike raftekasser og på forsøkene av de tre fluenettene.

4.1.1. Raftekasser

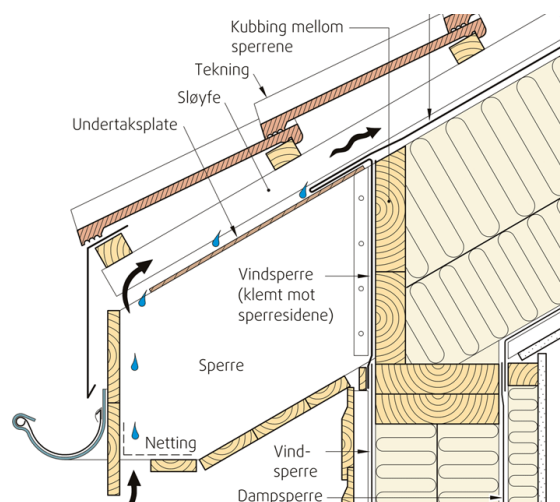
To ulike raftekasser ble gjort forsøk på for å se hvordan ulike utforminger av raftekassen påvirket luftstrømmen. For forsøkene med begge raftekassene ble Takboks 1 benyttet uten steinlekter. Dette fordi målingene kun ble gjort i raftet, og den videre luftespaltens innvirkning var neglisjerbar og ble derfor forenklet mest mulig. Overgangen mellom kassen og takboksen er vist i Figur 4.5 (merk at dette bildet er tatt før kassen er skrudd og teipet fast).

Byggforsk (2005) anbefaler å bruke en kontinuerlig spalteåpning som plasseres lengst mulig fra ytterveggen for å redusere snøinndrev i kassen. Videre er det anbefalt at spalteåpningen bør være 50 mm (Byggforskserien-525.107, 2005).

Raftekasse 1 bygger på utstikkende taksperrer, denne kassen defineres som den klassiske løsningen. Utformingen brukes for tretak med kombinert undertak og vindsperre (Byggforskserien-525.102, 2012). Spalteåpningen er plassert ytterst mot raftebordet. Figur 4.1 viser raftekassens oppbygning, som er utformet etter prinsippene i Figur 4.2. Løsningen ble bygget med 48 mm sløyfehøyde og det ble gjort forsøk på den anbefalte kontinuerlige spalteåpningen på 50 mm, samt en smalere spalteåpning på 30 mm.

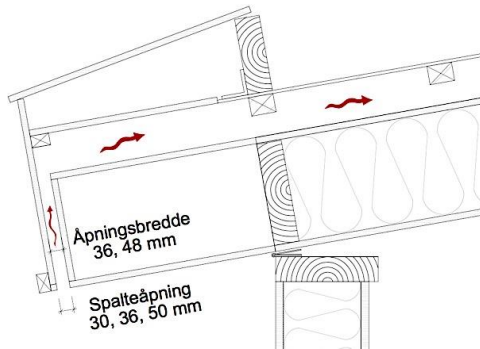


Figur 4.1 Raftekasse 1

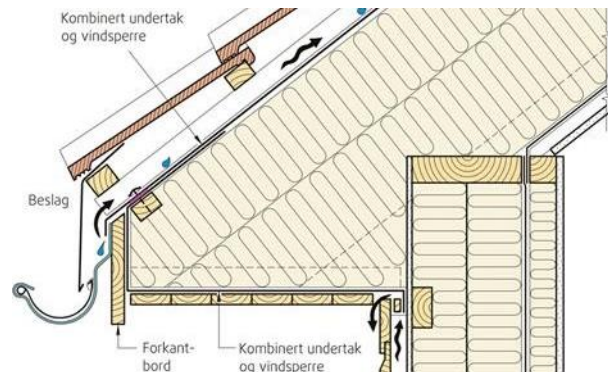


Figur 4.2 Illustrasjon av raft med kombinert vindsperre og undertak (Byggforskserien-525.102, 2012)

Raftekasse 2 (moderne/nyere løsning) ble også bygget etter prinsippene i [Byggforskserien-525.102 \(2012\)](#). I denne løsningen føres det kombinerte undertaket og vindsperren rundt hele raftekassens indre, som fylles med isolasjon. Utformingen (Figur 4.3) er bygget opp uten isolasjon i kassen da den kan stå i et oppvarmet rom. Figur 4.4 viser den etterlignede utformingen gitt av SINTEF [Byggforskserien-525.102 \(2012\)](#). Luftespalten starter da i det fri, beskyttet av dryppbeslaget over takrennen. Denne løsningen ble også gjort forsøk på med 48 mm sløyfehøyde over takplanet. Det vertikale bordet som representerer forkantbordet hvor takrennen er festet ble først målt med åpningsbredden 48 mm som over planet. Senere ble det gjort forsøk på 36 mm åpningsbredde. Dette ble gjort da spalteåpningen ble variert mellom 30, 36 samt 50 mm. Figur 4.3 viser de ulike variasjonene av spaltene.



Figur 4.3 Raftekasse 2



Figur 4.4 Illustrasjon av raft med luftespalte i overkant av takrennen ([Byggforskserien-525.102, 2012](#))



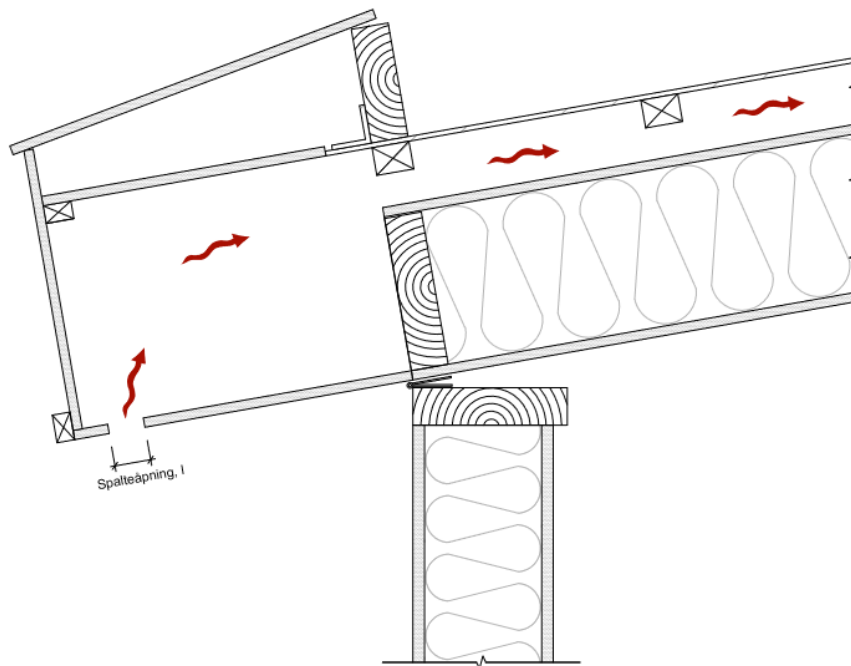
Figur 4.5 Overgang raftekasse mot Takboks 1

4.1.2. Fluenett

Forsøkene ble utført med tre ulike fluenett. Nettene skal ideelt stoppe alt av fluer, fugler og andre insekter fra å ta seg inn i raftekassen og videre inn i luftespalten. Samtidig skal trykktapet over nettet være så lite som mulig.

Nettene varierte både i maskestørrelse og tråddiameter. I tillegg var alle nettene produsert av forskjellige materialer. Nippelplasseringen for forsøkene av nettene var den samme som ved undersøkelsene av raftekassene (P1, Figur 2.15). Fluenettene ble testet med innvendig åpen raftekasse, gitt navnet *Raftekasse 0*. Utformingen er vist i Figur 4.6. Videre ble spalteaåpningen fastsatt til en kontinuerlig spalte på 50 mm ytterst på raftekassen.

Samtlige av nettene ble festet ved hjelp av teip på innsiden av bunnplaten rundt spaltens fire kanter som vist i Figur 4.7 - Figur 4.9.



Figur 4.6 Raftekasse 0 med åpen utforming

Nett 1

Det første nettet ble kjøpt på Biltema. Det kommer i dimensjonene 100-400 mm x 25 m. Her ble minste dimensjon valgt da den var stor nok til å dekke spalteaåpningen. Nettet er laget av PE-plast og dimensjonene er oppgitt til å være 2 x 2 mm maskeåpning og 0,6 mm tråddiameter (Biltema, 2018). Egne målinger viser at de faktiske dimensjonene på nettet var 1,75 x 2,29 mm, med en tråddiameter på 0,6 mm (målingene er vist i vedlegg 3). Dette resulterer at nettet har en åpningsandel på 59,0%.



Figur 4.7 Nett 1 montert over spalteaåpningen i raftekassen

Nett 2

Det neste fluenettet ble bestilt fra Byggmakker og er det eneste som er produsert i aluminium. Også dette nettet kommer i lengder på 25 m, med breddene 200 og 500 mm. Maskestørrelsen blir oppgitt til å være 1,3 x 1,3 mm (Byggmakker, 2018), mens målinger (Vedlegg 3) viser at maskestørrelsen er 1,16 x 1,39 mm. Tråddiameteren er ikke oppgitt, men ble målt til 0,22 mm. Dette gir en åpningsandel på 72,6%.



Figur 4.8 Nett 2 montert over spalteåpningen i raftekassen

Nett 3

Det siste fluenettet som ble testet kommer fra produsenten Gebe, og er laget av nylon. Nettet er å få kjøpt i ruller på 10 m med bredder fra 400 til 1220 mm. Det er oppgitt til å ha en maskestørrelse på 0,8 x 0,8 mm (Krigsvoll, 2018), men ved målinger ble det målt til 0,91 x 1,08 mm. Tråddiameteren ble målt til 0,2 mm (Vedlegg 3). Dette er rapportens mest perforerte nett med en åpningsandel på 75,0%.



Figur 4.9 Nett 3 montert over spalteåpningen i raftekassen



Figur 4.10 Nett 1 Biltema (Biltema, 2018)



Figur 4.11 Nett 2 TJB Aluminium (Byggmakker, 2018)



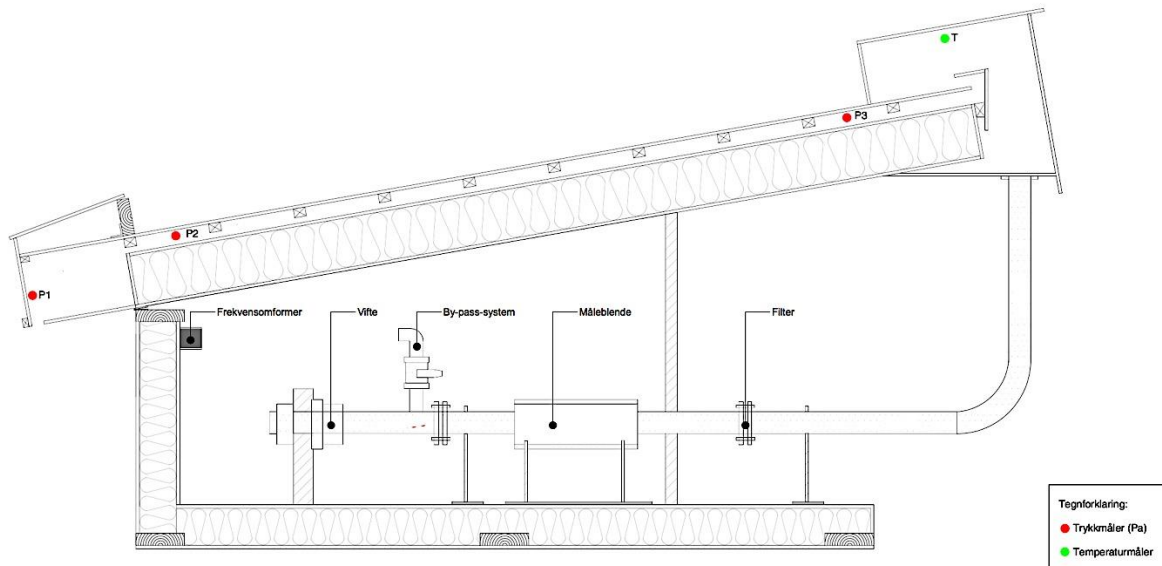
Figur 4.12 Nett 3 Gebe (Krigsvoll, 2018)

4.2. Takplater og lekter

Den største delen av arbeidet i laboratoriet har gått til forsøk utført på to ulike takplater og to forskjellige steinlekter. Gjennom disse forsøkene har Takboks 2 blitt benyttet (beskrevet i kapittel 0).

Det ble valgt tre sløyfehøyder i forsøkene med takplater og lekter. 23, 36 og 48 mm ble valgt da disse representerer de vanligste sløyfehøydene brukt for småhus i Norge. 23-36 mm blir brukt som en tommelfingerregel for taklengder $\leq 7,5$ m (Byggforskerien-525.102, 2012). Større sløyfehøyder blir anbefalt for taklengder (målt langs skråtaket, fra raft til møne) over 10 meter, eller med tak med lav helning.

For å måle trykktapet over takplanet ble det plassert nipler ved P2 og P3 som vist i Figur 4.13. Mikromanometerne målte da trykkforskjellene over 8 steinlekter. Det ble satt opp to sett med nipler ved P2 og to sett med nipler ved P3. Dette ble gjort for å måle trykktapet ved både takplateprofilenes topp- og bunnpunkt. Figur 4.15 og Figur 4.20 viser plasseringen av nipler i topp- og bunnpunktet av platene. Temperaturen til luften i modellen ble målt ved punkt T i mønekassen.



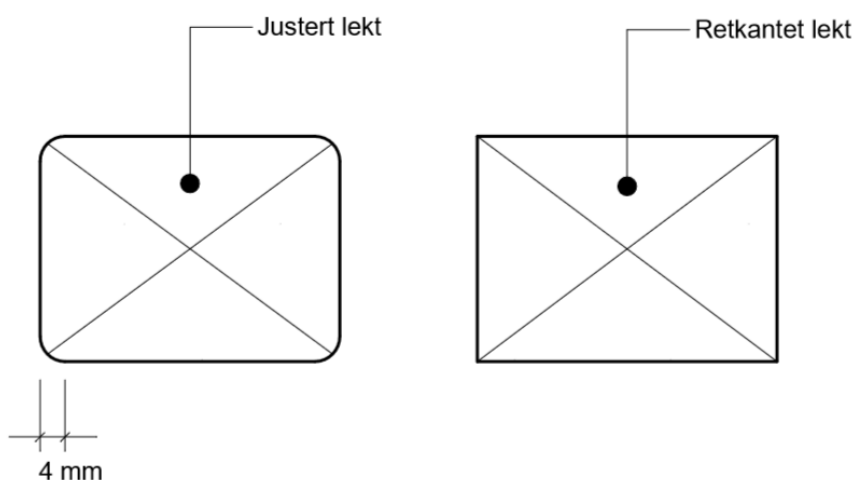
Figur 4.13 Nippelplassering

4.2.1. Steinlekter

Forsøkene ble begrenset til kun en steinlektedimensjon med to utforminger (justert og rettkantet, Figur 4.14) da arbeidsmengden ikke skulle bli for stor til å gjennomføre med tilfredsstillende kvalitet. At lekten er justert vil si at hjørnene er avrundet. I dette tilfellet er de justerte lektene høvlet til en radius på 4 mm (Figur 4.14). Lektene ble valgt etter dimensjoner anbefalt av SINTEF Byggforsk for tekking med takstein (Byggforskserien-544.101, 2006). For tak med sperreavstand på 0,6 m (CC600) og lekteavstand mindre enn 0,4 m er 30 x 48 mm lekter stort nok til å håndtere en snølast på 7,0 kN/m² på mark. En slik snølast dekker de største delene av landet, og det ble bestemt at slike lekter skulle benyttes.

Etter mange forsøk på å innhente justerte lekter i dimensjonen 30 x 48 mm ble det klart at disse lektene ikke var tilgjengelige. De fleste byggevarekjedene i området hadde lekter i dimensjonen 36 x 48 mm med både justert og rett utforming. Det ble derfor bestemt å benytte denne dimensjonen i stedet da 30 x 48 mm justert lekt ikke var å oppdrive.

Armat, produsenten av de benyttede takplatene sier også at steinlektene må være minst 36 mm på grunn av lengden på plateskruene til treverk (ARMAT, 2018a).

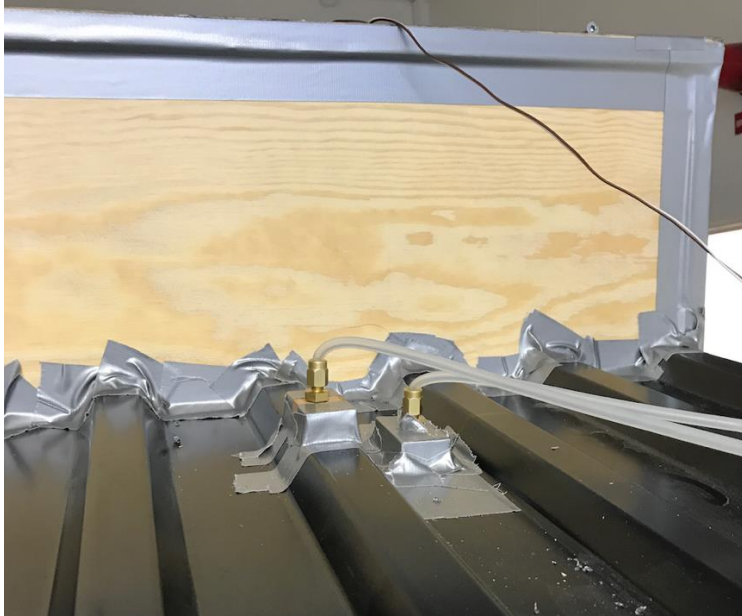


Figur 4.14 Sammenligning justert og rett steinlekt

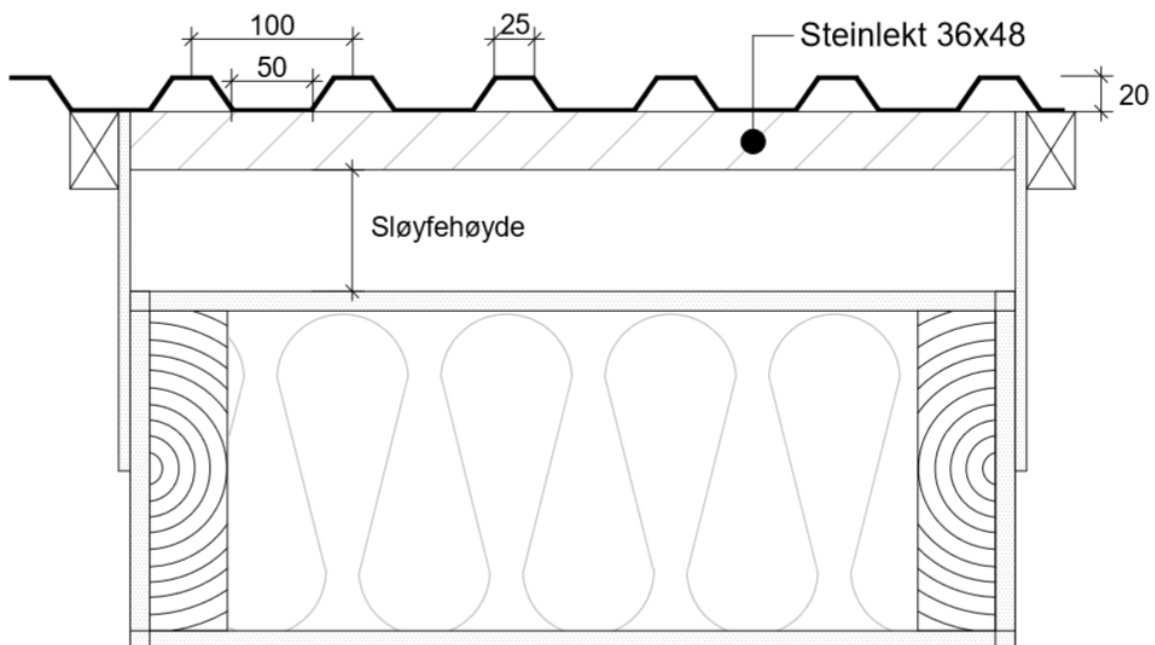
Lektene festes slik at oversiden av lekten flukter med oversiden av takboksen (Figur 3.5 viser Takboks 2 med monterte lekter).

4.2.2. TRP

Det ble valgt ut to takplater som skulle gjøres forsøk på. Den første platen er en klassisk trapesplate som finnes på mange bygninger, spesielt industribygg ([ARMAT, 2018b](#)). Ett målsatt snitt av platen montert på takboksen er vist Figur 4.16. Platen ble montert ved hjelp av skruer som ble skrudd ned i annenhver steinlekt samt i de langsgående lektene på Takboks 2. Alle overganger ble teipet med duct tape. Figur 4.15 viser overgangen mellom platen og mønekassen ferdig teipet. I forkant er plasseringen av niplene for måling av trykktapet, som ble gjort både i topp og bunn av takplateprofilen.



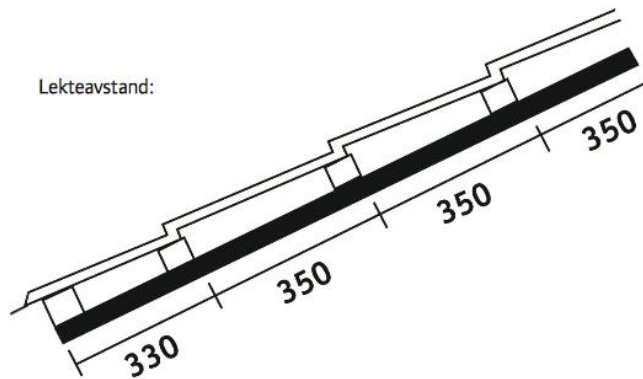
Figur 4.15 Overgang TRP-plate mot mønekasse



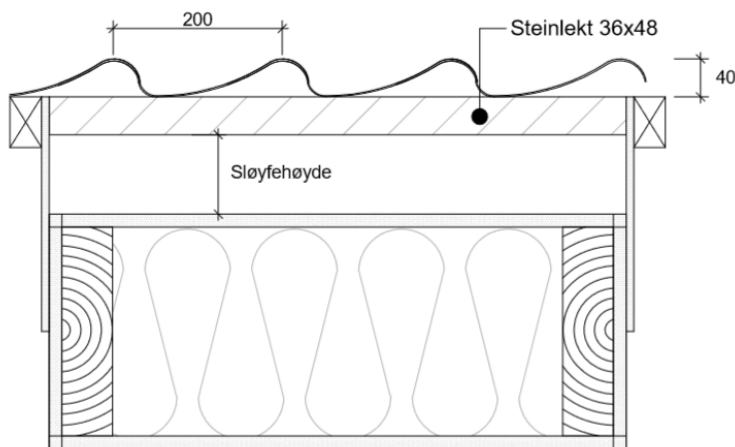
Figur 4.16 Tverrsnitt Takboks 2 med TRP- plate. Målsatt

4.2.3. Ambassador

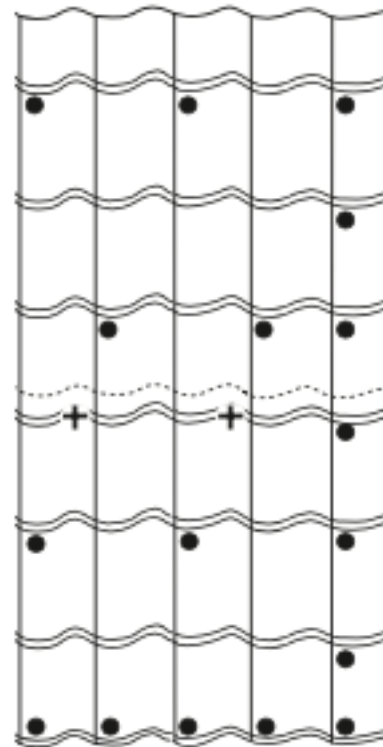
Den andre takplaten som ble gjort forsøk på var av typen Ambassador 3590. Denne er utformet som tradisjonell takstein. Platen ble festet med skruer for takplater etter monteringsanvisningen i Figur 4.18. Monteringsanvisningen sier at nederste lekt skal være ca. 12 mm høyere enn de andre lektene (ARMAT, 2018a). Den nederste lekten i takplanet ble derfor snudd 90 grader og flyttet 2,0 cm oppover planet etter Figur 4.17. I overgangene mot møne- og raftekassen ble det sagt ut to profiler for å passe til platens overside. Her ble det også teipet for å oppnå tilstrekkelig lufttetthet som vist i Figur 4.20.



Figur 4.17 Ambassador steinlektplassering (ARMAT, 2018a)



Figur 4.19 Utført Takboks 2 med Ambassador-takplate. Målsatt



Figur 4.18 Monteringsanvisning Ambassador (ARMAT, 2018a)



Figur 4.20 Teipet overgang Ambassador mot møneke



Figur 4.21 Teipet overgang takplate (Ambassador) mot Takboks 2

4.3. Røykforsøk

Røykforsøkene ble gjennomført ved å montere en kameratelefon som vist i Figur 4.22. Samtlige videoer ble filmet i Full HD med 60 fps (Frames per second). Utfordringen for forsøkene var å slippe inn lite nok røyk til at det ble en smal røykstripe som fulgte luftstrømmen over lekten. For mye røyk ville fylt hele spalten og gjort det umulig å få et bilde av luftstrømmen over steinlekten. Dette ble løst ved å bruke en røykpenn til å fylle en gummihanske. Hansken ble så tredd rundt et tynt rør som gikk gjennom vinduet og slapp ut røyken rett foran steinlekten. Ved å bruke gummihansken ble det mulig å justere mengden røyk til å passe til den aktuelle lufthastigheten gjennom spalten. Figur 4.22 viser kameraoppsettet for forsøkene.



Figur 4.22 Kameraoppsett for filming av røykforsøk

Vedlagt denne linken ligger videoen som viser hvordan forsøkene ble utført: [Illustrasjon av røykforsøk](#). Videoen viser plassering av kamera samt hvordan røyken fra hansken blir ført inn i modellen.

5. Resultater

Arbeidet med laboratoriemodellen og de forskjellige forsøkene som ble utført kan deles inn i følgende deler:

1. Egenlekkasje før alle utførte forsøk
2. Friksjonstap uten lekter og med varierende sløyfehøyde
3. Støttap over tre ulike fluenett
4. Støttap over to ulike raftekasser
5. Støttap for to ulike takplater med justerte og rettkantete steinlekter

Før alle forsøk er det utført egenlekkasjetester før gjennomføringene av målingene. Disse resultatene er ikke av relevans for forsøkene gjort ved rapporten. Målet med disse er kun å eliminere feilkilden fra lekkasjer. Egenlekkasjen er mer omtalt i kapittel 0 og vedlegg 4.

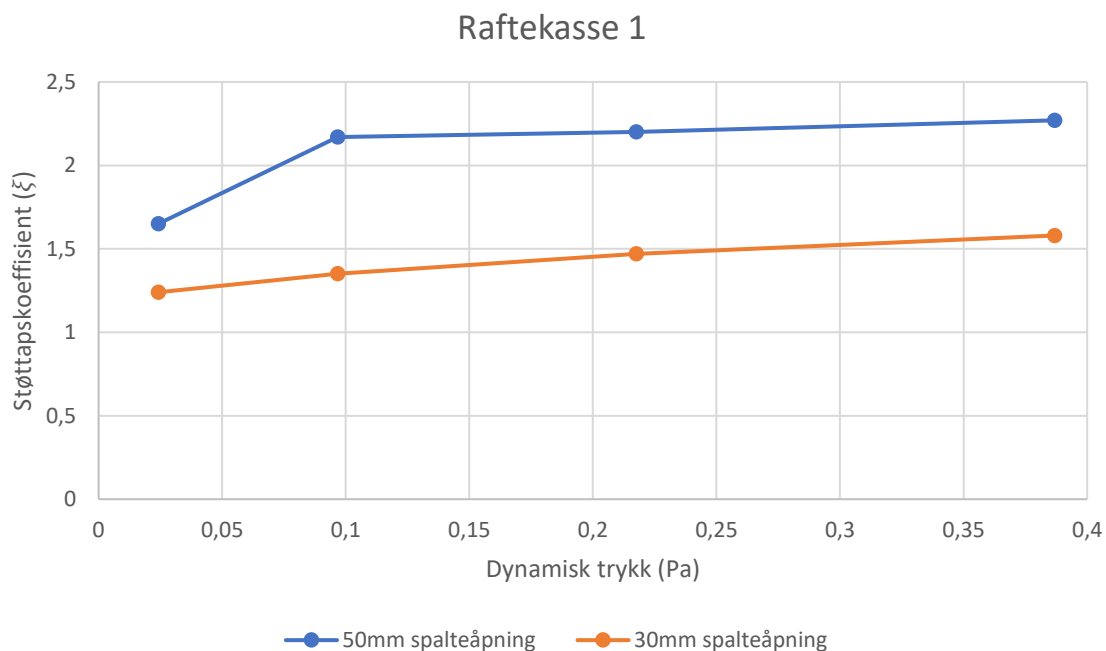
Av hensiktsmessige grunner blir heller ikke resultatene av friksjonstapet presentert. Disse resultatene er trukket fra verdiene for alle utførte forsøk.

Videre følger resultatene fra samtlige forsøk utført våren 2018.

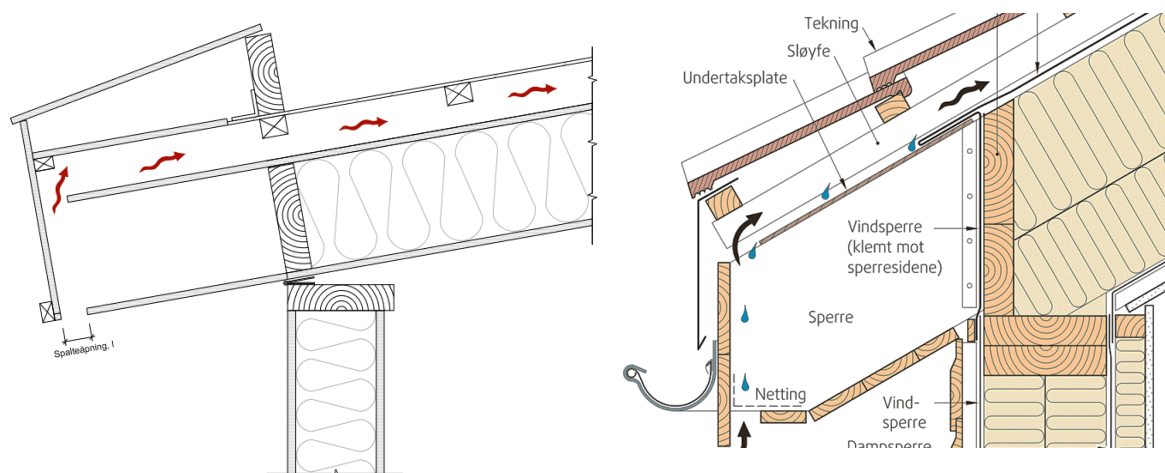
5.1. Raftekasser og fluenett

5.1.1. Raftekasse 1

Raftekasse 1 er beskrevet i kapittel 4.1.1. Grafen under viser støttapskoeffisienten over Raftekasse 1 med to kontinuerlige spalteåpninger. Det er blitt benyttet spalteåpninger på 30 og 50 mm ytterst ved forkantbordet. Benyttet sløyfehøyde er 48 mm.



Figur 5.1 Støttapskoeffisient ξ (-) for Raftekasse 1 som en funksjon av dynamisk trykk. For spalteåpning 50 og 30 mm.

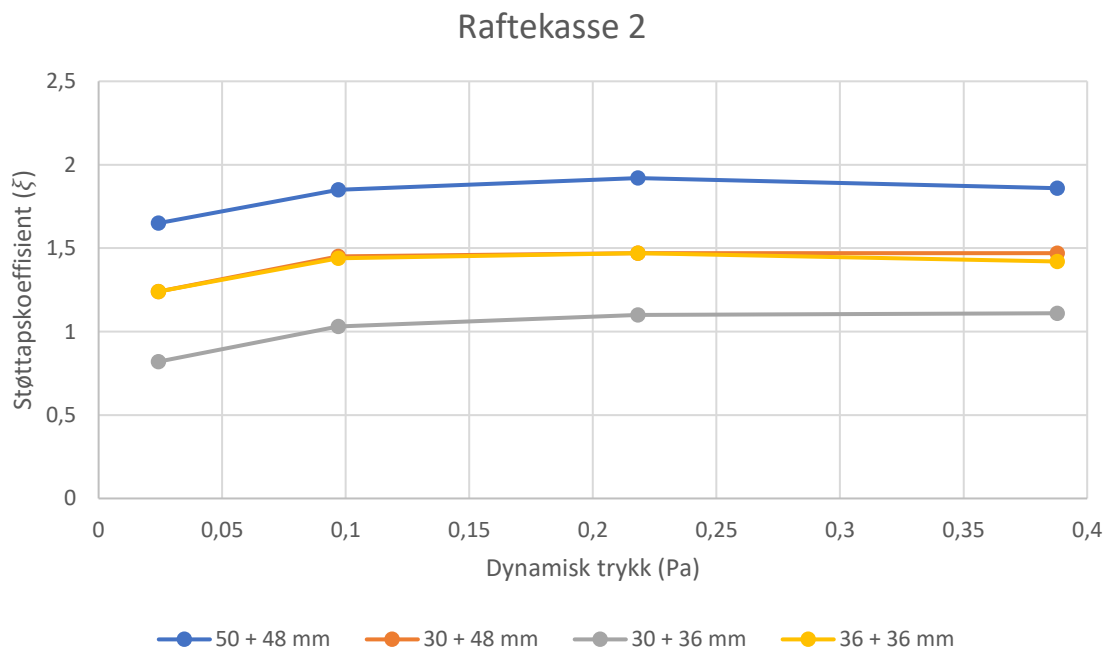


Figur 5.2 Figuren til venstre viser Raftekasse 1 bygget av Espen Hansen og tilpasset av oss, og figuren til høyre viser en tradisjonell raftekasse fra Byggforsk som har vært førende for vår rafteløsning.

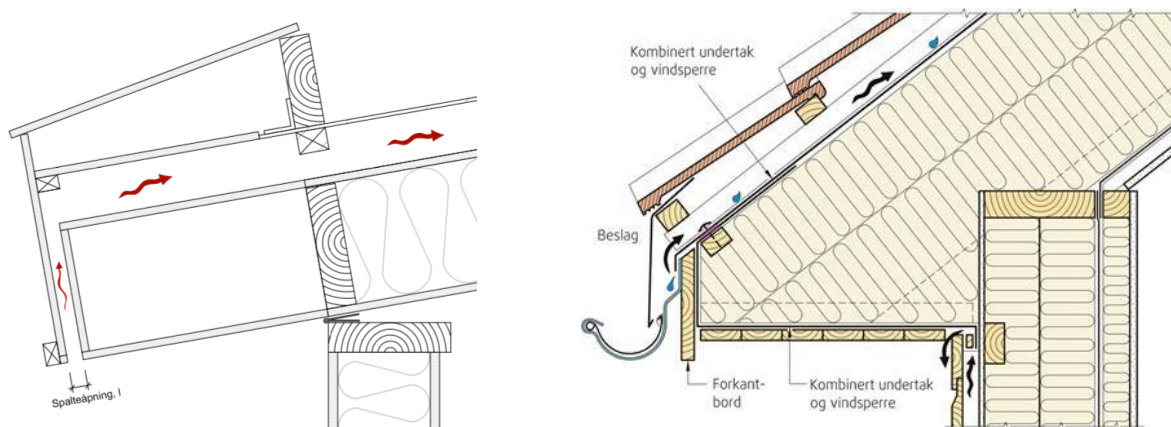
Figur 5.1 viser at ved å øke spalteåpningen i raftekassen vil støttapet øke tilnærmet lineært med økningen i det dynamiske trykket over takflaten. Ved de laveste hastighetene er forskjellen mindre og støttapet lavere.

5.1.2. Raftekasse 2

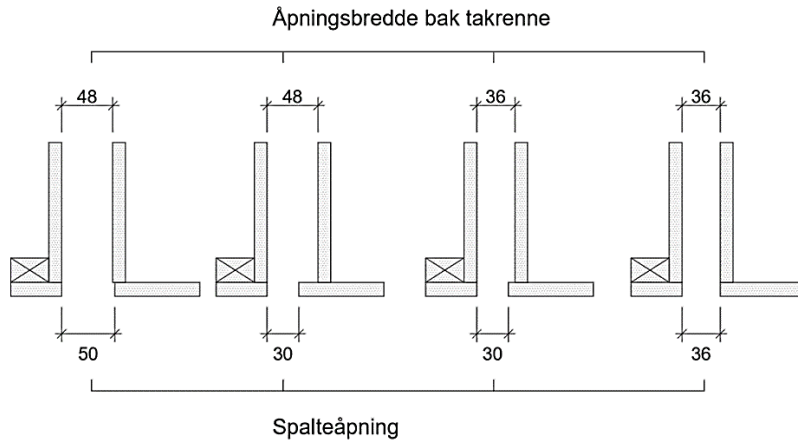
Den andre raftekassen er bygget etter Byggforsk datablad 525.102 som beskrevet i kapittel 4.1.1. Dette forsøket er utført med fire forskjellige variasjoner. Figur 5.5 illustrerer variasjonene som befinner seg i bakkant av takrennen, samt de ulike spalteåpningene. Benyttet sløyfehøyde er 48 mm.



Figur 5.3 Støttapskoeffisient ξ (-) for Raftekasse 2 som en funksjon av dynamisk trykk. Første tall beskriver spalteåpningen i raftekassens underside, andre tall beskriver åpningsbredden bak takrennen



Figur 5.4 Figuren til venstre viser Raftekasse 2 bygget av Espen Hansen og tilpasset av oss, og figuren til høyre viser en raftekasse hvor spalteåpningen er plassert bak takrennen, hentet fra Byggforsk.



Figur 5.5 Figuren illustrerer de ulike åpningsbreddene bak den teoretiske takrennen, og spalteåpningen på undersiden av raftekassen

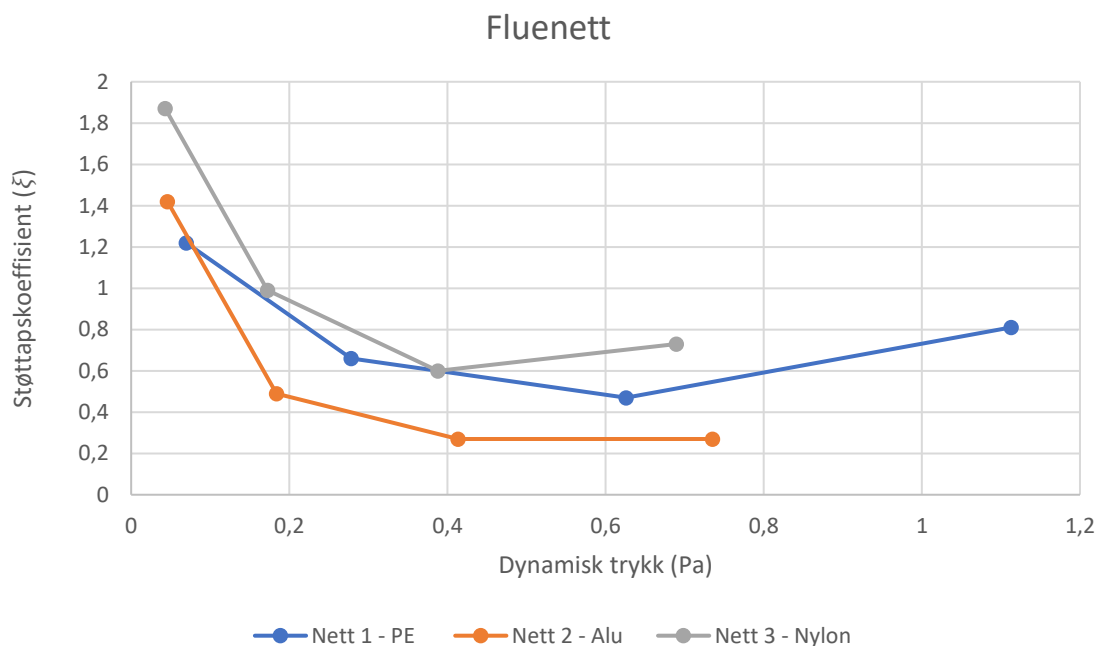
Figur 5.1 og Figur 5.3 viser en trend-linje for støttapet over begge raftalternativene. Grafene viser at 50 mm spalteåpning i begge raftene har ett identisk støttap ($\xi = 1,65$) ved lavt dynamisk trykk. Likevel ender Raftekasse 1 med nesten 18% høyere støttap enn utforming 2 med 50 mm spalte. Slik det fremgår vil ett kontinuerlig spalteinløp på 36 + 36 gi tilnærmet identisk trykktap som en 48 mm åpningsbredde med 30 mm spalteåpning. Raftekasse 1 med 30 mm spalte presterer nesten identisk med disse ved dynamiske trykk under 0,25 Pa.

5.1.3. Fluenett

For forsøkene gjort med fluenett har det blitt valgt en konstant spalteåpning i raftet på 50 mm. Raftekassen (Raftekasse 0) har ingen innvendige formendringer (beskrevet i kapittel 4.1.2).

Resultatene presentert i Figur 5.6 viser kun støttapet som oppstår over de tre fluenettene. Støttapet gjennom spalteåpningen uten nett er målt og trukket fra for å illustrere tapet over nettene. På denne måten blir det unngått at resultatene blir forstyrret av friksjons- og støttapet fra raftekassen.

Forskjellen i dynamisk trykk mellom nettene skyldes åpningsgraden. En større åpningsgrad gir lavere lufthastighet gjennom nettet og dermed lavere trykk. Nett 1 som er rapportens tetteste nett får dermed høyere dynamisk trykk enn Nett 2 og 3 med samme volumstrøm gjennom spalteåpningen.



Figur 5.6 Støttapkoeffisient ξ (-) for tre fluenett gitt som en funksjon av dynamisk trykk.

Figur 5.6 viser at lave dynamiske trykk gir større støttapkoeffisienter, mens trykktapet synker ved økende trykk. Kun ved de største trykkene begynner støttapet å stige for Nett 1 og 3. For de ulike produktene er det Nett 2 som gir det laveste tapet. Ved de høyeste dynamiske trykkene har Nett 2 66% lavere tapsekoeffisient enn Nett 1 og 63% lavere enn Nett 3. Nett 2 har en åpningsgrad på ca. 72%, er med det mellom de to andre i åpningsgrad (dimensjoner og åpningsgrad er oppgitt i Tabell 5.1).

Tabell 5.1 Beskrivelse av brukte fluenett gitt med tråddiameter og maskestørrelse samt åpningsgrad

Målte og oppgitte størrelser for fluenett					
	Tråddiameter [mm]		Maskestørrelse [mm]		Åpningsgrad [%]
	Målt	Oppgitt	Målt	Oppgitt	Beregnet
Nett 1 – PE plast	0,6	0,6	2,29 x 1,75	2 x 2	59
Nett 2 – Aluminium	0,22	-	1,39 x 1,16	1,3 x 1,3	72
Nett 3 – Nylon	0,19	-	1,08 x 0,91	0,8 x 0,8	75

5.2. Takplater og lekter

5.2.1. TRP

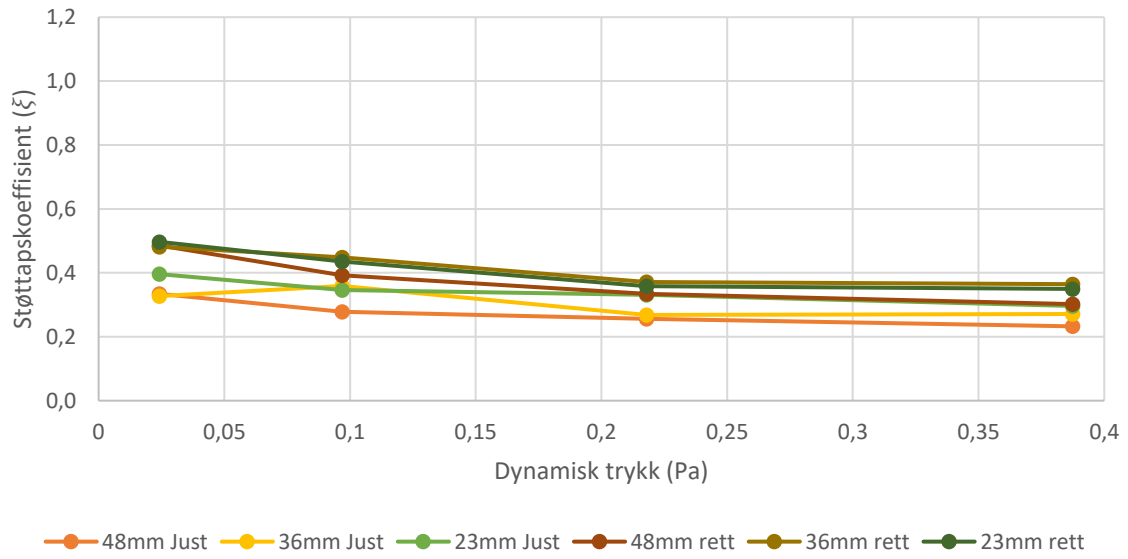
Grafene i Figur 5.7 og Figur 5.9 fremstiller støttapet over en enkelt steinlekt. Trykktapet måles over 8 lekter, men grafene er fremstilt per lekt og fratrukket friksjonstapet over takplanet. Dette er gjort for å illustrere støttapet over en enkelt steinlekt med ulike sløyfehøyder og takplater. Samtlige målinger er gjort i både topp (grønn) og bunn (rød) av takprofilen. Figur 5.8 viser et målsatt tverrsnitt av takplaten med nippelplasseringer.

Figur 5.7 viser et skille mellom de rette og justerte lektene, spesielt ved lave dynamiske trykk. Grafen viser at de justerte lektene gir en gjennomsnittlig reduksjon i støttapet på 23%. De største reduksjonene oppstår ved 36 mm og 48 mm sløyfehøyde og lavt trykk (under 0,1 Pa). Her er reduksjonen henholdsvis 32% og 31%.

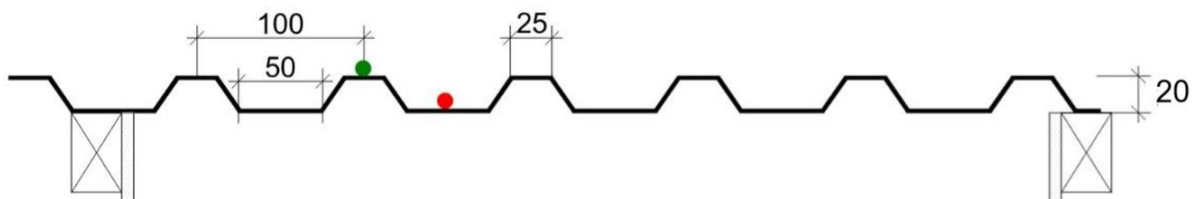
Målingene (Figur 5.9) gjort i toppen av plateprofilen viser større variasjoner i støttapene, spesielt ved lave dynamiske trykk. Når det dynamiske trykket stiger blir støttapene stadig likere verdiene i bunnen av profilen. Figur 5.9 viser at de justerte lektene i gjennomsnitt har et 55% lavere støttap enn samme sløyfehøyder med rettkantete lekter. Ved å beregne gjennomsnittet fra det nest laveste dynamiske trykket (ca. 0,1 Pa) for å unngå ekstremalverdiene, blir gjennomsnittet likevel 47% lavere for justerte lekter.

Merk at rettkantet lekt med 36 mm sløyfehøyde gir det største støttapet både i topp og bunn av platen ved alle dynamiske trykk over 0,1 Pa.

Bunnmåling TRP

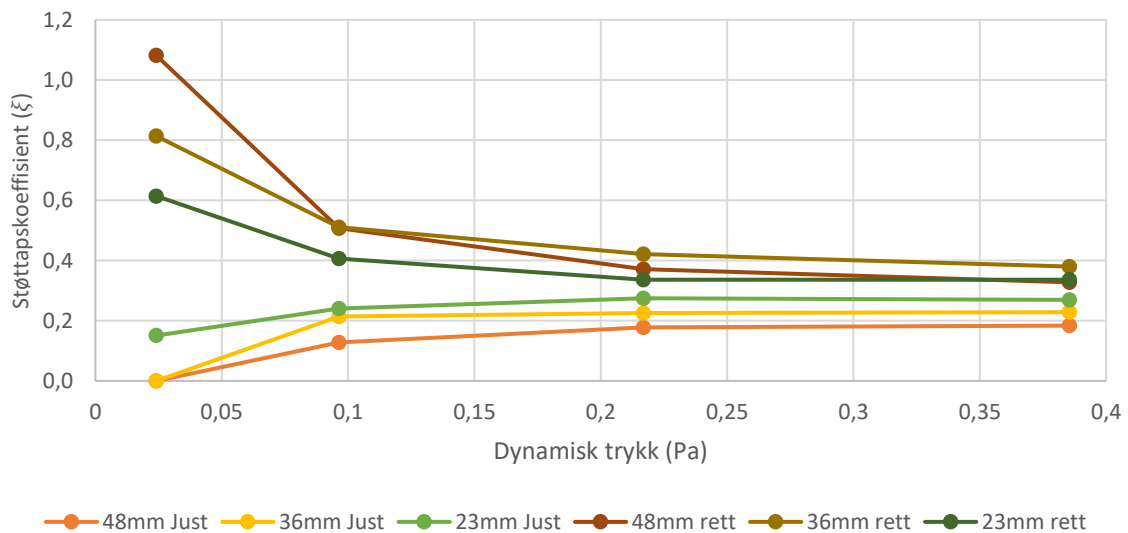


Figur 5.7 Støttapskoeffisient ξ (-) for TRP målt ved laveste tverrsnittshøyde, gitt som en funksjon av dynamisk trykk.



Figur 5.8 Tverrsnitt TRP - Grønn prikk representerer toppmåling, rød prikk bunnmåling

Toppmåling TRP



Figur 5.9 Støttapskoeffisient ξ (-) for TRP målt ved høyeste tverrsnittshøyde, gitt som en funksjon av dynamisk trykk.

5.2.2. Ambassador

Figur 5.10 og Figur 5.12 illustrerer støttapet over en enkelt steinlekt ved ulike dynamiske trykk. Også her er friksjonstapet trukket fra slik at det kun er støttapet som blir presentert. Det er utført målinger både i takplatens topp- og bunnpunkt, plasseringen av måleniplene er vist i Figur 5.11.

Grafen i Figur 5.10 viser den samme trenden som i Figur 5.7. Også for denne plateprofilen er tapene forholdsvis samlet i området 0,2-0,4 ξ . Gjennomsnittet fra bunnmålingene viser at de justerte lektene reduserer støttapet med 34%.

Målingene gjort i toppen av takprofilet (Figur 5.12) viser at de justerte lektene gir en gjennomsnittlig reduksjon av støttapet på 9% sammenlignet med de rettkantete lektene. Det fremgår også at de justerte lektene presterer dårligere enn tilsvarende rettkantete lekter ved trykk under 0,05 Pa. Ved å beregne gjennomsnittet fra 0,01 Pa (for å fjerne ekstremalverdiene ved lave trykk) og oppover stiger differansen til 17%.

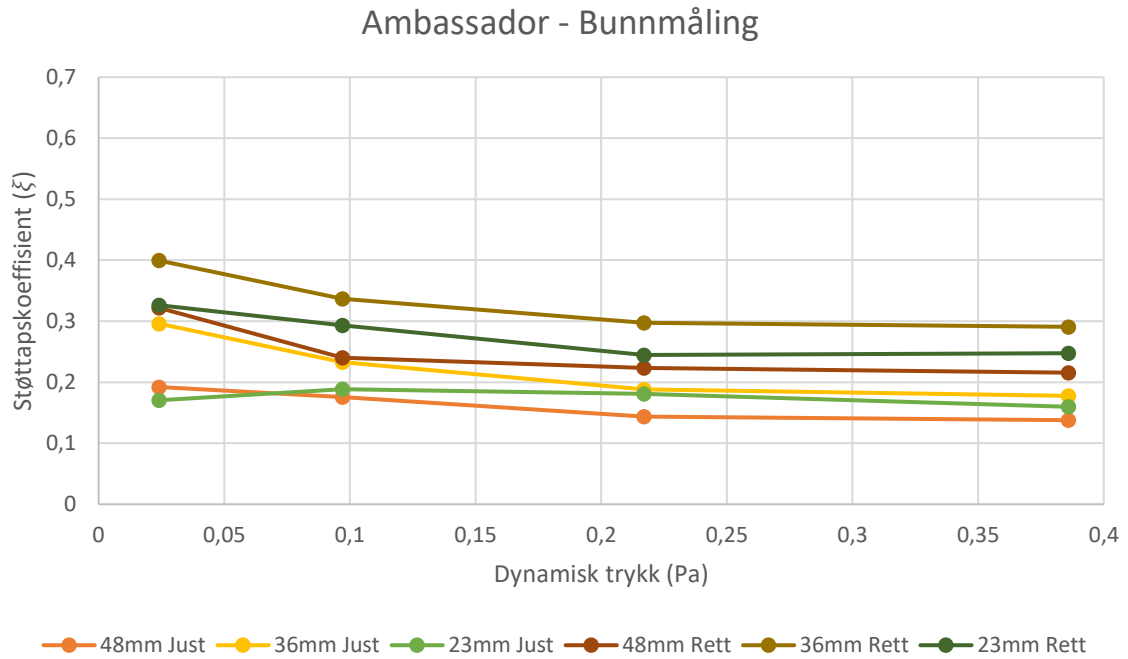
Merk at rettkantet lekt med 36 mm sløyfehøyde også ved denne plateprofilen gir det største støttapet både i topp og bunn av platen.

Målingene av begge takplater og steinlekter gir følgende reduksjoner av støttap med justerte kontra rettkantete lekter:

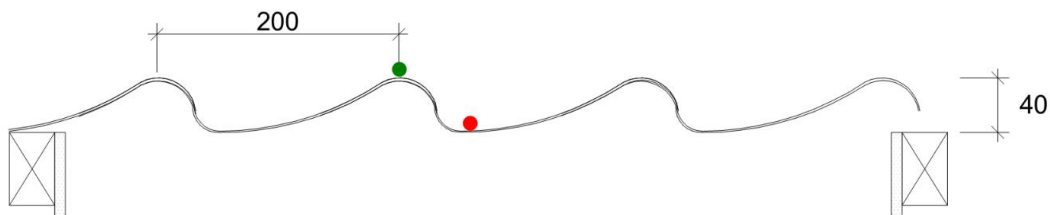
Tabell 5.2 Reduksjon av støttap med justert kontra rettkantet lekt

Støttap	TRP	Ambassador
Bunnmåling	23%	34%
Toppmåling	47% (55%)	17% (9%)
Gjennomsnitt	35%	25%
Totalt gjennomsnitt	30%	

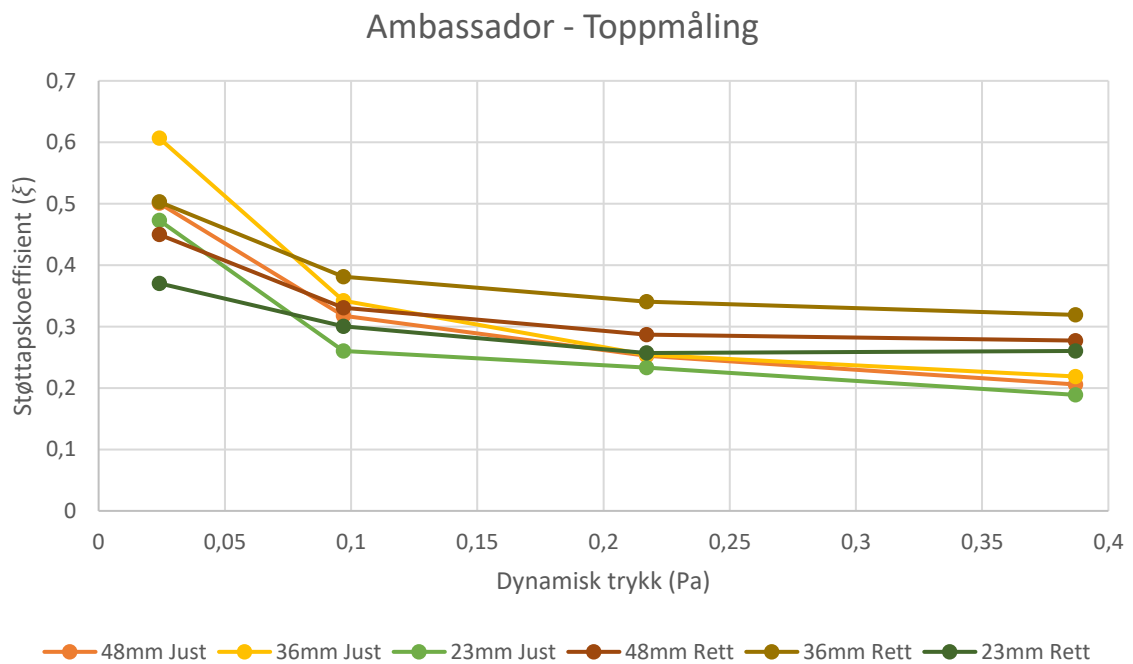
Gjennomsnittet av samtlige målinger over steinlekter viser en reduksjon av støttapskoeffisienten på **30%** ved bruk av justerte lekter.



Figur 5.10 Støttapskoeffisient ξ (-) for Ambassador målt ved laveste tverrsnitthøyde, gitt som en funksjon av dynamisk trykk.



Figur 5.11 Tverrsnitt av Ambassador - Grønn prikk representerer toppmåling, rød prikk bunnmåling



Figur 5.12 Støttapskoeffisient ξ (-) for Ambassador målt ved høyeste tverrsnitthøyde, gitt som en funksjon av dynamisk trykk.

5.3. Røykforsøk

For å framheve hva som skjer med luftstrømmen når den passerer en steinlekt er det gjort forsøk med røyk. Dette er gjort med de samme variablene som forsøkene med steinlekter. Det vil si at det er gjort totalt 48 røykforsøk. Disse innebærer to takplater, to lekter, tre sløyfedyder og fire hastigheter som vist. Bildene som følger er alle tatt fra hastigheten 0,2 m/s, sløyfedyden samt lekteutformingen er beskrevet i bildeteksten. Denne hastigheten er valgt fordi de mest spesielle støttapene over takflaten befinner seg ved de laveste dynamiske trykkene. Det er i tillegg enklest å observere røykens bevegelser over lektene i denne hastigheten.

Alle bildene er hentet ut fra noen av de 49 forskjellige videoene. Bildene er tatt på ett tidspunkt som illustrerer luftstrømmen over lektene godt. Alle videoene er lastet opp på *Youtube*, hvor det er mulig å studere filmene i større detalj. Her er det opprettet en kanal som heter «*Luftede skrå tretak 2018*». Ved å søke på dette er det mulig å finne samtlige filmer. Filmene er navngitt på følgende måte:

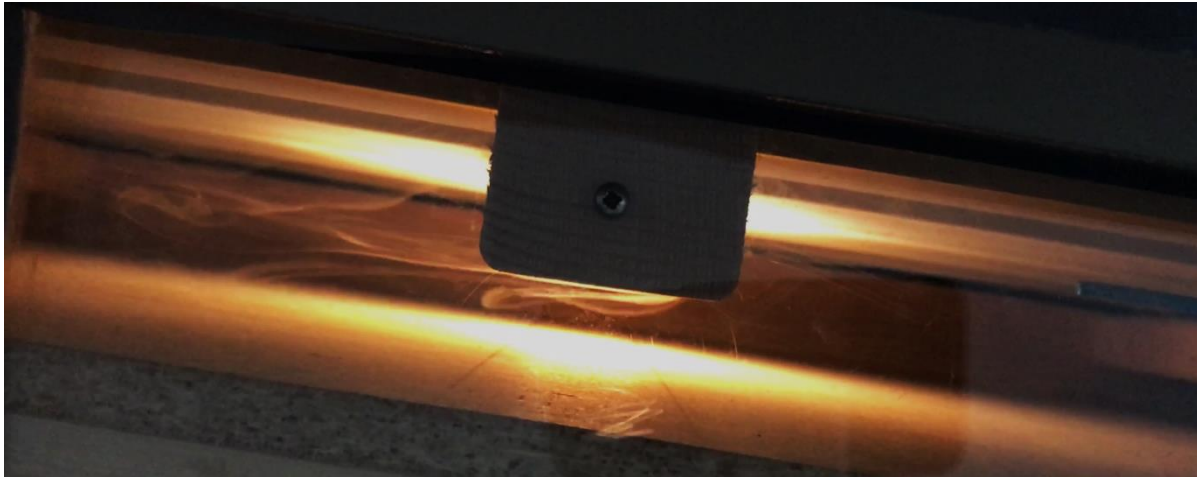
- TRP. 48 mm Rett V0 2.

Dette betyr at det er film av TRP takplaten med 48 mm sløyfedyde, med rettkantet steinlekt og en hastighet på 0,2 m/s. Filmer av Ambassador takplaten er navngitt med AM.

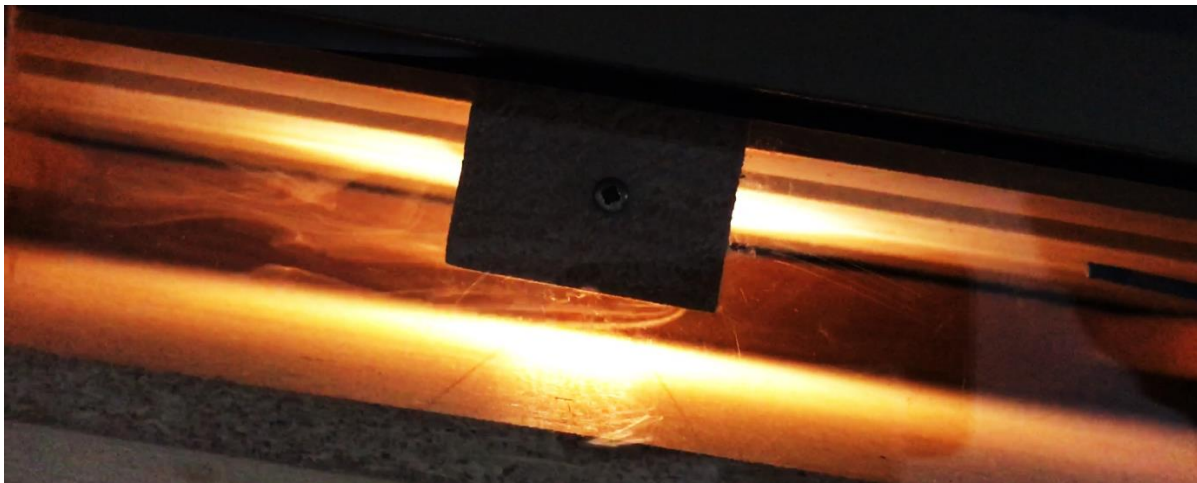
5.3.1. TRP

I første omgang ble det utført røykforsøk med TRP takplaten. Under har vi et utdrag med bilder fra forsøkene som forfatterne mener illustrerer luftstrømmen over de forskjellige lektene godt. Bildene sammenligner røyken over justerte mot rette lekter med samme sløyfehøyde. Det er derfor to bilder per sløyfehøyde, og seks bilder totalt.

Justert og rettkantet steinlekt med 23 mm sløyfehøyde og lufthastighet på 0,2 m/s

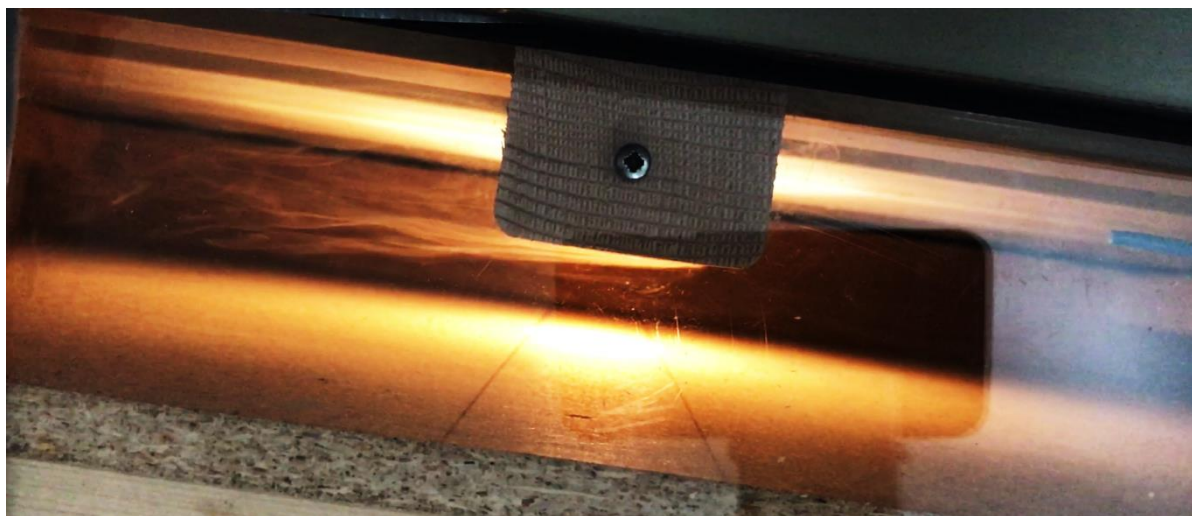


Figur 5.13 Justert 36 x 48 mm, 23 mm sløyfehøyde, 0,2 m/s

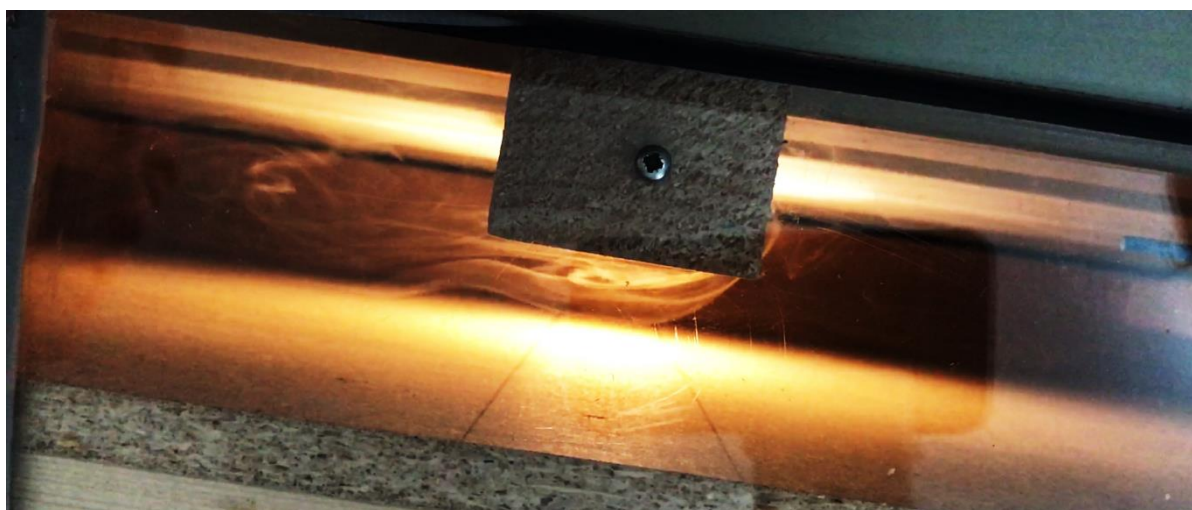


Figur 5.14 Rettkantet 36 x 48 mm, 23 mm sløyfehøyde, 0,2 m/s (28s)

Justert og rettkantet steinlekt med 36 mm sløyfehøyde og lufthastighet på 0,2 m/s

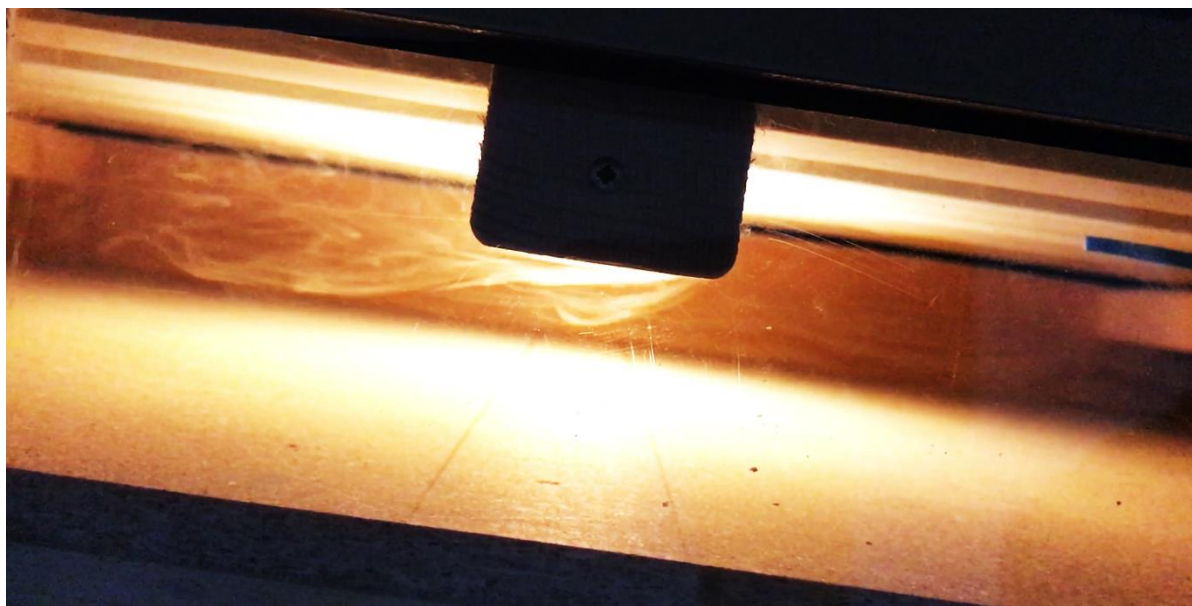


Figur 5.15 Justert 36 x 48 mm, 36 mm sløyfehøyde, 0,2 m/s

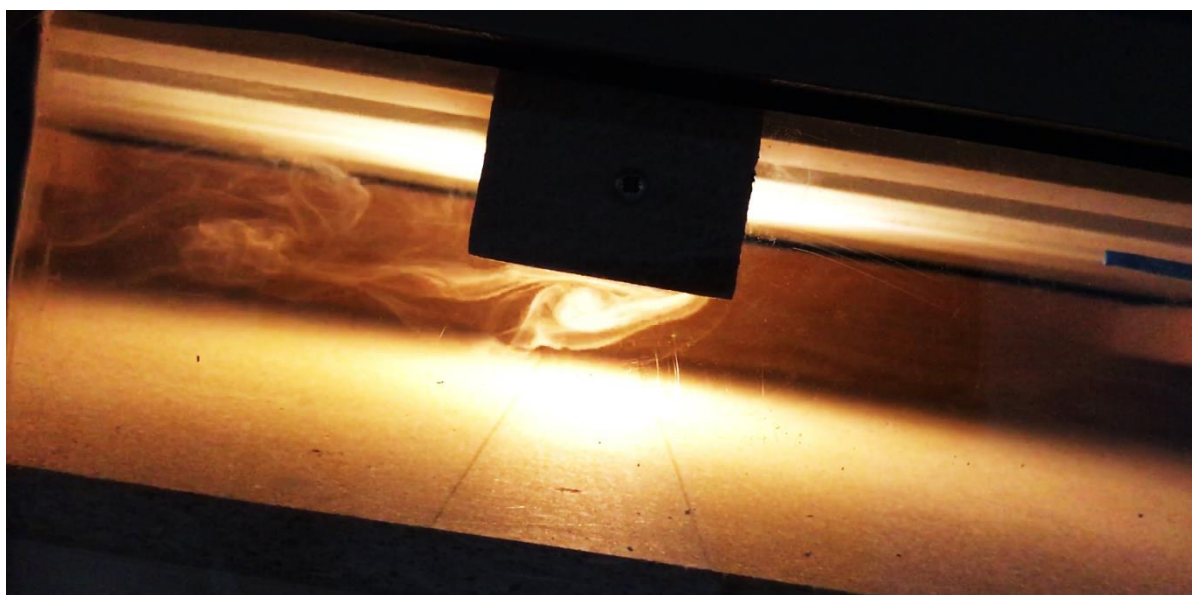


Figur 5.16 Rettkantet 36 x 48 mm, 36 mm sløyfehøyde, 0,2 m/s

Justert og rettkantet steinlekt med 48 mm sløyfehøyde og lufthastighet på 0,2 m/s



Figur 5.17 Justert 36 x 48 mm, 48 mm sløyfehøyde, 0,2 m/s

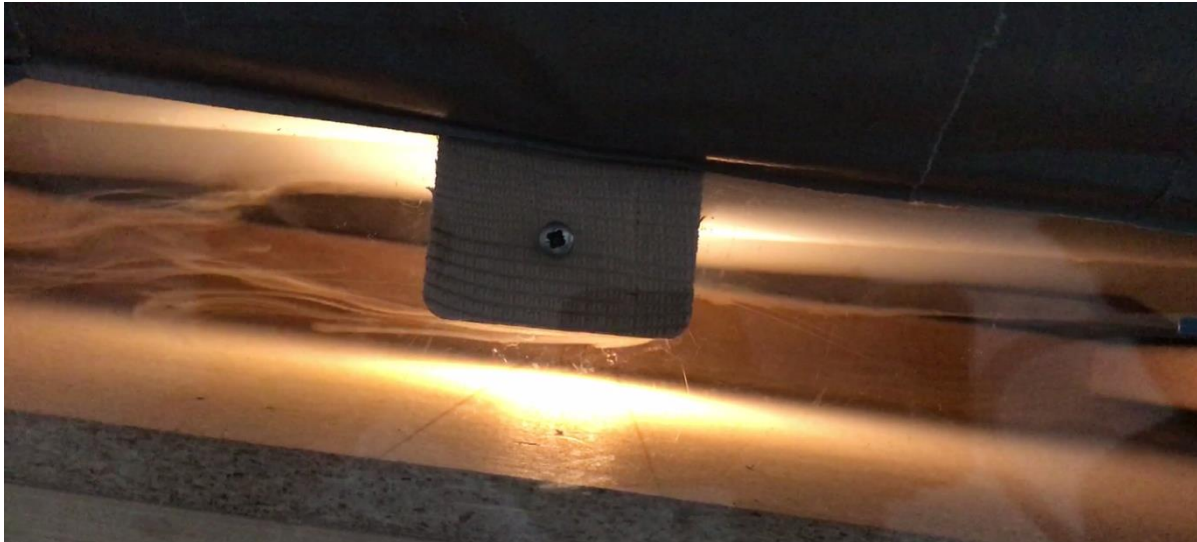


Figur 5.18 Rettkantet 36 x 48 mm, 48 mm sløyfehøyde, 0,2 m/s

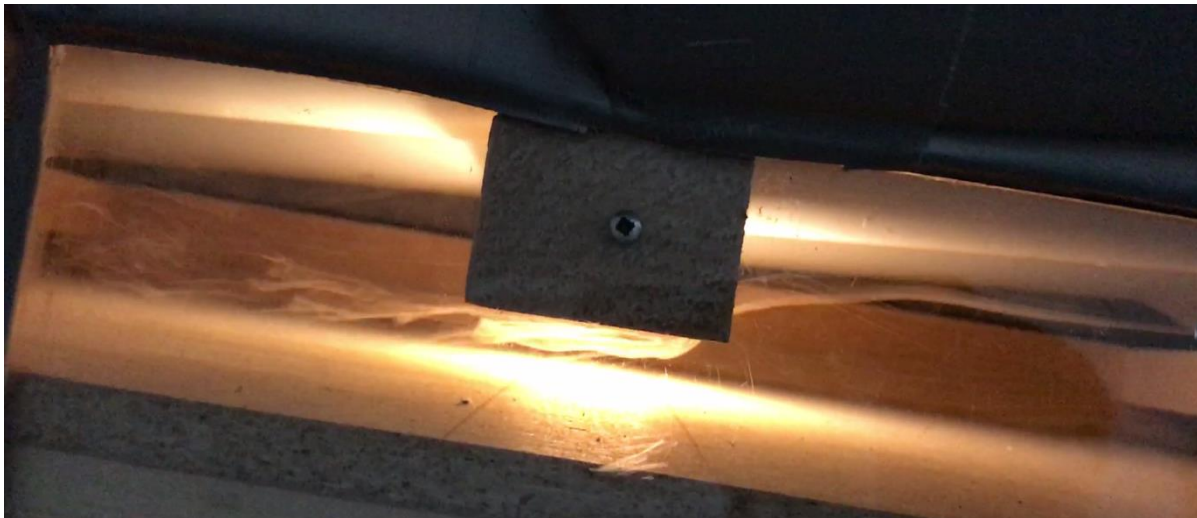
5.3.2. Ambassador

Videre ble det utført røykforsøk over takflaten utstyrt med Ambassador takplate. Bildene presentert sammenligner også her røyken over justerte mot rette leker med samme sløyfehøyde, to bilder per sløyfehøyde, seks bilder totalt. Navngitt med sløyfehøyde og lekteutforming.

Justert og rettkantet steinlekt med 23 mm sløyfehøyde og lufthastighet på 0,2 m/s



Figur 5.19 Justert 36 x 48 mm, 23 mm sløyfehøyde, 0,2 m/s



Figur 5.20 Rettkantet 36 x 48 mm, 23 mm sløyfehøyde, 0,2 m/s

Justert og rettkantet steinlekt med 36 mm sløyfehøyde og lufthastighet på 0,2 m/s



Figur 5.21 Justert 36 x 48 mm, 36 mm sløyfehøyde, 0,2 m/s



Figur 5.22 Rettkantet 36 x 48 mm, 36 mm sløyfehøyde, 0,2 m/s

Justert og rettkantet steinlekt med 48 mm sløyfehøyde og lufthastighet på 0,2 m/s



Figur 5.23 Justert 36 x 48 mm, 48 mm sløyfehøyde, 0,2 m/s



Figur 5.24 Rettkantet 36 x 48 mm, 48 mm sløyfehøyde, 0,2 m/s

6. Diskusjon

6.1. Raftekasser og fluenett

6.1.1. Raftekasser

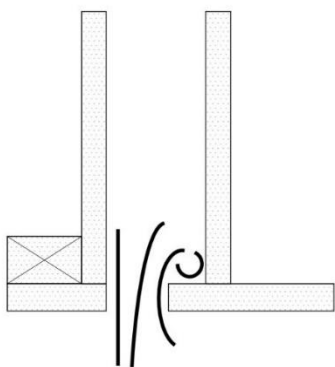
Raftekasse 1 (Figur 5.1) viser en tilnærmet lineær økning i støttapet ved økende dynamisk trykk for både 30 mm og 50 mm spalteåpning. For trykk under 0,1 Pa blir differansen i støttapskoeffisienten (ξ) mellom spalteåpningene mindre. Ved disse trykkene er lufthastigheten gjennom spalten lav og det kan gi større feil ved målingene.

Forsøkene med Raftekasse 2 (Figur 5.3) viser en lignende lineær sammenheng mellom støttapskoeffisienten og økt dynamisk trykk. Ved lave trykk er det større variasjoner i tapskoeffisientene, dette flater så ut ved stigende trykk. For den største spalteutformingene (50 + 48 mm) blir støttapet lavere ved trykk over 0,2 Pa, i motsetning til Raftekasse 1 hvor tapene kun økte ved stigende trykk.

Det fremgår fra samtlige testede raftekasser at mindre spalteåpning vil gi mindre støttap ved innløpet. Spalteåpning på 30 mm gir det laveste støttapet ved samtlige dynamiske trykk i begge utformingene. Dette skyldes sannsynligvis at større spalteåpninger gir et større luftvolum som skal passere gjennom spalten per tid. Videre fører dette til mer turbulent strøm ved spalteåpnings innløp.

Sammenligner man støttapene mellom utformingene kommer det frem at Raftekasse 2 presterer bedre for alle dynamiske trykk over 0,05 Pa. Dette gjelder både for løsningen med 30 mm og 50 mm spalteåpning som er direkte sammenlignbare med Raftekasse 1. Grunnen til at Raftekasse 2 gir best resultat er trolig at den har en kontinuerlig spalte gjennom kassen. Dette medfører at luften ikke går gjennom en volumutvidelse før en ny innsnevring på vei gjennom kassen.

Det er også interessant at Raftekasse 2 med de to løsningene på 30 mm (30 + 36 og 30 + 48 mm) spalteåpning presterer såpass ulikt. Løsningen med 30 + 48 mm gir sannsynligvis større tap fordi luften som går gjennom spalten får en momentan utvidelse rett etter spalten. Dette fører til turbulent strømning på spaltens overside (Figur 6.1 illustrerer teoretisk luftbevegelse gjennom spalteåpningen 30 + 48 mm).



Figur 6.1 Teoretisk luftstrøm gjennom spalteåpning på 30 mm, inn bak takrennen, med åpningsbredde på 48 mm. Tverrsnittsendringen fører til turbulente luftstrømninger.

Det er nærliggende å tro at dette også begrunner hvorfor 30 + 48 mm og 36 + 36 mm gir så like trykktap. Resultatene ellers viser at mindre spalteåpning gir lavere tap. Likevel presterer disse to løsningene tilnærmet identisk ved alle målte dynamiske trykk til tross ulik spalteåpning. Dette kommer mest sannsynlig av det kontinuerlige tverrsnittet i utformingene 36 + 36 mm hvor luften ikke får den turbulente strømningen ved innløpet som vist i Figur 6.1.

6.1.2. Fluenett

Det er store variasjoner i nettens prestasjon ved ulike dynamiske trykk. Alle tre nettene har en betydelig høyere tapskoeffisient ved lave trykk. Av grafene kommer det frem at nettet med minst åpningsgrad (Nett 1) har minst økning i støttapet ved de laveste trykkene. Her krysser også grafene til Nett 1 og 2. Dette kan ha med nettets utforming å gjøre. Selv om Nett 1 har lavest åpningsgrad har det de største maskene (2,29 x 1,75 mm). Det er derfor nærliggende å tro at større masker vil gi luften mindre motstand ved lave hastigheter enn de mer finmaskede nettene, tross lavere åpningsgrad.

Ved økende dynamisk trykk blir det en tydelig trend-linje med Nett 1 og 3. Begge nettens tapskoeffisienter synker før de stiger mot de høyeste trykkene, mens Nett 2 kun flater ut ved trykk over 0,4 Pa. Nett 2 er nettet med de største maskene i forhold til tråddiameteren. Dette kan være fordi utformingen i aluminium gjør det mulig å lage mindre tråddiameter, som igjen er årsaken til den lineære støttapskoeffisienten etter 0,4 Pa.

6.1.3. Skjørheten til nettene

Det ble observert en stor forskjell i hvor robuste nettene var ved håndtering. Rapportens best presterende fluenett var Nett 2 (aluminium) som også var testens minst skjøre nett. Dette gjorde arbeidet med kutting og montering av nettet betydelig enklere. Det er en mulighet at dette nettet presterer bedre på grunn av enklere og dermed bedre montering.

Nett 3 (nylon) som var det skjøreste, mistet sin opprinnelige rutestruktur ved kutting. Etter flere forsøk ble det til slutt tilfredsstillende montert i raftekassen, dog ikke helt uten endringer i strukturen. Dette kan med stor sannsynlighet føre til høyere støttap ved at områder ble mindre perforerte. Samtidig som andre områder av nettet ble mer perforerte og trolig slipper gjennom mer luft. Videre kan dette føre til at det blir store nok hull i nettet til at innsekter kan ta seg inn.

Nett 3 har også størst støttap ved samtlige dynamiske trykk, til tross for at det har størst åpningsgrad (75%) av rapportens tre nett. Nett 1 (PE-plast) som var det groveste nettet, hadde en forholdsvis stabil struktur. Nettet endret ikke på maskestørrelsene under bearbeiding og montering.

6.2. Takplater og lekter

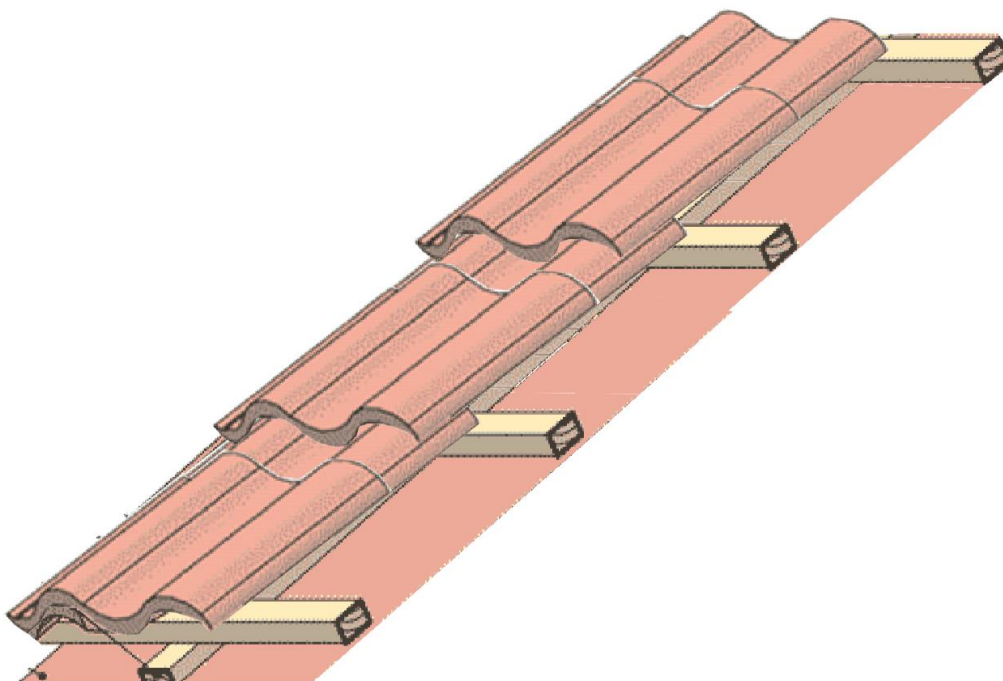
6.2.1. Areal over steinlekter

Det er av interesse å se på arealet over steinlektene for å forstå strømningsbildet i luftespalten. TRP platen har seks topppunkter over takplanet hvor alle er $7,5 \text{ cm}^2$. Ambassador platen har et mer utfordrende tverrsnitt, med tre topppunkter over takplantet. Tverrsnittet ble forenklet til tre trekantede målene $20 \times 4 \text{ cm}$ for å beregne arealet. Arealet over steinlektene er presentert i Tabell 6.1.

Tabell 6.1 Areal over steinlekter, takplater

Takplate	TRP	Ambassador
Totalt areal over en steinlekt	45 cm^2	120 cm^2

Tabell 6.1 viser at taksteinsplaten Ambassador har et areal over steinlektene som er nesten tre ganger større enn trapesplaten. Arealet befinner seg i tre store kanaler, mens i TRP platen er arealet jevnt fordelt utover planet med seks mindre kanaler. I tillegg har Ambassador platen ikke en kontinuerlig flate. Dette skyldes at takstein skjøtes over steinlekter som fører til at platen har en innsnevring før en utvidelse over hver steinlekt. Endringen i tverrsnittet fører med stor sannsynlighet til turbulent strømming i området etter. Figur 6.2 viser hvordan takstein legges og hvorfor takplaten er utformet med en endring i tverrsnittet over hver lekt.



Figur 6.2 Takstein som skjøtes over steinlekter Figur: Olaf Røer

Dette kan være årsaken til at toppmålingene fra Ambassador platen gir inkonsekvente resultater. Samtlige grafer i toppmålingen fra platen krysser minst en annen konfigurasjon i forsøksoppsettet, og det er vanskelig å tegne et bilde av hvordan luftstrømmen oppfører seg ut fra målingene.

6.2.2. Toppmåling vs. Bunnmåling

For å øke forståelsen av strømningsbildet over takflaten ble det benyttet to målepunkter ved raftekassen og to ved mønekassen. Formålet med disse var å undersøke om det var variasjoner i trykktapet ved forskjellige plasseringer i luftespalten.

TRP

Ved å studere resultatene for TRP platen fremgår det en tydelig korrelasjon mellom verdiene for topp- og bunnmålingen mellom 0,2 Pa og 0,4 Pa. Ved disse trykkene gir målepunktene tilnærmet like resultater. Dette kan forklares med at økte dynamiske trykk vil gi turbulente strømminger i store deler eller hele spaltetverrsnittet og dermed bortimot samme støttap uansett plassering i spalten.

Ved lavere trykk blir spredningen av støttapene langt større ved toppmålingene. Sannsynligvis fordi strømmen er laminær i store deler av spalten og de turbulente strømmingene som oppstår ved disse lave trykkene er veldig lokale. Ut fra målingene er det nærliggende å tro at disse turbulente strømmingene oppstår i topppunktene av platen etter luften har passert en steinlekt. Dette begrunnes med at luftstrømmen her er preget av luft som passerer i det reduserte arealet over lekten. Luften som passerer under lekten får en betydelig mindre reduksjon i spaltetverrsnittet og vil strømme langt mer laminært. Det er trolig derfor resultatene fra bunnmålingene har liten variasjon selv ved de laveste dynamiske trykkene.

Det fremgår fra toppmålingene at luften som passerer i det reduserte tverrsnittet over lektene får en betydelig mer laminær strøm ved bruk av justerte lekter. Ved lave trykk er skillet mellom lektene bemerkelsesverdig stort. Dette kommer av at det reduserte tverrsnittet i kombinasjon med rette lekter gir turbulente strømmer i toppen av plateprofilet selv ved lave trykk. De justerte lektene sørger for laminær strømming ved disse trykkene og dermed et langt mindre støttap.

Ambassador

Sammenligner man trykktapene over Ambassador platen ved topp- og bunnmålingen ser man også her at resultatene blir mer samlet ved de høyeste trykkene. Likevel har resultatene her større spredning enn ved utformingen med TRP. Det er antakelig platens ikke-kontinuerlige tverrsnitt som påvirker dette. Selv om strømmingen i spalten preges av turbulente strømminger ved disse trykkene vil de gjentakende tverrsnittsendringene gi større tap. Disse endringene i tverrsnittet medfører at det er vanskeligere å forstå strømningsbildet under Ambassador platen.

Det skal også merkes at toppmålingene har mindre spredning enn bunnmålingen ved alle dynamiske trykk i motsetning til TRP platen. Dette skyldes antakelig platens geometri. Bunnmålingene blir gjort i et lite bunnpunkt som befinner seg mellom to av de tre store kanalene i platen tverrsnitt. Strømningsbildet her er trolig preget av store variasjoner og retningsforandringer i luftstrømmen.

Merk at de tre utformingene med justert lekt ender opp med de laveste tapskoeffisientene ved de høyere dynamiske trykkene både ved topp og bunnmålingene.

6.2.3. Lufthastigheter

Lufthastighetene i rapporten blir kontrollert ved hjelp av hvor stor volumstrøm som går gjennom måleblenden. Disse volumstrømmene er beregnet ut fra luftespaltens tverrsnittsareal. Arealene som er brukt til hastighetsberegninger tar ikke høyde for arealene over steinlektene. Dette medfører at arealet som er brukt til å beregne volumstrømmen er mindre enn spaltens faktiske areal. Hastighetene som er oppgitt vil derfor være noe høyere enn den faktiske strømningshastigheten i luftespalten. Forskjellene vil være størst ved 23 mm sløyfehøyde fordi arealet over steinlektene da er større i forhold til det arealet benyttet ved beregning av lufthastigheten enn ved større sløyfehøyder. Takplatenes variasjon i areal over steinlekten medfører at det vil være en forskjell i strømningshastigheten mellom de to takplatene.

6.2.4. Friksjonstap

Arealet over steinlektene påvirker også målingene av friksjonstapet. Lavere lufthastighet gjennom spalten vil gi et lavere friksjonstap enn det ville gjort ved høyere lufthastighet. Dette gjelder spesielt ved større sløyfehøyder hvor friksjonstapene er minimale. Det kan diskuteres om denne feilkilden blir mindre vet at både målingene av friksjonstap og støttap er gjort ved litt lavere hastigheter enn tiltenkt.

6.2.5. Egenlekkasje

Det ble brukt mye tid gjennom forsøkene på å kontrollere egenlekkasjen. Lekkasjen ble kontrollert ved samtlige endringer av variabler i forsøkene. Kun når egenlekkasjen var under 1% ble forsøkene igangsatt. Dette medførte som regel en betydelig mengde arbeid med teiping av skjøter før modellen hadde tilfredsstillende lufttetthet. Arbeidet med å kontrollere og utbedre egenlekkasjen er essensielt for at målingene skal gi valide resultater og usikkerheten fra lekkasjer skal bli tilfredsstillende liten. (Vedlegg 4 beskriver utføringen av egenlekkasjetester)

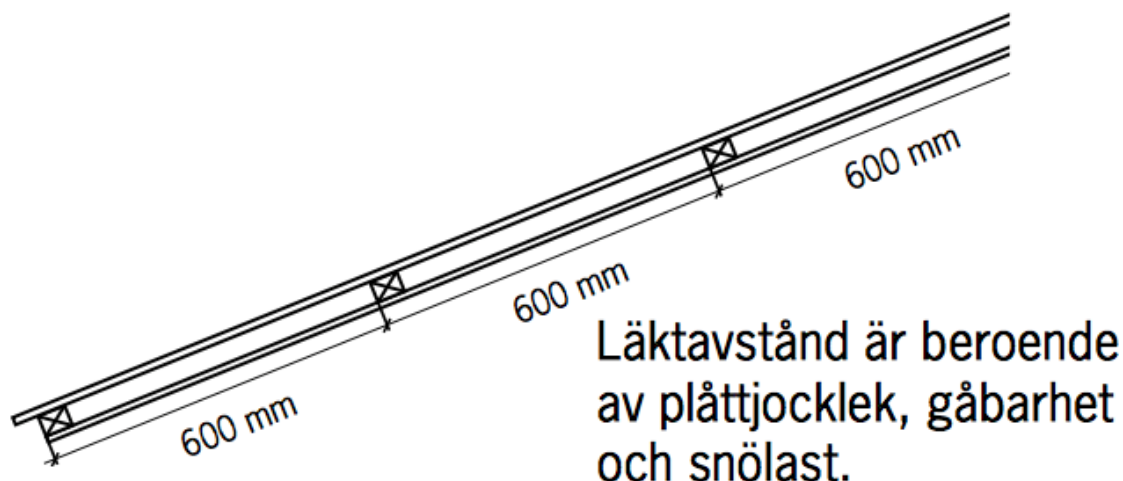
6.2.6. Sammenligning av takplater

Takplatene TRP og Ambassador vil mest sannsynlig aldri bli direkte vurdert mot hverandre. Begrunnelsen for dette er at platene har vidt forskjellige bruksområder. TRP-plater er mest brukt på industribygg og større bygninger, mens Ambassador er en eksklusiv takplate som blir brukt på boliger og mindre hus.

Platene ble likevel valgt å sammenligne fordi profilene er så forskjellige og det var interessant å se hvordan dette påvirket strømningsbildet i luftespalten.

6.2.7. Montering TRP

Monteringsanvisningen til den benyttede TRP platen anbefaler en avstand mellom steinlektene på 600 mm (Figur 6.3). Det står videre at det avhenger av tykkelse på platen, snølast og hvorvidt det skal gås mye på taket eller ikke. Gjennom forsøkene er det benyttet en lekteavstand på 350 mm da dette er normen ved legging av takstein, og resultatene fra platene skal være direkte sammenlignbare.



Figur 6.3 Monteringsanvisning TRP (ARMAT, 2018a)

Lekteavstanden er verdt å merke seg da en avstand på 600 mm nesten ville halvert antall lekter over takflaten. Det er nærliggende å tro at dette ville gitt ett mindre trykktap over takflaten. Derimot kan det hende at støttapskoeffisienten til hver enkelt lekt ville økt ved et mindre antall lekter. I følge Kronvall (1980) vil en kort distanse mellom to motstander i en luftstrøm før til en reduksjon av den totale tapskoeffisienten gitt av de to motstandene.

6.2.8. Lektestørrelse 30 vs 36

I anbefalinger gitt i Byggforskserien er det tilstrekkelig med lektestørrelser i dimensjonen 30 x 48 mm for de fleste tak. Dessverre var det ingen byggevarehus i Trondheimsområdet som leverte denne lektedimensjonen med justert utforming. Dermed ble lektedimensjonen 36 x 48 mm benyttet i rapporten, da dette var mulig å få tak i.

6.2.9. Hjørneradius på justert lekt

De justerte lektene benyttet i rapporten er høvlet i hjørnene til en radius på 4 mm. Det er usikkert om dette er en standard eller om justerte lekter kommer i flere utforminger avhengig av leverandøren. Ved utarbeidelse av rapporten ble det kontaktet flere sagbruk for å høre om det var en standard utforming av justerte lekter. Av de kontaktede sagbrukene var det kun et fåtall som faktisk leverte justerte lekter, og ingen av dem hadde tall på hvor mye hjørnene var høvlet.

6.2.10. Usikkerhet ved lave trykk

De laveste brukte dynamiske trykkene ligger mellom 0,05 Pa og 0,1 Pa. Disse trykkene kan bety økt målefeil på grunn av nøyaktigheten til måleblenden og svingninger i omkringliggende luft. Ned i denne hastigheten vil målenøyaktigheten til mikromanometrene ligge på <0,25%. Denne usikkerheten vil bli størst ved lave sløyfedyder da volumstrømmen gjennom spalten er mindre.

6.3. Røykforsøk

Røykforsøkene gjennomført til rapporten er ment til å framheve luftstrømningen over en steinlekt. Ved å studere filmene av forsøkene er det blitt hentet ut et utvalg bilder som skal illustrere luftstrømmen best mulig. Det anbefales å se de valgte filmene for å få et bedre inntrykk av strømningsbildet.

Figur 6.5 viser at røyken får en betydelig nedbøyning i det den treffer den rettkantete steinlekten. Figuren viser TRP takplaten med rettkantet lekt med 48 mm sløyfehøyde og lufthastighet på 0,2 m/s. Nedbøyningen ser ut til å være i samsvar med Figur 2.13 der det vises til at man får et lokalt trykktap når det er en reduksjon i kanalverrsnittet.

For den rettkantete lekten under TRP platen (Figur 6.5) oppstår det turbulente strømningsforløp etter at luftstrømmen har beveget seg forbi den første tverrsnittendringen (B1). Etter steinlekten (B2), er det en ekspansjon av luftspaltens tverrsnittareal. Dette resulterer i nye turbulente strømningsforløp i området bak lekten. En sammenligning av det teoretiske strømningsforløpet vist i Figur 2.14 og det faktiske strømningsforløpet i Figur 6.5 beviser at luftstrømmen i spalten oppfører seg likt i praksis som i teorien. Bildet illustrerer godt hvordan luftstrømmen beveger seg forbi steinlekten ved et lavt dynamisk trykk, og turbulensen som oppstår ved en innsnevring etterfulgt av en utvidelse av tverrsnittet.

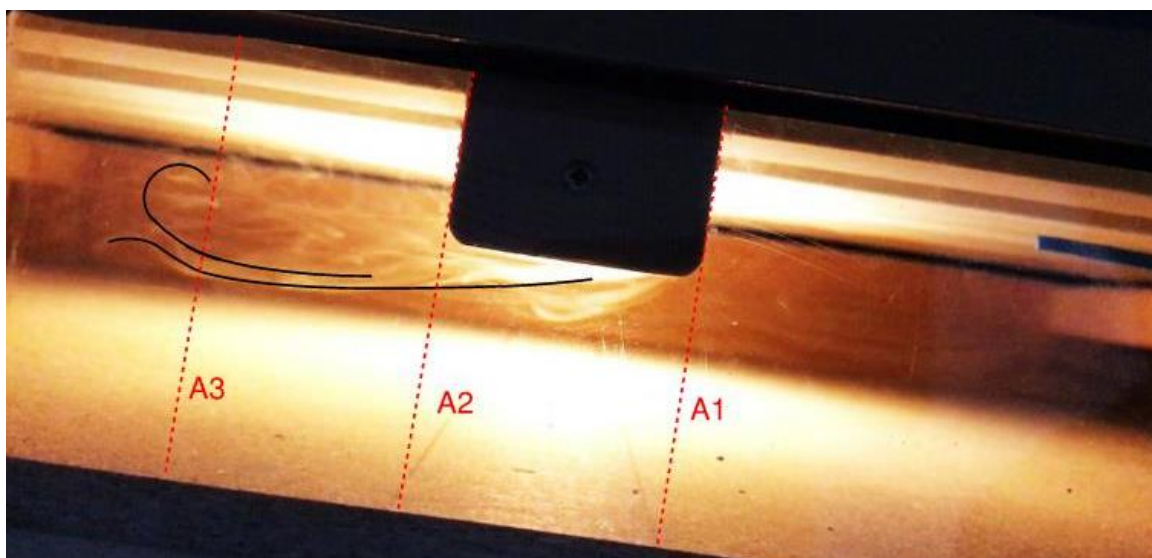
Figur 6.4 viser den samme sløyfehøyden, lufthastigheten og takplaten som Figur 6.5, men her med en justert lekt. Denne utformingen har ingen turbulens i luftstrømmen rett etter tverrsnittendringen ved A1. Luftstrømmen her har mindre nedbøyning i det den treffer steinlekten sammenlignet med utformingene med rettkantet lekt. Dette kan forklares med støtte i teorien til Idelchik and Steinberg (1996), hvor de understreker at det å benytte motstander med runde hjørner vil gi et lavere trykktap, og en tilnærmet laminær strøm.

Luftstrømmen etter den justerte lekten (A2-A3) fremgår som tilnærmet laminær (Figur 6.4). I det luften passerer A3 oppstår det kortvarige turbulente strømningsforløp. Dette kan begrunnes med at luften som har passert over steinlekten blandes med luften som har passert under lekten i dette området og påvirker strømmens bevegelser. Det skal også merkes at luften ikke blir liggende igjen bak den justerte lekten, men beveger seg raskt videre bortover luftespalten.

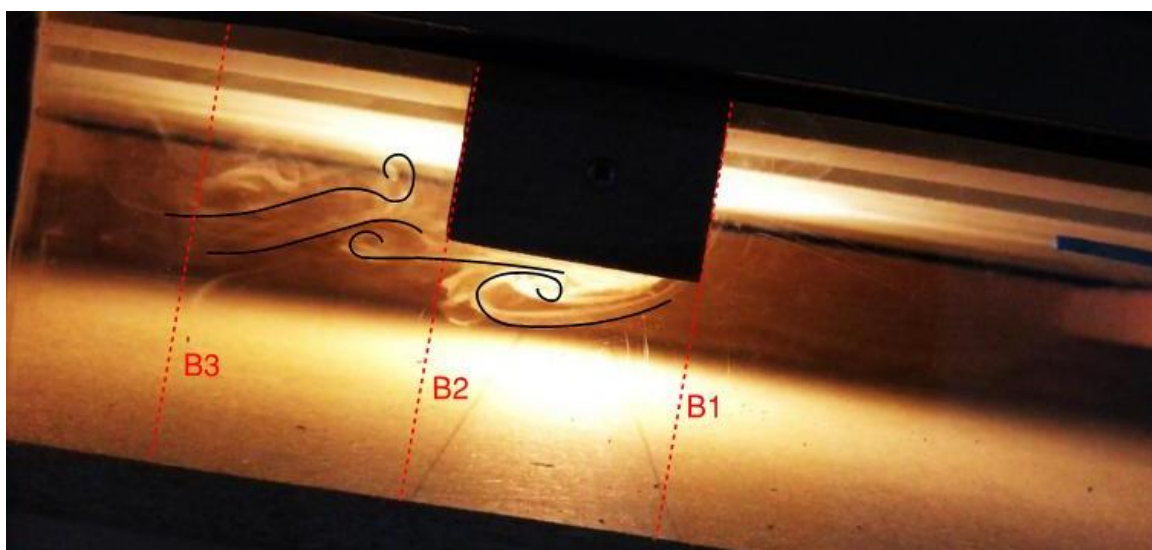
Figur 6.5 viser at luften etter den rette lekten (B2-B3) oppfører seg annerledes. Her kommer det frem at luften i større grad er turbulent i området etter lekten. I tillegg blir luften liggende å sirkulere bak lekten over lengere tid. Også her oppfører strømningsbildet seg på samme måte som beskrevet i Figur 2.14.

Figur 6.6 viser samme situasjon som Figur 6.5, men her er takplaten Ambassador benyttet. Denne platen har over 2,5 ganger større tverrsnittsareal over steinlektene. Luftstrømmen under steinlekten oppfører seg på samme måte i begge situasjonene med rettkantet lekt, men tilførselen av luft fra oversiden av lekten er betraktelig større i Figur 6.6. Dette kommer tydelig frem i området C2 – C3, hvor luften fra oversiden av lekten bidrar til turbulente bevegelser. Den store luftmengden fra lektens overside bidrar også til at det blir liggende langt mindre luft bak lekten enn ved bruk av TRP platen. Dette kan være grunnen til at Ambassador gir langt mindre tap enn TRP platen ved utformingen 48 mm sløyfehøyde, 0,2 m/s, rettkantet lekt.

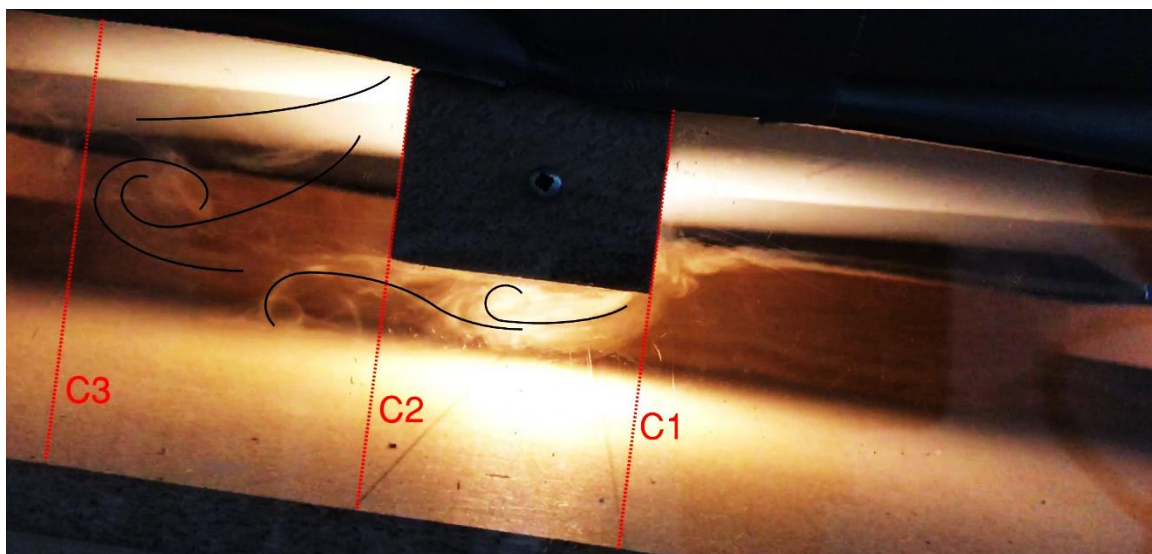
Det kommer tydelig frem fra alle figurene at den justerte lekten gir langt mer laminært strømningsbilde enn de rette lektene.



Figur 6.4 TRP – Justert lekt med sløyfehøyde 48 mm og lufthastighet på 0,2 m/s

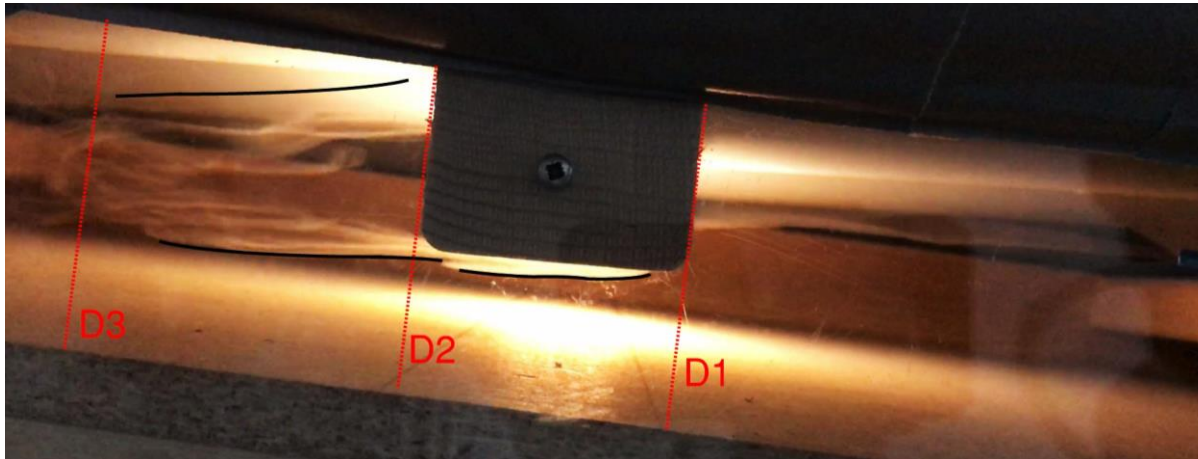


Figur 6.5 TRP – Rettkantet lekt med sløyfehøyde 48 mm og lufthastighet på 0,2 m/s

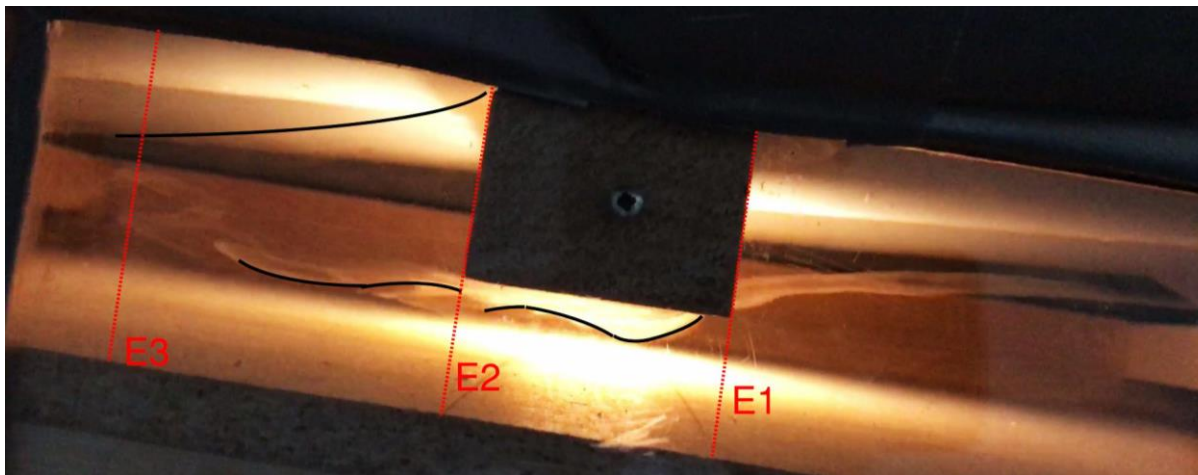


Figur 6.6 Ambassador – Rettkantet lekt med sløyfehøyde 48 mm og lufthastighet på 0,2 m/s

Det er gjort mange forsøk over takflaten (48 variasjoner). Alle variasjonene fører til at det også er eksempler der luftstrømmen for lekteutformingene oppfører seg forholdsvis likt. Ved lavere sløyfehøyde har strømningsbildet vist seg å være likere mellom de to lekteutformingene. Dette kan skyldes at volumstrømmen er mindre ved lav sløyfehøyde. Figur 6.7 og Figur 6.8 viser nettopp dette. Strømmen for begge situasjonene er tilnærmet laminær i områdene D2-D3 og E2-E3. Den største forskjellen skjer mellom D1-D2 og E1-E2 hvor den rettkantede har en kraftigere nedbøyning rett etter luften passerer den første tverrsnittendringen i E1. Denne nedbøyningen er tydelig mindre for den justerte lekten (D1).



Figur 6.7 Ambassador – Justert lekt med sløyfehøyde 23 mm og lufthastighet på 0,2 m/s (utklippet ved 3 sek)



Figur 6.8 Ambassador – Rettkantet lekt med sløyfehøyde 23 mm og lufthastighet på 0,2 m/s (utklippet ved 23 sek)

Det er kun hentet ut bilder fra det laveste benyttede dynamiske trykket. Begrunnelsen for dette er at høyere trykk gir langt høyere hastighet i spalten og mer turbulent strøm i hele spalten. Dette gjør det vanskelig å illustrere strømningsforløpet ut fra ett enkelt bilde.

6.3.1. Varme fra lyspære

Lyspæren som er benyttet i forsøkene er av typen LED. Disse lyspærene består av flere lysdioder og har mye høyere virkningsgrad enn gamle lyspærer med glødetråd. LED-pærene omsetter ca. 80% av energien til lys og resten til varme, mens en pære med glødetråd omsetter omkring 5% til lys (Rosvold, 2018). LED-pærer gir derfor mer lumen (lys) per watt enn eldre lyspærer, og langt mindre varme. Den valgte pæren gir 90 lumen med 1,5 watt (Figur 6.9 og Figur 6.10).

Det er usikkert om en lyspære i planet vil skape en lokal oppvarming av konstruksjonen og luften i spalten. En pære med lav effekt er derfor å foretrekke.

Selv om varmeproduksjonen er minimal ble lyspæren skrudd av mellom forsøk hvor det skulle gjøres endringer av prøveparametere. På denne måten ble lampen ikke stående på mer enn noen minutter av gangen, og varmeproduksjonen holdt til et minimum.



Figur 6.9 LED-pære emballasje front



Figur 6.10 LED-pære emballasje bak

7. Konklusjon

Laboratoriemålingene har avdekket en betydelig forskjell i støttapskoeffisienten over en steinlekt avhengig av lektens utforming. Målingene viser en gjennomsnittlig reduksjon av støttapskoeffisienten på 30% ved å bruke justerte steinlekter. Størst reduksjon ble målt ved bruk av trapesplater (TRP) som takteking. Her ble det målt en gjennomsnittlig reduksjon på 35%. Det kommer tydelig frem gjennom målingene at bruk av justerte steinlekter vil gi en betydelig reduksjon av trykkfallet over en takflate, uansett takteking.

Røykforsøkene viser også store forskjeller i strømningsbildet ved ulik utforming av steinlekten. Utforminger med rettkantet steinlekt får tydelige turbulente strømningsbilleder under og bak lekten, som begrunner den målte reduksjonen i støttap ved bruk av justert lekt. Variasjoner i luftstrømmen ved bruk av ulike takplater, sløyfehøyder og hastigheter blir også godt illustrert gjennom disse forsøkene. Røykforsøkene beviser strømnings teorien i praksis ved at strømningsbildet som oppstår er som forventet.

Det ble vist at den høyeste sløyfehøyden (48 mm) gir en reduksjon i støttapskoeffisientene over steinlektene ved de aller fleste dynamiske trykk. Merk at tilfeller der høyden på steinlekten (36 mm) er lik sløyfehøyden ser ut til å gi turbulente strømningsforløp ved bruk av takstein.

Forsøkene med raftekasser viser at støttapet over kassen i stor grad blir bestemt av spalteåpningen. Samtlige målinger viser et høyere tap med større spalteåpning. Det kommer også frem at et kontinuerlig spaltetverrsnitt (ingen utvidelser eller innsnevring) gjennom raftekassen er å foretrekke for å redusere trykktapet.

Det ble gjort målinger med ulike fluenett for å se hvordan ulike produkter med ulik oppbygning påvirker støttapet. Målingene av ulike nett viser ingen direkte sammenheng mellom åpningsgrad og støttap. Derimot ble det observert en sammenheng mellom nettens skjørhet og trykktap, da nettene som var mindre skjøre ved håndtering ga vesentlig lavere tap.

8. Videre arbeid

Hovedmålet i arbeidet med denne rapporten har vært å utarbeide ytterligere kunnskap vedrørende moderne skrå tretak. Det har blitt presentert tiltak til forbedringer, men enkelte områder kan fortsatt arbeides videre med. For å gi ytterligere kunnskap om luftstrømmen gjennom luftespalten foreslås det å arbeide videre med laboratoriemodellen med følgende emner:

- Det ble bevist store forskjeller i strømningsbildet ved ulike taktekkinger. Derfor anbefales videre forsøk med flere taktekkinger. Spesielt taktekkning med et større tverrsnittareal (eks. sinusprofil, YX35-130-780 med kontinuerlig tverrsnittareal over flaten på $\sim 170 \text{ cm}^2$) over steinlekten vil være av interesse da disse gir større variasjoner i strømningsforløpet.
- Taksteinsplaten Ambassador har vist at det er store variasjoner i trykktapet målt ved ulike posisjoner i spaltetverrsnittet. Flere nippelplasseringer for måling av trykktap langs taktekkings tverrsnitt vil kunne øke forståelsen og strømningsbildet til luftstrømmen under disse tekkningene.
- Avstanden mellom lektene er anbefalt av Byggforskserien til å være 350 mm. For enkelte taktekkinger er det vært interessant å se hvorvidt færre lekter (større lekteavstand) over takflaten påvirker støttapet over hver enkelt lekt.
- I hvor stor grad krysslufting forekommer over takflaten. Modellen må da bygges bredere for å få med for eksempel tre cc600 bredder. Slik kan man observere trykktapet over en større del av takflate med feks. to sløyfelekter.
- Bygninger med store takflater og liten takvinkel er i økende grad i bruk. Forsøk med større steinlekter og høyere sløyfedyder vil kunne bidra til å utfylle manglene de eksisterende retningslinjene ikke har.
- Utforming av justerte lekter ser ut til å variere fra sagbruk til sagbruk og eventuelt mellom ulike lektedimensjoner. Derfor ville det være interessant å måle trykktapet over justerte lekter med ulik radius i hjørnene. Disse forsøkene kan bidra til å standardisere utformingen av justerte lekter.
- I perioder med lave temperaturer er det fare for økt fuktighetsnivå i både luftespalten og konstruksjonen. Undersøkelser av kondensasjonspotensialet til luften i luftspalten vil følgelig være av interesse. Dette under forskjellige temperatur- og fuktighetsnivåer med ulike typer taktekkinger, gjerne dokumentert med timelaps gjennom eksisterende *vindu* i takboksen.

9. Referanser

- ARMAT. 2018a. *Monteringsanvisning* [Online]. Available: <http://media.byggjeneste.no/media/dokument/283389> [Accessed].
- ARMAT. 2018b. *Tak- og veggplater* [Online]. Available: <http://media.byggjeneste.no/media/dokument/283394> [Accessed].
- BIBSYS. 2017. *ORIA* [Online]. Available: <http://www.bibsys.no/hjelp/oria-soketjeneste/hvordan-bruke-oria/> [Accessed].
- BILTEMA. 2018. *Insektsnett* [Online]. Available: <http://www.biltema.no/no/Bygg/Ovrig/Insektsnett-2000031340/> [Accessed].
- BLOM, P. 1991. *Lufting av isolerte, skrå tak*, Oslo, Norges byggforskningsinstitutt.
- BLOM, P. 2001. Venting of attics and pitched, insulated roofs. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 25, 32-50.
- BYGGFORSKSERIEN-421.132 2005. Fukt i bygninger og teorigrunnlag 421.132. Byggforsk.
- BYGGFORSKSERIEN-524.003 2013. Totrinnstetning mot slagregn på fasader. Luftede kledninger og fuger 542.003. Byggforsk.
- BYGGFORSKSERIEN-525.101 2007. Isolerte skrå tretak med lufting mellom vindsperre og undertak 525.101. In: LARSEN, H. J. (ed.). Byggforsk SINTEF.
- BYGGFORSKSERIEN-525.102 2012. Isolerte skrå tretak med kombinert undertak og vindsperre 525.102. In: LARSEN, H. J. (ed.). Byggforsk SINTEF.
- BYGGFORSKSERIEN-525.107 2005. 525.107 Skrå tretak med oppholdsrom på deler av loftet. SINTEF Byggforsk.
- BYGGFORSKSERIEN-544.101 2006. 544.101 Tekking med takstein. Materialer, legging og forankring. SINTEF Byggforsk.
- BYGGFORSKSERIEN-700.100 2010. 700.100 Byggskader. Oversikt. SINTEF Byggforsk.
- BYGGMAKKER. 2018. *Insektsnett Alu 600* [Online]. Byggmakker. Available: <https://www.byggmakker.no/hage-og-terrasse/insektsmidler/insektsnett-alu-600x10m/> [Accessed].
- ÇENGEL, Y. A., TURNER, R. H. & CIMBALA, J. M. 2008. *Fundamentals of thermal-fluid sciences*, Boston, McGraw-Hill.
- EDVARSEN, K. I. & RAMSTAD, T. Ø. 2014. *Trehus*, Oslo, SINTEF akademisk forl.
- FALK, J. 2010. *Ventilerad luftspalt i yttervägg : luftomsättningar och konvektiv fukttransport* [Online]. Available: <https://lup.lub.lu.se/search/publication/1730968> [Accessed].
- FURNESS-CONTROLS. 2018. *IP66 Differential pressure transmitter* [Online]. Available: <https://us.furness-controls.com/product/fco352/> [Accessed 2018].
- GEVING, S. 2011. *Fuktskader : årsaker, utredning og tiltak*, Oslo, SINTEF akademisk forl.
- GEVING, S. & THUE, J. V. 2002. *Fukt i bygninger*, Oslo, Norges byggforskningsinstitutt.
- GOOGLE. 2017. *Google Scholar* [Online]. Available: <https://scholar.google.com/intl/en/scholar/about.html> [Accessed].
- GULLBREKKEN, L. 2018. *Climate adaptation of pitched wooden roofs*. 2018:124, Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering.
- GULLBREKKEN, L., KVANDE, T., JELLE, B. P. & TIME, B. 2016. Norwegian pitched roof defects. *Buildings*.
- GUSTAVSEN, A., NORGES TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE UNIVERSITET INSTITUTT FOR BYGG, A. O. T. & KLIMA 2005. *Snøinndrev i kalde luftede tak - vindtunnelforsøk*, Oslo, Norges byggforskningsinstitutt.
- HANSEN, E. 2015. *Luftstrømning i luftespalter - skrå tretak*. Prosjektoppgave, NTNU.
- HANSEN, E., KVANDE, T. & GULLBREKKEN, L. 2016. Luftstrømning i skrå tretak - Eksperimentelle undersøkelser og numeriske beregninger. NTNU.
- HANSEN, H. E., KJERULF-JENSEN, P., STAMPE, O. B. & DANSK VARME- OG KLIMATEKNISK, S. 2013. *Varme- og klimateknik : grundbog*, Lyngby, DANVAK.
- HANSEN-BAUER, I., FØRLAND, E. J., HADDELAND, I., HISDAL, H., MAYER, S., NESJE, A., NILSEN, J. E. Ø., S. SANDVEN, SANDØ, A. B., SORTEBERG, A. & ÅDLANDSVIK, B. 2015. klima i Norge 2100.
- HOFSETH, V. 2003. *Lufting av skrå isolerte tak*.

- IDELCHIK, I. E. & STEINBERG, M. O. 1996. *Handbook of hydraulic resistance*, New York, Begell House.
- KRIGSVOLL. 2018. *Fluennett* [Online]. Available: <http://www.krigsvoll.no/festemidler-2/netting-og-gjerder-2/fluenetting-nylon-10-m/> [Accessed].
- KRONVALL, J. 1980. Available: <http://lup.lub.lu.se/search/ws/files/4543703/8056052.pdf> [Accessed].
- LISØ, K. R., KVANDE, T. & VINCENT, J. V. 2005. The Robustness of the Norwegian Building Stock—A Review of the Process Induced Building Defects.
- NAKAYAMA, Y. & BOUCHER, R. F. 1999. *Introduction to fluid mechanics*, London, Arnold.
- NEVANDER, L. E. & ELMARSSON, B. 1994. *Fukthandbok : praktik och teori*, Solna, Svensk byggtjänst.
- PYROCONTROL. 2017. *Termoelementer* [Online]. Available: <http://www.pyrocontrol.no/temperaturkatalogen/46-47.pdf> [Accessed].
- ROBERT LISØ, K., OLAV HYGEN, H., KVANDE, T. & VINCENT THUE, J. 2006. Decay potential in wood structures using climate data. *Building Research & Information*, 34, 546-551.
- ROSVOLD, K. A. 2018. LED-belysning.
- SCHETZ, J. A. & FUHS, A. E. 1999. *Fundamentals of fluid mechanics*, John Wiley & Sons.
- THUE, J. V. 2016. *Bygningsfysikk : grunnlag*, Bergen, Fagbokforl.
- TIME, B. 2014. Klima 2050 | Risk reduction through climate adaptation of buildings and infrastructure, Project description for a Centre for Research-based Innovation (SFI). In: INFRASTRUCTURE, S. B. A. (ed.).

Vedlegg

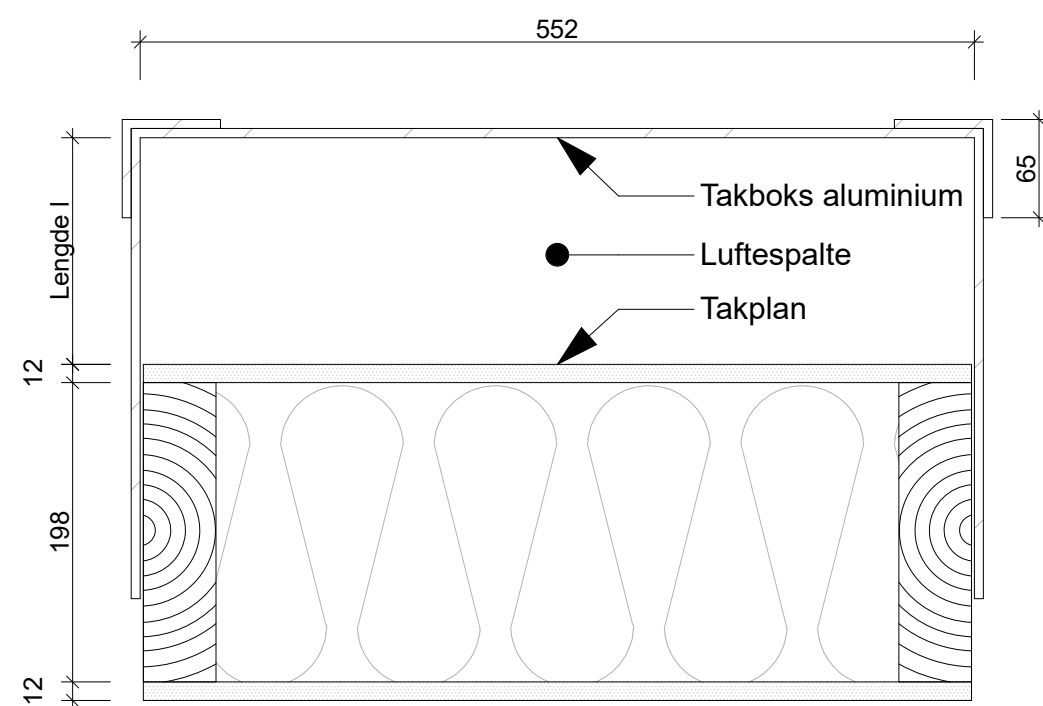
- 1. Detaljtegninger**
- 2. Artikkel**
- 3. Dimensjoner fluenett**
- 4. Egenlekkasje**

Vedlegg 1

Detaljtegninger

- Detalj 1 – Tverrsnitt takplan
- Detalj 2 – Tverrsnitt takplan med Ambassador
- Detalj 3 – Tverrsnitt takplan med TRP
- Detalj 4 – Raftekasse 0
- Detalj 5 – Raftekasse 1
- Detalj 6 – Raftekasse 2
- Detalj 7 – Mønekasse
- Detalj 8 – Tverrsnitt takplan lengderetning
- Detalj 9 – Illustrasjon spalteåpning raft 2
- Detalj 10 – Sammenligning takbokser
- Detalj 11 – Sammenligning lekter

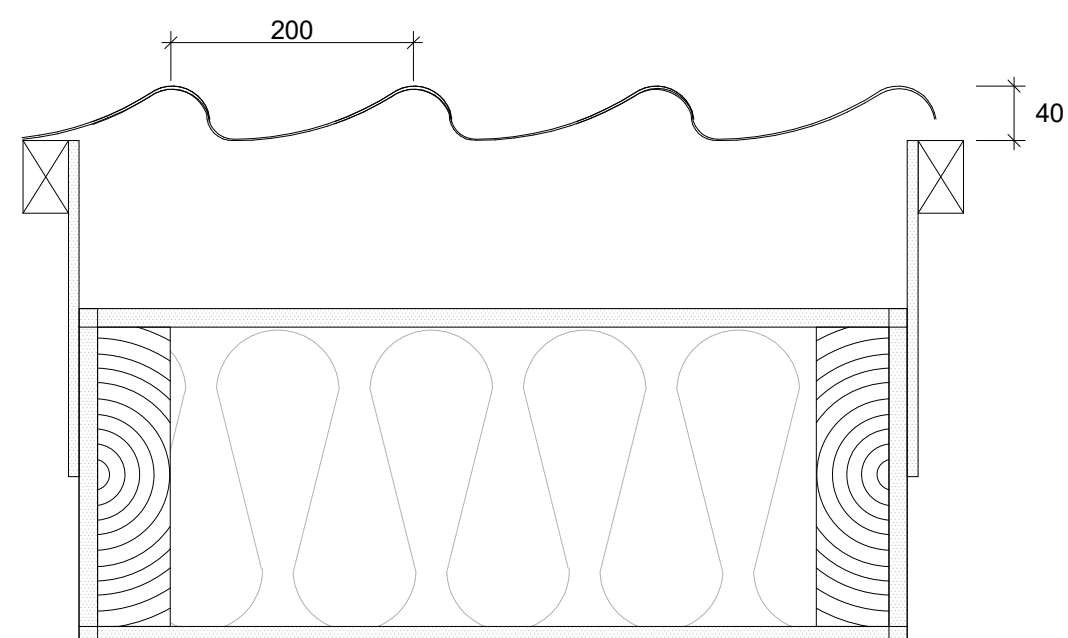
Beskrivelse:
 - Tegningen illustrerer løsning for
 takplanet i lukket takboks av aluminium



Prosjekt: Masteroppgave	Sign. OR
Tiltakshaver: Martin Eggen og Olaf Røer	Oppdragsansvarlig: NTNU SINTEF
Prosjekterende: Olaf Røer	Dato: 07.05.2018
Tegning: Detalj 1 - Tverrsnitt takplan	Målestokk: 1:5
	Tegningsnr.: 01

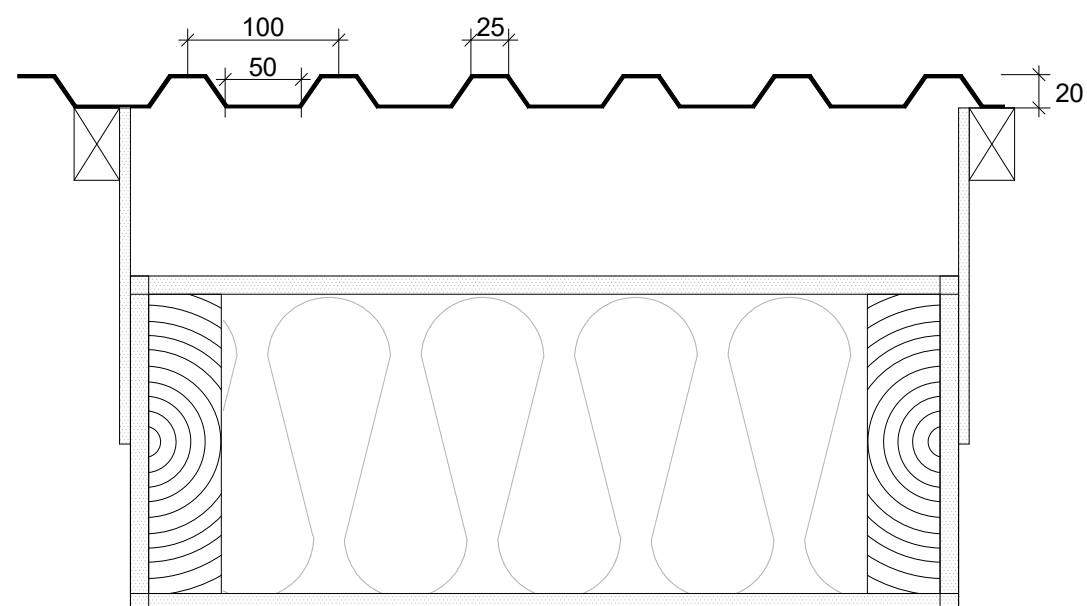
Beskrivelse:

- Tegningen illustrerer utført løsning for tak med tekking i takstein/varmelakkert stål-/aluminiumsplate
- Området som er åpent ble lukket med nashua duct-teip

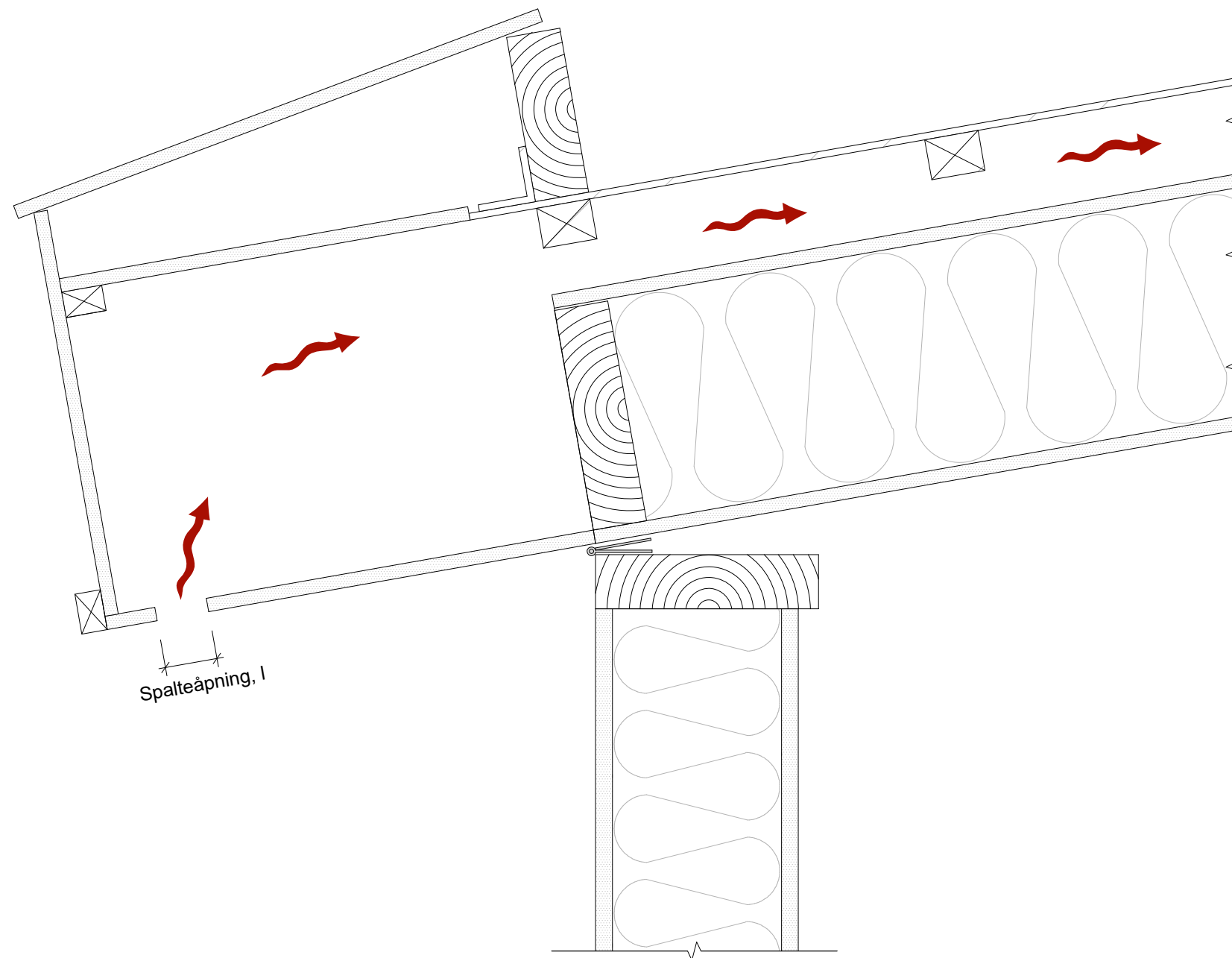


Prosjekt: Masteroppgave	Sign. OR
Tiltakshaver: Martin Eggen og Olaf Røer	Oppdragsansvarlig: NTNU SINTEF
Prosjekterende: Olaf Røer	Dato: 07.05.2018
Tegning: Detalj 2 - Tverrsnitt takplan med takstein	Målestokk: 1:5
	Tegningsnr.: 02

Beskrivelse:
- Tegningen illustrerer utført løsning for tak med tekking i TRP.



Prosjekt: Masteroppgave	Sign. OR
Tiltakshaver: Martin Eggen og Olaf Røer	Oppdragsansvarlig: NTNU SINTEF
Prosjekterende: Olaf Røer	Dato: 07.05.2018
Tegning: Detalj 3 - Tverrsnitt takplan med TRP	Målestokk: 1:5
	Tegningsnr.: 03



Prosjekt:
Masteroppgave

Sign.
OR

Tiltakshaver:
Martin Eggen og Olaf Rør

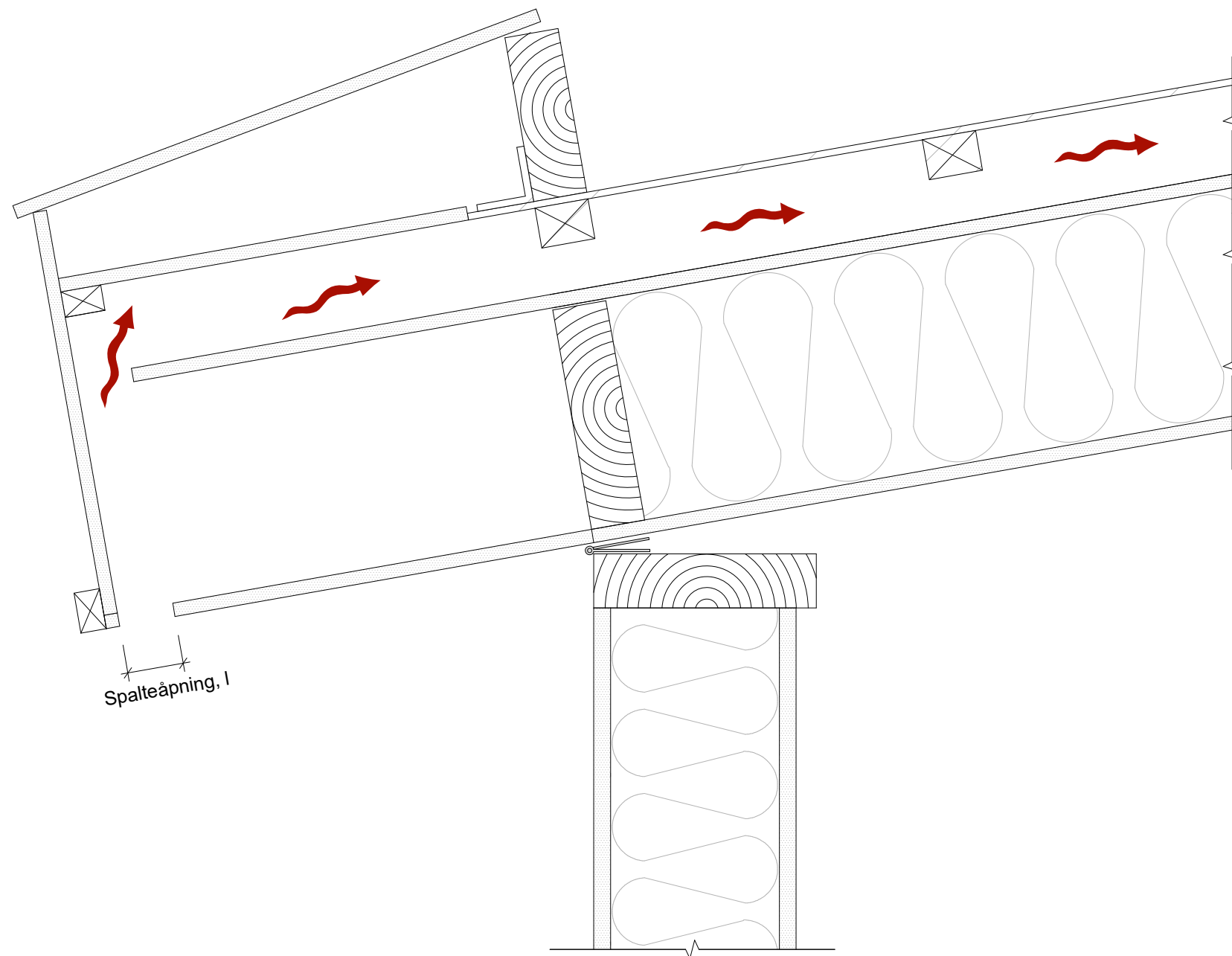
Oppdragsansvarlig:
NTNU SINTEF

Prosjekterende:
Olaf Rør

Dato:
01.06.2018

Tegning:
Detalj 4 - Raftekasse 0

Målestokk:
1:5
Tegningsnr.:
04



Prosjekt:
Masteroppgave

Sign.
OR

Tiltakshaver:
Martin Eggen og Olaf Rør

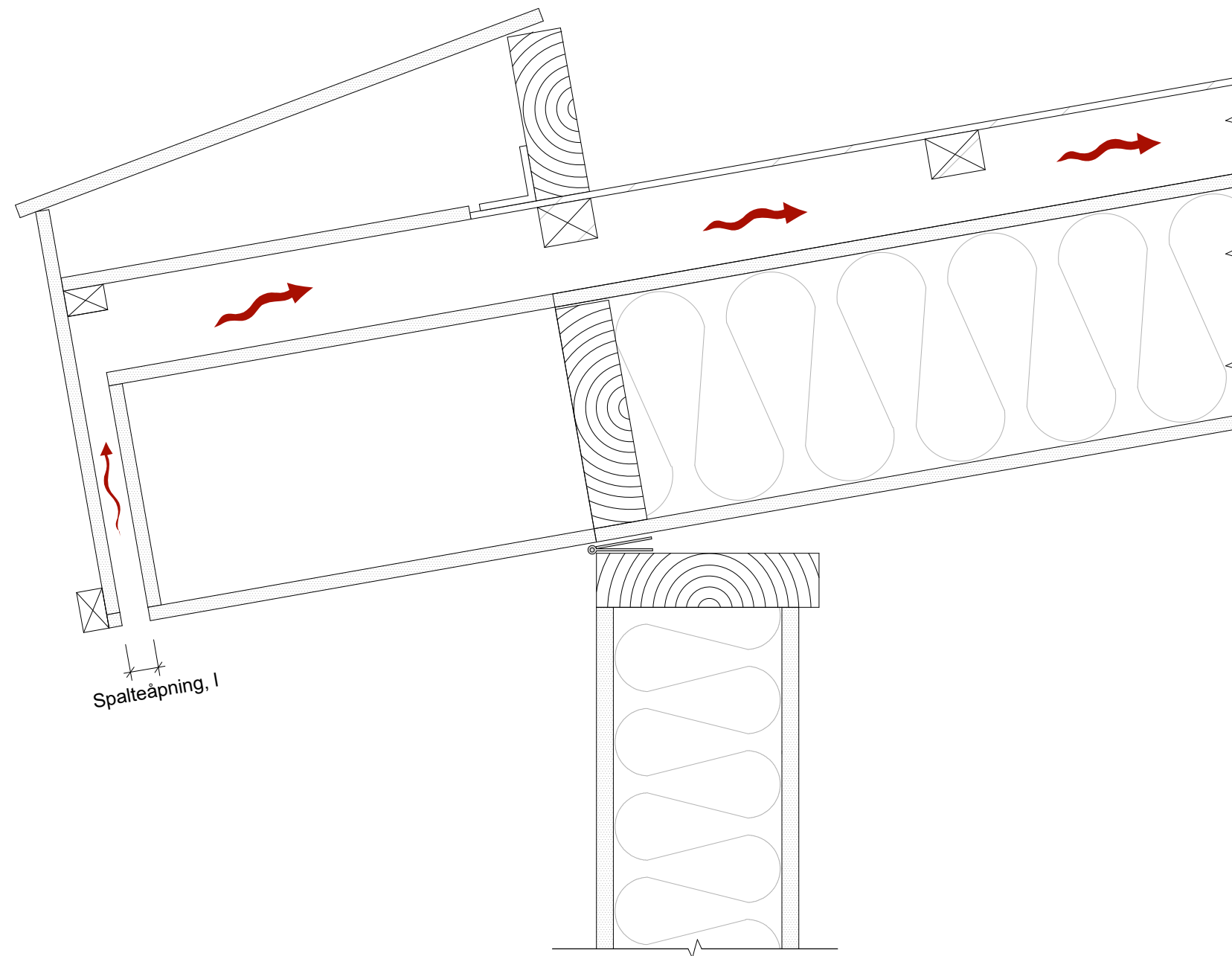
Oppdragsansvarlig:
NTNU SINTEF

Prosjekterende:
Olaf Rør

Dato:
07.05.2018

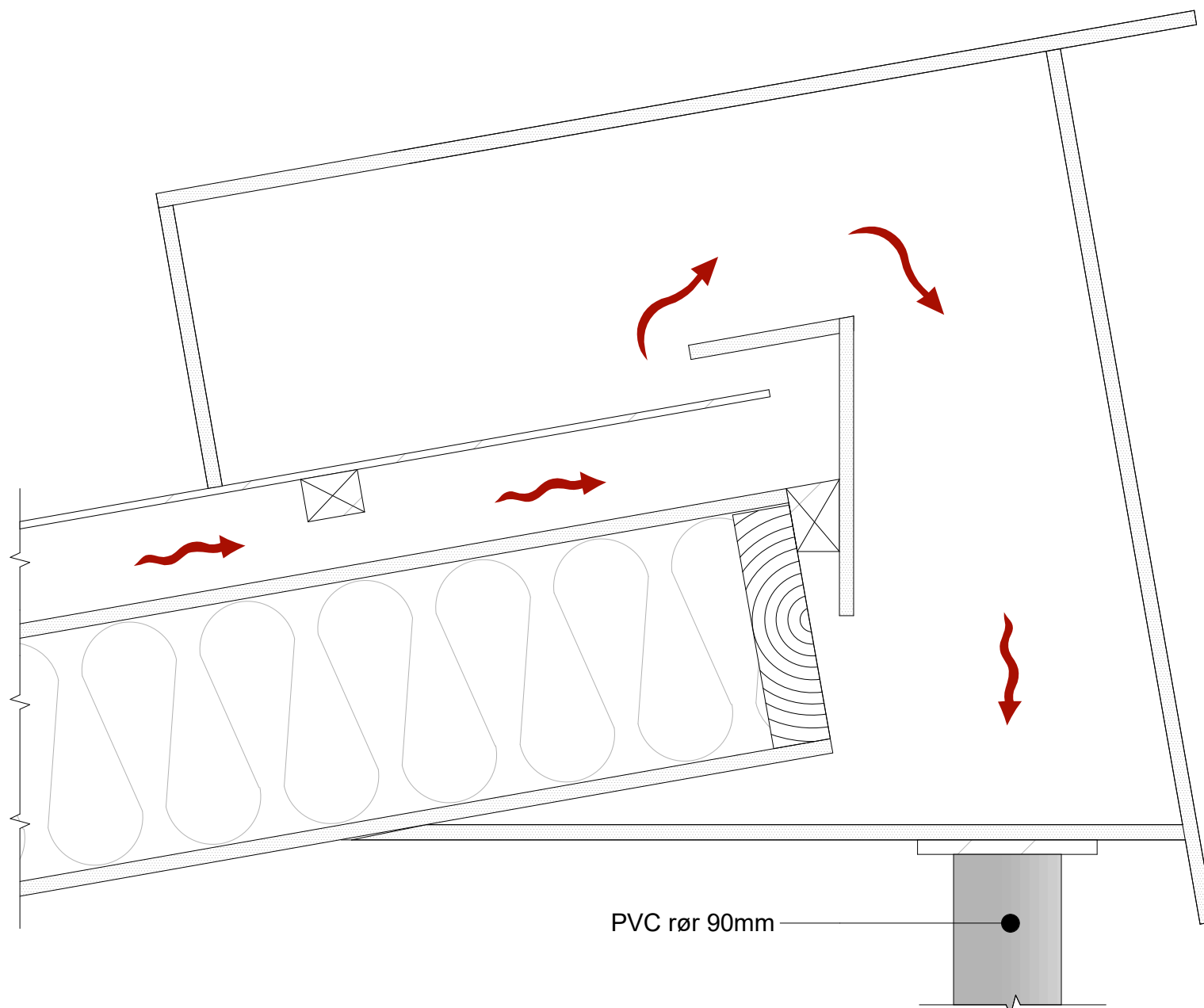
Tegning:
Detalj 5 - Raffekasse 1

Målestokk:
1:5
Tegningsnr.:
05

**Beskrivelse:**

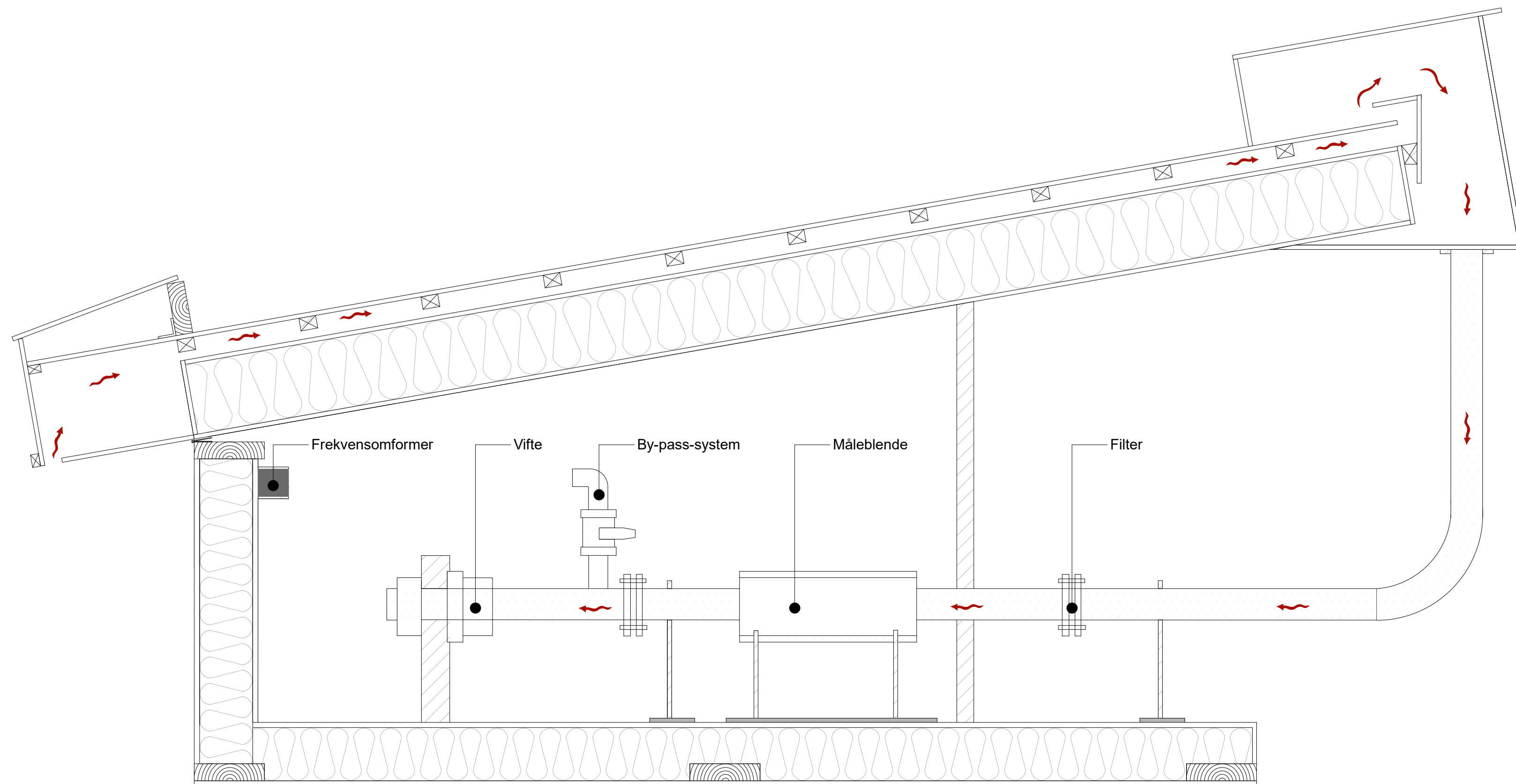
- Tegningen illustrerer oppbygningen av raftekassen i modellen
- Løsningen skal bygges slik at raftekassen er innpakket, og luftingen i sin helhet foretas bak takrenna

Prosjekt: Masteroppgave	Sign. OR
Tiltakshaver: Martin Eggen og Olaf Røer	Oppdragsansvarlig: NTNU SINTEF
Prosjekterende: Olaf Røer	Dato: 07.05.2018
Tegning: Detalj 6 - Raftekasse 2	Målestokk: 1:5
	Tegningsnr.: 06

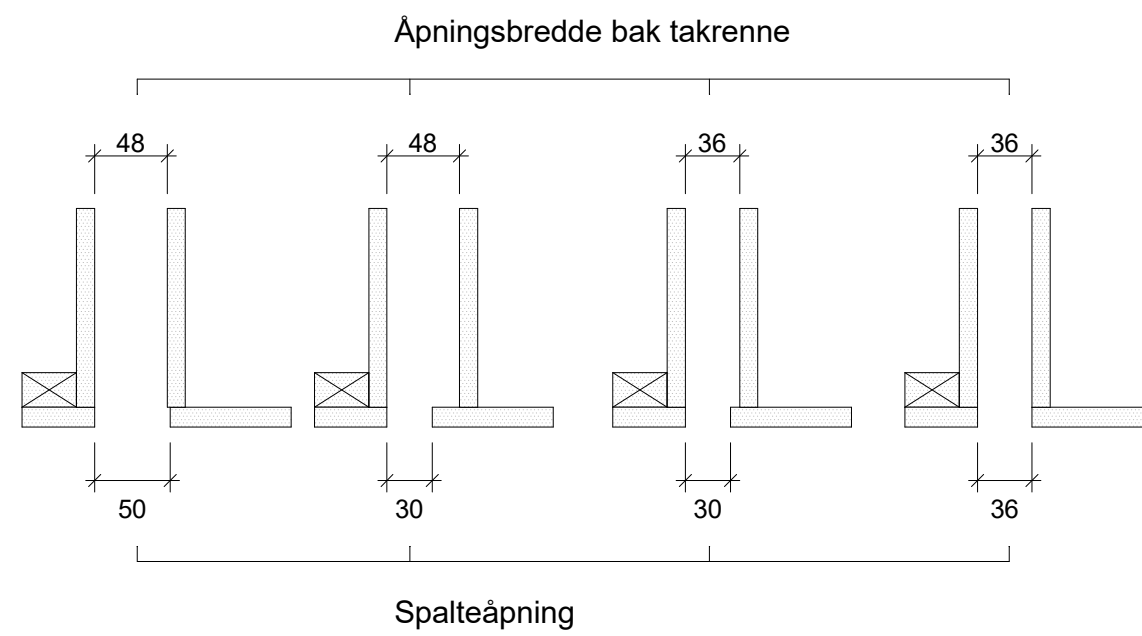
**Beskrivelse:**

- Tegningen illustrerer oppbygningen av mønekassen i modellen
- Oppbygningen i OK av takplanet er bygget for å representere løsningen som er å finne i takkonstruksjoner
- Luftspaltens dimensjoner er ikke fastsatt men høyden i tegningen er satt etter veiledningen til TEK10

Prosjekt: Masteroppgave	Sign. OR
Tiltakshaver: Martin Eggen og Olaf Rør	Oppdragsansvarlig: NTNU SINTEF
Prosjekterende: Olaf Rør	Dato: 07.05.2018
Tegning: Detalj 7 - Mønekasse	Målestokk: 1:5
	Tegningsnr.: 07



Prosjekt: Masteroppgave	Sign. OR
Tiltakshaver: Martin Eggen og Olaf Røer	Oppdragsansvarlig: NTNU SINTEF
Prosjekterende: Olaf Røer	Dato: 07.05.2018
Tegning: Detalj 8 - Tverrsnitt takplan lengderetning	Målestokk: 1:5
	Tegningsnr.: 68



Prosjekt:
Masteroppgave

Sign.
OR

Tiltakshaver:
Martin Eggen og Olaf Rør

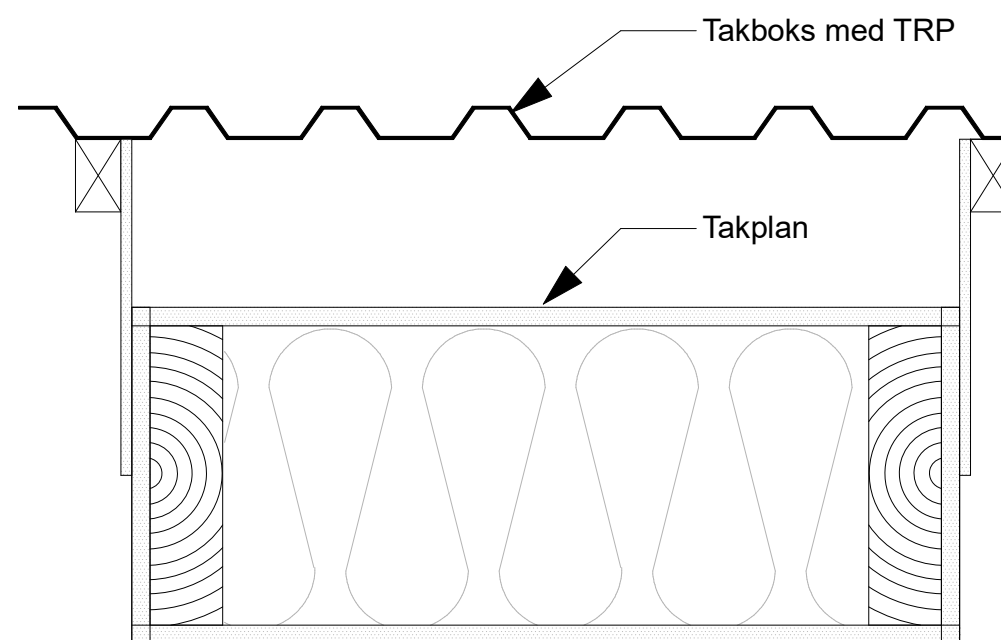
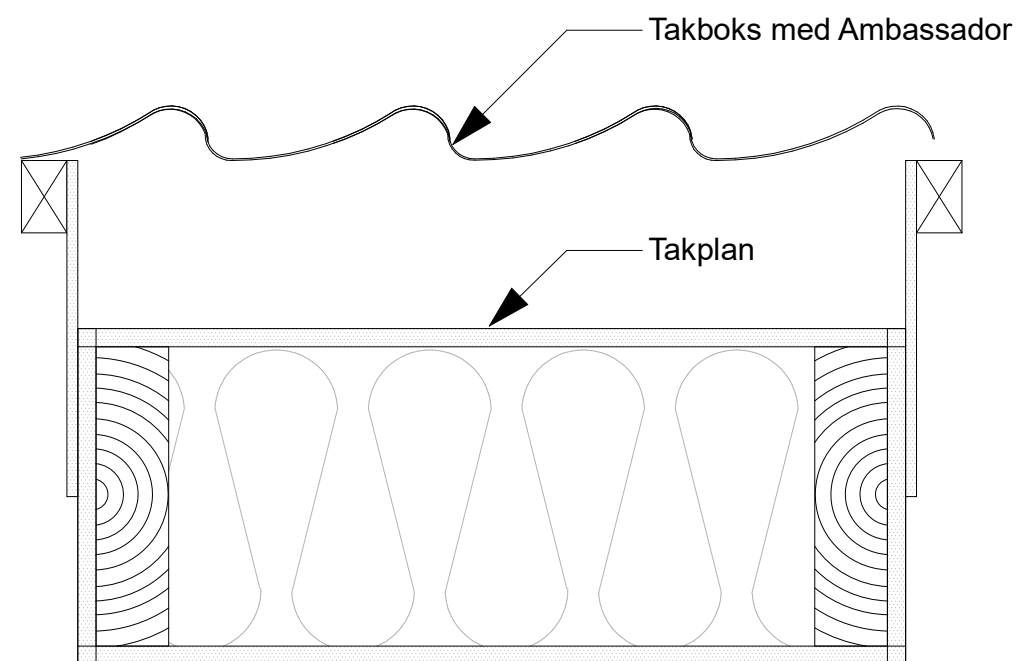
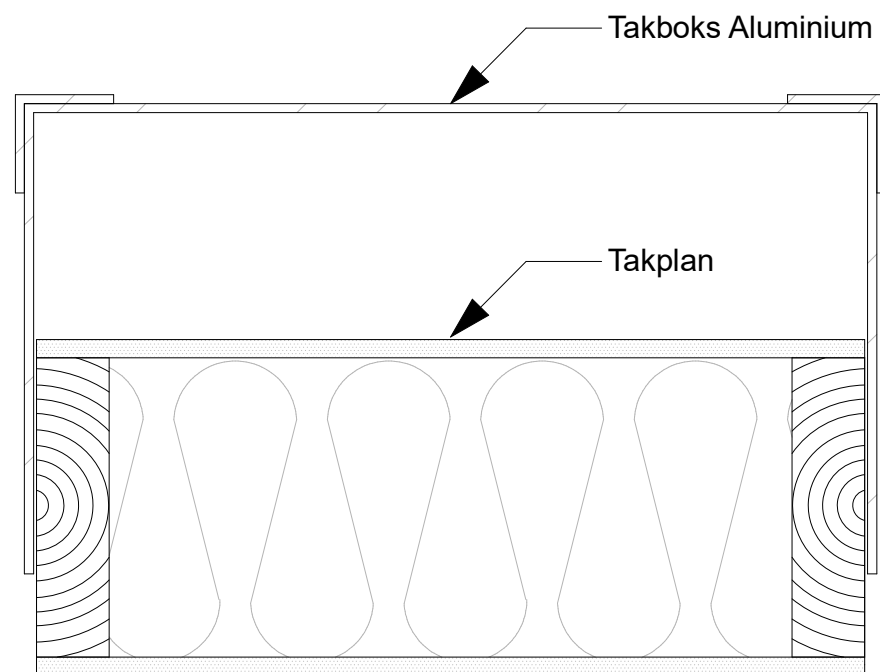
Oppdragsansvarlig:
NTNU SINTEF

Prosjekterende:
Olaf Rør

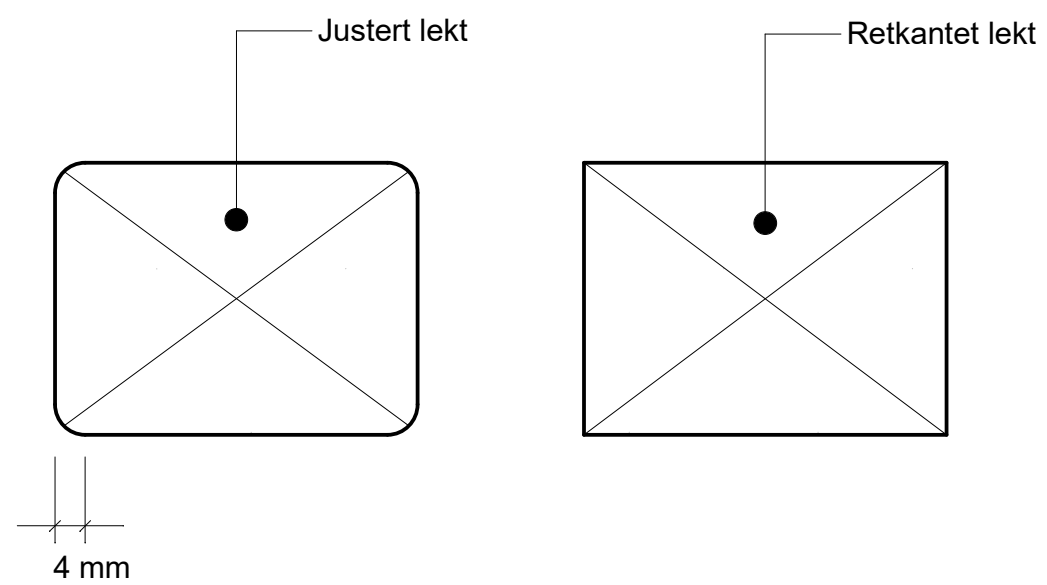
Dato:
15.05.2018

Tegning:
**Detalj 9 - Illustrasjon spalteåpning
raft 2**

Målestokk:
1:5
Tegningsnr.:
10



<p>Prosjekt: Masteroppgave</p>	<p>Sign. OR</p>
<p>Tiltakshaver: Martin Eggen og Olaf Røer</p>	<p>Oppdragsansvarlig: NTNU SINTEF</p>
<p>Prosjekterende: Olaf Røer</p>	<p>Dato: 14.05.2018</p>
<p>Tegning: Detalj 10 - Sammenligning av takbokser</p>	<p>Målestokk: 1:5</p>
	<p>Tegningsnr.: 10</p>



Prosjekt: Masteroppgave	Sign. OR
Tiltakshaver: Martin Eggen og Olaf Rør	Oppdragsansvarlig: NTNU SINTEF
Prosjekterende: Olaf Rør	Dato: 15.05.2018
Tegning: Detalj 11 - Sammenligning lekter	Målestokk: 1:1
	Tegningsnr.: 11

Vedlegg 2

Artikkel

Nok luft til taket

Nok luft til taket



Figur 1: Luftstrømmens forløp under taktekningen er filmet ved hjelp av røyk og spesiell lyssetting. Foto: Olaf Rør.

Skrå luftede tretak er en veldig vanlig takkonstruksjon i Norge. Konstruksjonsformen krever tilstrekkelig lufting av takflaten for å unngå snøsmelting og ising i takrenner. I en nylig fullført masteroppgave ved NTNU har vi vist at motstanden mot luftstrømning i luftespalten under taktekningen minker 30% ved å bytte ut rettkantete steinlekter med justerte lekter.

Martin Eggen og Olaf Rør
Institutt for bygg- og miljøteknikk

Lars Gullbrekken
SINTEF Byggforsk

Luftespalten under taktekning i skrå tak luftes mot uteluft for å hindre oppvarming av tekningen på grunn av varmetap gjennom takkonstruksjonen. Slik unngår vi smelting av snø på taket som fryser igjen på de kaldere lavere delene av taket (ved raft). I tillegg er luftingen viktig for å ventilere vekk byggfukt og eventuell fukt i form av kondens eller mindre lekkasjer. Normalt er luftbehovet for å hindre snøsmelting dimensjonerende for luftespalten.

Når man skal bygge et skrått tretak i dag velges taktekningens lekter ut i fra minimumskrav gitt i Byggforskserien og hvilke tilgjengelige lekter som finnes hos den lokale byggevareleverandøren.

Tilgjengelig er ofte rettkantete lekter i dimensjonene 30 x 48 mm eller 36 x 48 mm, men justerte utgaver kan også skaffes.

Laboratorieprøving

Hovedmålet med masteroppgaven er å avklare hvordan lekteutformingen påvirker lufteevnen til luftespalten. Studien er gjennomført som underlag for utvikling av nye retningslinjer for lufting av lange skrå tretak. Arbeidet er gjort i tilknytning til Lars Gullbrekken sitt PhD arbeid i SFI Klima 2050.

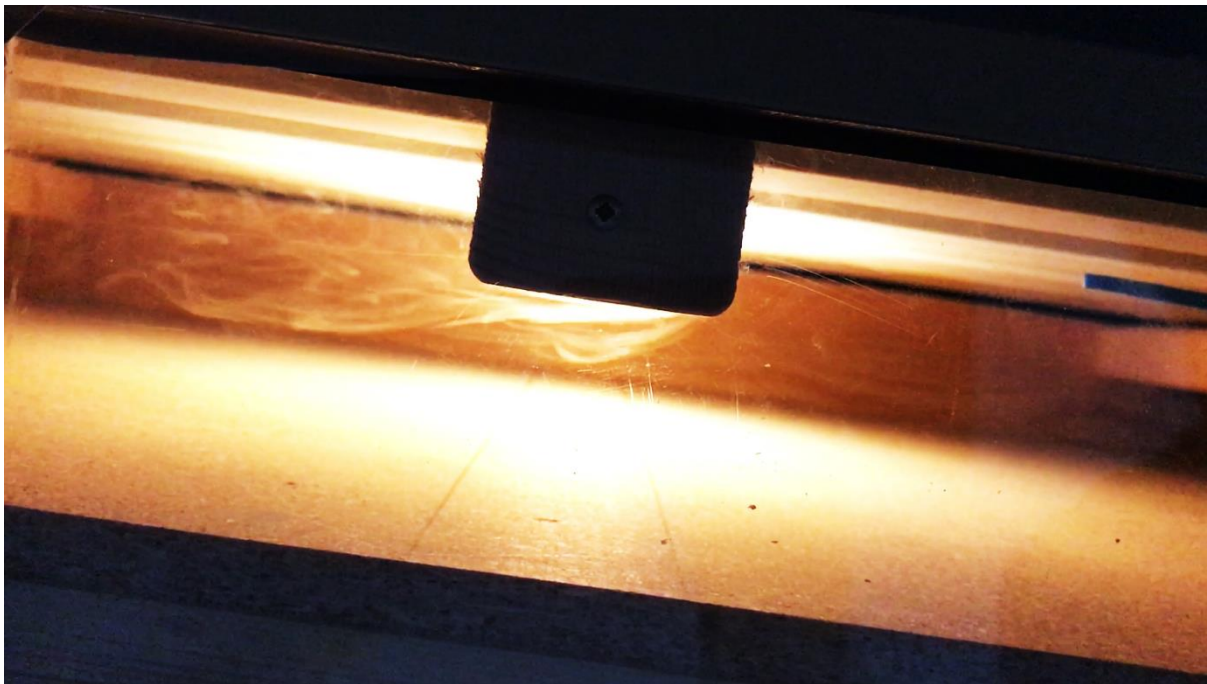
I masteroppgaven har vi studert effekten av trykktapet og de lokale luftbevegelsene knyttet til valg av steinlekter. En storskala testmodell av skrått tretak med justerbar sløyfehøyde og taktekning er benyttet i forsøkene. I en av sideveggene i laboriemodellen har vi faset ut et vindu sentrert rundt en steinlekt som vist i figur 1. Slik ble det mulig å kjøre røyk i en smal stripe rett inn bak lekten, for så å gjøre filmopptak av luftstrømningen under forsøkene. Dette ble gjort med 4 ulike hastigheter (0,2, 0,4, 0,6 og 0,8 m/s) og 3 ulike sløyfehøyder (23, 36 og 48 mm).

Minst trykktap over justerte lekter

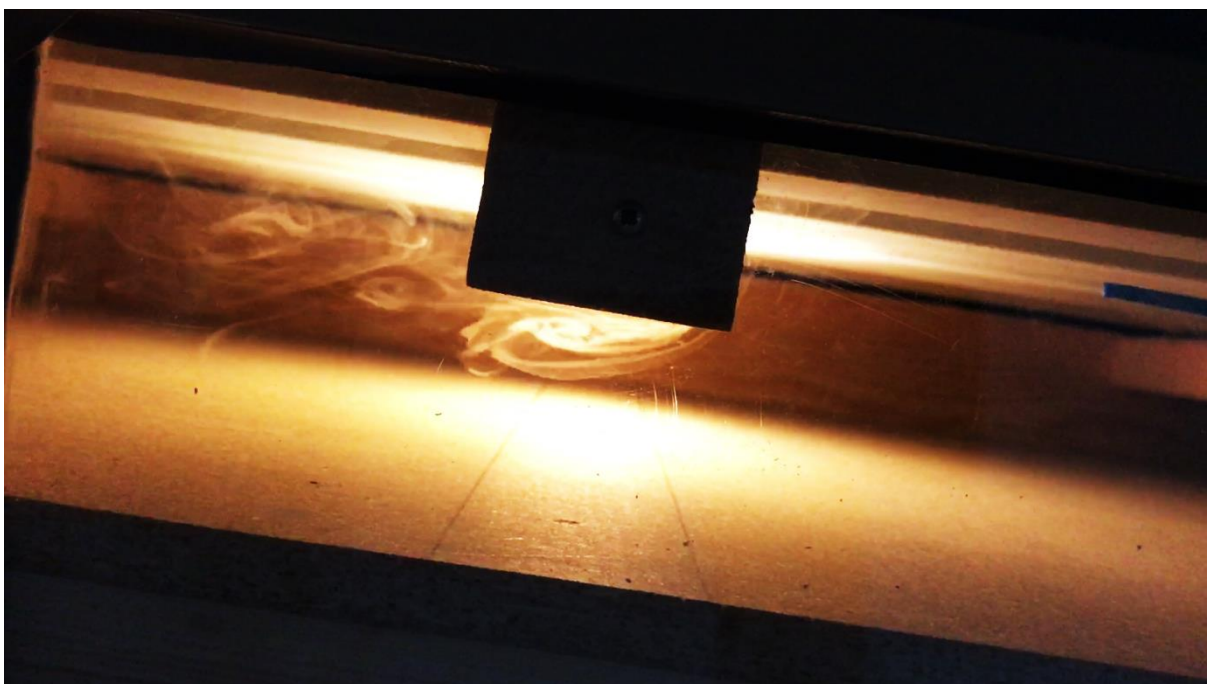
Måling av trykktap i luftespalten og filmopptak av luftstrømmen viste tydelige forskjeller på rettkantete og justerte lekter. Forsøkene viser at trykktapet i luftespalten minker i gjennomsnitt 30% ved å bytte ut rettkantete lekter med justerte lekter. For noen av situasjonene var trykktapet halvert for justerte lekter sammenlignet med rettkantede. Forskjellen mellom luftstrømmen for de to lektetyperne er vist i figur 2 og 3. I figur 2 er nedbøyningen av røyken over første hjørne veldig liten sammenlignet med figur 3 hvor nedbøyningen er mer markant. Det kommer også klart frem at luftbevegelsen i figur 3 har flere turbulente strømninger enn i figur 2 hvor strømmen er langt mer laminær.

Anbefaling

Lufting av lange skrå tak (>15m) kan kreve stor luftespalte høyde for å sikre tilstrekkelig lufting under taktekningen. Bevist bruk av steinlekter med avrundede hjørner vil tillate en betydelig redusert luftespalte høyde uten økt risiko for snøsmelting på taket.



Figur 2: Luftstrøm rundt avfaset (justert) steinlekt 36 x 48 mm ved lufthastighet 0,2 m/s. Sløyfehøyden er 48 mm. Taktekning øverst og undertak nederst. Foto: Martin Eggen



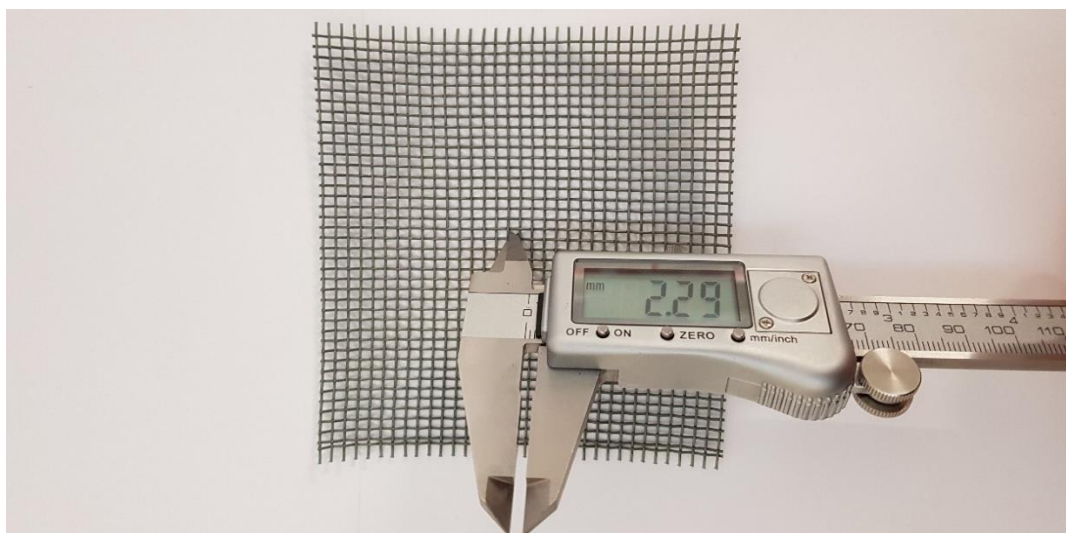
Figur 3: Luftstrøm rundt rettkantet steinlekt 36 x 48 mm ved lufthastighet 0,2 m/s. Sløyfehøyden er 48 mm. Foto: Martin Eggen

Vedlegg 3

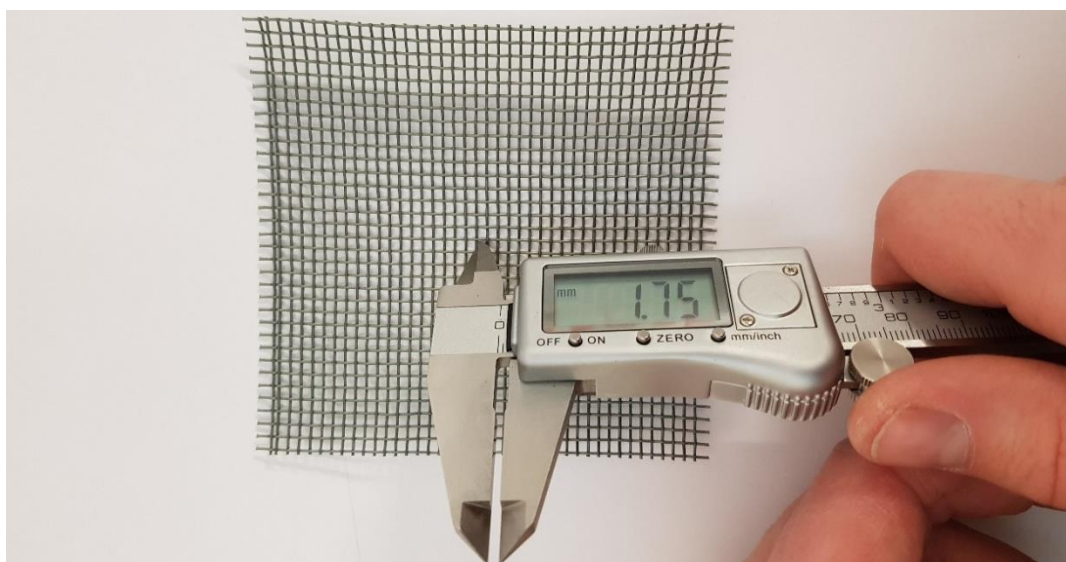
Dimensjoner fluenett

Fluenett 1 – PE - Plast
Fluenett 2 – Aluminium
Fluenett 3 – Nylon

Nett 1 – PE – Plast



Figur 0.1 Maskestørrelse 2,29 mm



Figur 0.2 Maskestørrelse 1,75 mm



Figur 0.3 Tråddiameter 0,60 mm

Nett 2 – Aluminium



Figur 0.4 Maskestørrelse 1,39 mm



Figur 0.5 Maskestørrelse 1,16 mm



Figur 0.6 Tråddiameter 0,22 mm

Nett 3 – Nylon



Figur 0.7 Maskestørrelse 1,08 mm



Figur 0.8 Maskestørrelse 0,91 mm



Figur 0.9 Tråddiameter 0,19 mm

Vedlegg 4

Egenlekkasje

Egenlekkasje

Egenlekkasjetester ble utført hver gang det ble gjort endringer på laboratoriemodellen. Ingen forsøk ble igangsatt før egenlekkasjen var <1%. Denne grenseverdien ble fastsatt i samarbeid med veileder. Den ble valgt da verdier under 1% ble regnet som neglisjerbare. Av tidsmessige årsaker ble ikke alle disse kontrollene logget. Et utvalg av lekkasjetestene ble likevel logget gjennom forsøkene. Tabell 1 viser de lagrede lekkasjetestene.

Tabell 1 Egenlekkasje for utvalgte tilfeller

Nr.	Raft [0, 1, 2]	Ambassador	TRP	Lekt	Sløyfehøyde [mm]	Åpen [Pa]	Lukket [Pa]	% [<1]
1	0		X	Rett	48	42,133	0,359	0,853
2	0		X	Justert	23	42,506	0,486	1,142
3	0		X	Justert	48	44,490	0,373	0,837
4	0	X		Rett	23	49,752	0,529	1,063
5	0			Ingen	48	41,420	0,275	0,663
6	1			Ingen	48	21,420	0,156	0,729
7	2			Ingen	48	33,430	0,328	0,982

Tabellen viser at to av de lagrede egenlekkasjetestene har lekkasjer over 1%. For å begrunne dette må det forklares hvordan egenlekkasjetester blir utført.

En egenlekkasjetest kjøres først med åpen spalteåpning (Figur 1). Det er koblet til et mikromanometer i P1 (vist i Figur 2.15). Hastigheten på viften skrues opp til trykkforskjellen mellom P1 og luften i rommet når en valgt verdi (1,0-1,1 Pa er blitt mest brukt). Dette blir logget før spalteåpningen tettes med teip (Figur 2).

Så blir hastigheten på viften skrudd kraftig ned. Målet er at mikromanometeret i P1 skal vise samme verdien som da spalteåpningen var åpen. Hvis volumet gjennom måleblenden da er <1% av volumet før spalteåpningen ble lukket er lekkasjen godkjent.

Tabell 2 viser volumstrømmen over måleblenden og målingen fra mikromanometeret i P1. Som det fremgår av tabellen er trykket ved P1 høyere ved målingen med lukket spalteåpning kontra åpen. Dette medfører at lekkasjen fremstår som større enn den er. Ved like verdier målt ved P1 ville også disse egenlekkasjene gitt verdier under 1%.

Tabell 2 Egenlekkasje. Verdier for volumstrøm og trykk ved P1

Nr.	Åpen		Lukket	
	Måleblende	Raft (P1)	Måleblende	Raft (P1)
2	42,506	1,096	0,486	1,204
4	49,752	0,942	0,529	1,047

Begrunnelsen for at noen av egenlekkasjetestene ble logget med for høye verdier er at viften ikke gjorde det mulig å nå identiske verdier i P1. Selv ikke med by-pass-systemet var dette mulig. Dette begrunnes med at volumstrømmen ved lukket spalteåpning er veldig lav.



Figur 1 Åpen spalteåpning i raftekassen



Figur 2 Lukket spalteåpning i raftekassen